

— Bernhard Sagmeister

Maschinenteile aus zementgebundenem Beton

Beuth

**Maschinenteile aus
zementgebundenem Beton**

(Leerseite)



Dr.-Ing. Bernhard Sagmeister

Maschinenteile aus zementgebundenem Beton

1. Auflage 2017

Herausgeber:
DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

Beuth Verlag GmbH · Berlin · Wien · Zürich

Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

© 2017 **Beuth Verlag GmbH**

Berlin · Wien · Zürich

Am DIN-Platz

Burggrafenstraße 6

10787 Berlin

Telefon: +49 30 2601-0

Telefax: +49 30 2601-1260

Internet: www.beuth.de

E-Mail: kundenservice@beuth.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in elektronische Systeme.

© für DIN-Normen DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.

Die im Werk enthaltenen Inhalte wurden von Verfasser und Verlag sorgfältig erarbeitet und geprüft. Eine Gewährleistung für die Richtigkeit des Inhalts wird gleichwohl nicht übernommen. Der Verlag haftet nur für Schäden, die auf Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit seitens des Verlages zurückzuführen sind. Im Übrigen ist die Haftung ausgeschlossen.

Titelbild: © B. Sagmeister, Jeroen Seyffer Fotografie GmbH

Satz: B & B Fachübersetzergesellschaft mbH, Berlin

Druck: Colonel, Kraków

Gedruckt auf säurefreiem, alterungsbeständigem Papier nach DIN EN ISO 9706

ISBN 978-3-410-27186-4

ISBN (E-Book) 978-3-410-27187-1

Autor

Bernhard Sagmeister ist Inhaber und Geschäftsführer der durcrete GmbH, einem technischen Beratungs- und Vertriebsbüro für hochwertige Betone im Maschinenbau.

Nach Studium des Bauingenieurwesens an der TU München promovierte er an der TH Darmstadt und war zu Beginn der Berufstätigkeit als Tragwerksplaner, Bauleiter und Oberbauleiter bei der Philipp Holzmann Gruppe beschäftigt. Nach mehreren Jahren als Leiter der Materialprüfungsanstalt Neuwied wechselte er in die Baustoffindustrie und war Geschäftsführer von Betonfertigteilwerken für Wandelemente aus Leichtbeton, Stahlbetonfertiggaragen und vorgefertigten Badezimmern. 2010 gründete er die durcrete GmbH, welche sich mit der Beratung, Entwicklung, Berechnung und dem Vertrieb von Produkten aus UHPC-Beton auf Basis des Bindemittels Nanodur für den Maschinenbau beschäftigt. Seine heutigen Schwerpunkte sind Anwendungslösungen mit Spezialbetonen aller Art sowie die hierfür erforderlichen Produktionstechnologien.



(Leerseite)

Danksagung

Im Jahre 2009 rief ein Unternehmer aus Ostwestfalen bei der Firma Dyckerhoff GmbH in Wiesbaden an. Er fertige diverse Maschinenbauteile aus Beton für ein Unternehmen, welches Holzbearbeitungsmaschinen herstellt. Ob das neue Bindemittel NANODUR® dafür geeignet sei? Heute fertigt das Spezialfertigteilwerk, die Sudholt-Wasemann GmbH aus Herzebrock-Clarholz mit über 25 Mann hochpräzise Serienbauteile für namhafte Werkzeugmaschinenhersteller im In- und Ausland.

Damaliger Ansprechpartner für den Anrufer, Herrn Heinrich Wasemann, war der Leiter Produktentwicklung und Spezialbaustoffe der Dyckerhoff GmbH, Herr Thomas Deuse. Herr Deuse sah sehr klar, dass im Bauwesen für das Produkt Ultra High Performance Concrete oder UHPC auf absehbare Zeit keine Anwendungen existieren werden. Er erkannte das Potential für UHPC im Maschinenbau, setzte sich in und außerhalb des Unternehmens dafür ein und förderte die Erarbeitung der technischen Grundlagen. Ihm ist es zu verdanken, dass heute drei klassische Mineralgusshersteller sowie Fertigteilwerke und Maschinenbauunternehmen in Deutschland, Schweiz, Italien, Tschechien und China Maschinenbauteile aus UHPC auf Basis des Bindemittels NANODUR® der Dyckerhoff GmbH produzieren.

Maschinenbauunternehmen benötigen fertig lackierte und präzisionsbearbeitete Bauteile. Herr Deuse überzeugte Herrn Bernhard Sagmeister, sich mit Maschinenbauteilen zu beschäftigen. Dieser verantwortet heute mit dem Unternehmen durcrete GmbH nicht nur die Anwendungsberatung für Nanodur Beton, sondern entwickelt Bauteile aus UHPC und bietet fertige Maschinenteile an. Als ausgelagerte Vertriebsorganisation für Hersteller kauft er die Teile bei einem Produzenten, übernimmt das Risiko der Schnittstelle mit den Präzisionsbearbeitern und liefert fertige Teile aus. Durcrete motivierte etablierte Mineralgusshersteller, sich mit dem neuen Werkstoff zu beschäftigen und dessen Vorteile zu erkennen. Durch seine Nähe zu den Maschinenbaukunden erkannte durcrete, welche technischen Nachweise und Weiterentwicklungen erforderlich sind und setzte diese mit der finanziellen und prüftechnischen Unterstützung der Dyckerhoff GmbH um.

Die in diesem Buch präsentierten Ergebnisse gäbe es nicht ohne das praktische Wissen von Herrn Heinrich Wasemann und den enormen finanziellen und prüftechnischen Einsatz der Firma Dyckerhoff GmbH, hier vertreten durch die Person von Herrn Thomas Deuse. Der Verfasser steht nur stellvertretend für diese „Dreierbande“ und ist ihnen zu Dank verpflichtet.

(Leerseite)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Anforderungen an Maschinenteile aus Beton	2
2.1	Geschichte des zementgebundenen Betons	2
2.2	Entwicklung von zementgebundenem Beton im Maschinenbau ...	5
2.3	Entwicklung von kunstharzgebundenem Polymerbeton/ Mineralguss	7
2.4	Anforderung des Bauingenieurs an Beton	10
2.4.1	Druckfestigkeit	10
2.4.2	Duktilität	13
2.4.3	QM im Bauwesen	16
2.5	Anforderungen des Maschinenbauingenieurs an ein Bauteil aus Beton	19
2.5.1	Präzision	19
2.5.2	Lineares Verhalten	22
2.5.3	Verformungsstabilität	24
2.5.4	Schwingungen	24
2.5.5	Thermische Trägheit	26
3	Stand der Technik zu UHPC im Maschinenbau	29
3.1	Stand der Technik zu UHPC	29
3.2	Silikastaub in UHPC	30
3.3	Fasern in UHPC	31
3.4	Referenzrezeptur UHPC	32
3.5	UHPC-Rezepturen bei Maschinenbauanwendungen	33
3.6	Patente zu UHPC im Maschinenbau	35
3.7	Konzepte zur Erzielung von Präzision	36
3.8	Verfüllte Konstruktionen	41
3.9	Materialvergleich Materialien im Maschinenbau	43
4	Nanodur Beton im Maschinenbau	44
4.1	Bindemittel	44
4.2	Rezeptur und Frischbetoneigenschaften Nanodur Beton	47
4.3	Druckfestigkeit Nanodur Beton	50
4.4	Wärmebehandlung	53
4.5	E-Modul und Querdehnzahl	55

4.6	Zugfestigkeit von Nanodur Beton	56
4.6.1	Prüfmethode	57
4.6.2	Probekörpervolumen	58
4.6.3	Maßstabseffekt	59
4.6.4	Vorlagerung	65
4.6.5	Ober- und Unterseite	69
4.6.6	Zusammenfassung Zugfestigkeit	70
4.7	Haftzugfestigkeit von Nanodur Beton	71
4.7.1	Versuchsergebnisse zur Haftzugfestigkeit	71
4.7.2	Verkleben von Maschinenbauteilen	72
4.7.3	Reparatur von Betten	73
4.8	Schub von Nanodur Beton	74
4.9	Torsion von Nanodur Beton	75
4.10	Spannungskombinationen	77
4.11	Schwinden von Nanodur Beton	78
4.11.1	Stand der Technik zu Schwinden	78
4.11.2	Schwinden von Nanodur Beton	80
4.11.3	Stand der Technik zur Rissvermeidung infolge Schwindens	81
4.11.4	Praktisches Vorgehen zur Rissvermeidung infolge Schwindens ..	82
4.11.5	Verkrümmungen durch Schwinden	84
4.11.6	Lageveränderung durch Schwinden	85
4.11.7	Stoppen des Schwindens	86
4.11.8	Berechnung von Schwindeffekten	89
4.11.9	Grenzen der Vorhersage	90
4.12	Kriechen von Nanodur Beton	91
4.12.1	Stand der Technik zu Kriechen	91
4.12.2	Kriechen von Nanodur Beton	92
4.13	Quellen von Nanodur Beton infolge Wasser	93
4.14	Physikalische Daten von Nanodur Beton	96
4.15	Hochtemperatureigenschaften von Nanodur Beton	98
4.16	Dämpfungswerte von Nanodur Beton	99
4.17	Ermüdung	100
4.18	Angreifende Stoffe auf Beton	101
4.18.1	Beständigkeit von zementgebundenem Beton	101
4.18.2	Beständigkeit von Nanodur Beton gegen Umwelteinflüsse	103

4.18.3	Angreifende Stoffe auf Nanodur Beton	104
4.18.4	Formbeständigkeit von Nanodur Beton bei angreifenden Stoffen ..	107
4.19	Einbauteile in Nanodur Beton	109
4.19.1	Transport	109
4.19.2	Aufstellfüße	111
4.19.3	Stahlplatten	112
4.19.4	Gewindehülsen	114
4.20	Ökologische Betrachtungen von Nanodur Beton	117
4.21	Sonstiges	118
5	Berechnung von Nanodur Beton	120
6	Produktion von Bauteilen aus Nanodur Beton	125
6.1	Produktionsanlagen	125
6.2	Formen	126
6.3	Vermessung	129
6.4	Oberflächen	131
6.5	Einfüllseite	133
7	Anwendungsbeispiele	134
7.1	Strama MPS Prüftisch für Zahnräder	134
7.2	HOMAG Fahrständermaschine	137
7.3	Shandong Yonghua Gantrymaschine	138
7.4	fpt Robotik Handlingseinheit	139
7.5	Bütfering Schleifmaschinen	140
8	Glossar	141
9	Notation	143
	Abkürzungsverzeichnis	145
	Normen	152
	Literaturverzeichnis	154
	Bildnachweis	162

(Leerseite)

1 Einleitung

Maschinenbetten und -gestelle werden vorwiegend aus Grauguss und als Stahlschweißkonstruktion gefertigt. Aufgrund technischer und wirtschaftlicher Vorteile hat sich seit den 80er Jahren zusätzlich Mineralguss oder epoxidharzgebundener Polymerbeton etabliert. Als weiterer massiver Werkstoff hat sich bei Messmaschinen Naturhartgestein („Granit“) durchgesetzt.

Die Entwicklung des mit Zement gebundenen Betons erhielt seit den 90er Jahren durch die Einführung von erhärtungsfördernden Feinstoffen sowie neuen Fließmitteln einen gewaltigen Schub. Er endete in der Entwicklung von sehr festen und sehr dichten Betonen mit der Kennzeichnung UHPC (Ultra High Performance Concrete), welche inzwischen bei Maschinenbetten für Werkzeugmaschinen eingesetzt werden.

Dieses Buch beschreibt den Einsatz von zementgebundenem von Beton im Maschinenwesen, speziell im Werkzeugmaschinenbau. Es fasst die seit 150 Jahren gesammelten Erkenntnisse, Bemessungs- und Prüfverfahren von Bauingenieuren mit diesem weltweit wichtigsten Konstruktionsbaustoff zusammen. Dieses Wissen wird dem Anforderungsprofil des Maschinenbauingenieurs gegenübergestellt und die Wissenslücken bei der Anwendung im Maschinenbau werden identifiziert. Der Hauptteil behandelt die für den Maschinenbau wichtigen Materialeigenschaften der speziellen Betonsorte NANODUR®, und veröffentlicht erstmals umfangreiche Untersuchungsergebnisse zur Anwendung im Maschinenbau. Diese „Standardrezeptur“ des Nanodur Betons auf Basis des Bindemittels NANODUR®Compound 5941 wurde von der Firma Dyckerhoff im Jahre 2008 entwickelt und hat sich in unveränderter Form zum Marktführer im Maschinenbau entwickelt. In den letzten 5 Jahren wurden umfangreiche Untersuchungen zur Zugfestigkeit, Verformungsbeständigkeit, Verankerungs-, Verklebungs- und Abformtechnik durchgeführt, welche hier erstmals veröffentlicht werden. Mithilfe dieser Untersuchungen werden Empfehlungen zur praktischen Anwendung von zementgebundenen Betonen im Maschinenbau gegeben.

Das Buch gibt eine Übersicht zu unterschiedlichen Sichtweisen von Ingenieuren auf diesen Werkstoff. Jeder ist von der Richtigkeit seiner Gewissheiten und seiner seit Jahrhunderten überlieferten Sichtweise überzeugt. Somit ist dieses Buch ein Sprachführer oder eine Gebrauchsanleitung zur Vermittlung zwischen Bauwesen und Maschinenbau.

2 Anforderungen an Maschinenteile aus Beton

2.1 Geschichte des zementgebundenen Betons

Werden bestimmte Erden auf hohe Temperaturen erhitzt und die Schlacken anschließend zu Gesteinsmehl vermahlt, ergeben diese ein Bindemittel, welches nach Mischen mit Wasser erhärtet. Das gebrannte Gesteinsmehl ist der Binder, das Wasser ist der chemische Reaktionspartner (oder „Härter“). Beton trocknet nicht aus, sondern erhärtet. Der Erhärtungsprozess findet auch unter Luftabschluss z. B. unter Wasser statt.

Das älteste bekannte Bindemittel dieser Art sind vulkanische Aschen, bei denen die Brennenergie frei Haus geliefert wurde. Die Römer verwendeten für ihr „Opus Cementitum“ Aschen aus dem vulkanischen Gebiet um den Vesuv. Berühmt sind die gebrannten Gesteine um den heutigen Ort Pozzuoli bei Neapel, die Namensgeber für die puzzolanische Reaktion sowie die puzzolanischen Zuschlagstoffe sind. Die Kuppel des Pantheons in Rom ist aus derartigem Bindemittel, vermischt mit schweren und leichten Gesteinskörnungen, gebaut. Weil in der Betonschale kein Stahl ist, der rosten könnte, steht sie nach fast 2.000 Jahren noch immer.

Das erfolgreichste Bindemittel dieser Art ist Zement, genauer definiert Portlandzement. Dieser wird aus einer gemahlene Mischung aus Kalksteinen und Lehm bei über 1.400°C zu Zementklinker gebrannt und danach zu Mehl in unterschiedlichen Feinheitsgraden vermahlen. Das Ausgangsgestein ist als „Mergel“ weltweit überall in großen Mengen verfügbar. Zement wurde in Abhängigkeit von der technischen Entwicklung bei den Brennöfen Anfang des 19. Jahrhunderts vor allem in England entwickelt und verbreitete sich schnell. So wurde der deutsche Zementhersteller Dyckerhoff im Jahre 1864 gegründet. Im Vergleich zu Gusseisen oder Schmiedeeisen ist Zement ein sehr junges Material und hat sich in einer stürmischen Entwicklung zum wichtigsten Konstruktionsbaustoff auf der Erde entwickelt.

Schon früh begann man dem Zement andere gebrannte Erden beizumischen. Neben vulkanischen Aschegesteinen sind die wichtigsten Beimengungen Schlacken oder Abfallstoffe aus der Stahlherstellung (Hüttensand) und Aschen aus Kohlekraftwerken (Flugaschen). Aber es gibt auch Beimischungen aus Aschen von verbranntem Reisstroh, gemahlene Gesteinen wie Trass, Schiefer, Kalkstein, Metakaolin sowie Reststoffe aus der Metallindustrie wie z. B. Silikastaub und vieles mehr.

Zement ist ein industriell hergestelltes Massenprodukt, bei dem große Werke Millionen Tonnen Bindemittel pro Jahr produzieren. Man kann Zement lokal herstellen, lange lagern, im Silozug transportieren und über Druckluftleitungen



Abbildung 1: Nistertal Viaduct, erbaut 1911, innerhalb von 6 Monaten

in Silos einblasen. Standardzement kostet im Baumarkt etwa 0,10 € pro kg. Organische Bindemittel wie z. B. Pattex Kraftkleber Classic mit Preisen von über 9 € pro kg sind deutlich teurer. Darüber hinaus sind Kleber auf Kunststoffbasis brennbar und es ist unbekannt, ob diese Kleber 100 Jahre oder deutlich länger halten. Eigenschaften, welche jede Bauaufsicht und jeder Anwender von zementgebundenen Baustoffen wertschätzen.

Zement ist ein graues Pulver. Beton entsteht erst, wenn der Zement mit Sand, Kies und Wasser vermischt wird. Schon früh wurde deutlich, dass die Festigkeit des Endproduktes von allen Bestandteilen und vom genauen Rezept abhängt. Auch heute wird bei der Rezepturenentwicklung immer das Endprodukt geprüft. Es ist nicht möglich, aus den Einzeleigenschaften der Bestandteile die Endigenschaften ausreichend genau vorherzusagen.

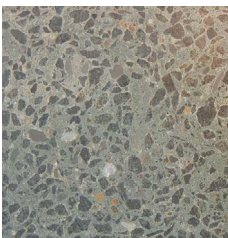


Abbildung 2: Schnitt durch Beton

Tabelle 1: Einfache Betonrezeptur

Einsatzstoff	Anteil	Einwaage	Volumen
Zement	14 %	320 kg	103 Liter
Wasser	8 %	177 kg	177 Liter
Luftporen			15 Liter
Gesteine	78 %	1.861 kg	705 Liter
Gesamt	100 %	2.358 kg	1.000 Liter

Die Art der Gesteinskörnungen beeinflusst die Festigkeit, die Dauerhaftigkeit, den E-Modul, die Brandbeständigkeit und vieles mehr. Die Gesteinskörnungen sollten fester sein als der sie umbindende Zementleim, die Zementmatrix. Während dies bei einem normalfesten Beton gegeben ist, weist der hier behandelte hochfeste und ultrahochfeste Beton immer ein kombiniertes Versagen mit Bruchlinien quer durch die Gesteinskörnungen auf.

Die zugegebenen Gesteinskörnungen benötigen eine Größenabstufung der Körner, eine festgelegte Sieblinie. Je dichter die Gesteinskörner, desto weniger Bindemittel benötigt man und die Festigkeit erhöht sich. Diese mathematische Optimierung der Sieblinie ist keineswegs trivial und theoretisch bis heute noch nicht befriedigend gelöst. Die praktische Relevanz ist nicht gravierend, da man aus Kostengründen immer lokal verfügbare Gesteinskörnungen verwendet und das Rezept an diese anpasst.

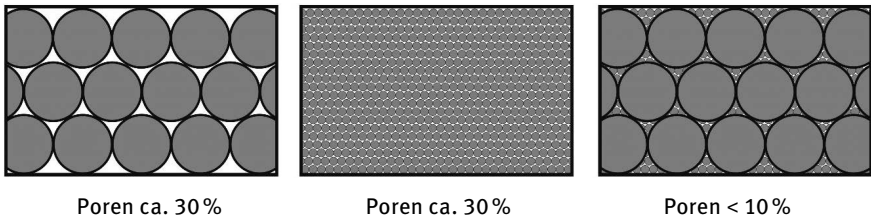


Abbildung 3: Prinzip der Sieblinienoptimierung

Das Wasser in der Mischung hat zwei Funktionen. Es wird eine Menge von ca. 25 % des Zementgewichtes als chemischer Reaktionspartner des Zementes benötigt. Das obige Rezept enthält allerdings 55 % des Zementgewichtes an Wasser. Die verbleibenden 97 Liter Wassers werden nicht als Reaktionspartner, sondern als Fließmittel benötigt, damit die Mischung kein erdtrockener Haufen, sondern eine gießbare Masse wird. Dieses Überschusswasser verdunstet später (Austrocknen des Betons) und hinterlässt dabei Poren. Zusammen mit den Verdichtungsporen verringern diese Kapillarporen die Festigkeit, Dichtigkeit und Beständigkeit deutlich. Die Festigkeit des Betons hängt in erster Linie vom Verhältniswert Wasser zu Zement, dem sogenannten W/Z-Wert ab und weniger von der Menge und Güte des verwendeten Bindemittels.

Um einen niedrigen W/Z-Wert zu erreichen, werden zur Verflüssigung der Mischung anstatt des preiswerten Wassers chemische Produkte eingesetzt. Die wichtigste Gruppe sind Fließmittel, mit denen die Verflüssigung (rheologischen Eigenschaften) gesteuert wird. Speziell mit der Wirkstoffgruppe der Polycarbo-lylate kann man Beton mit einem W/Z-Wert von unter 0,3 herstellen. Bei diesen

Hochleistungsbetonen reagiert das Zementkorn nur noch an seiner Oberseite. Geschätzte 70% des Zementpartikels verbleiben als nicht reagierte, industriell hergestellte hochfeste, sehr feine Gesteinskörnungen in der Mischung. Gleichzeitig kann die Mischung aber selbstentlüftend, selbstverdichtend und nahezu selbstnivellierend eingestellt werden, sodass ohne zusätzliche maschinelle Verdichtung („Rütteln“) auch in komplexen Geometrien ein porenfreies Volumen erzielt wird.

2.2 Entwicklung von zementgebundenem Beton im Maschinenbau

Rudolf-Georg Nicklau hat in einem Fortschrittsbericht des VDI „Werkzeugmaschinengestelle aus Methacrylatharzbeton“ [1] einen Überblick über die geschichtliche Entwicklung von Maschinengestellen aus Gusseisen, Schweißkonstruktionen und Zementbetonen zusammengestellt. Der nachfolgende Absatz ist seiner Dissertation aus dem Jahre 1985 entnommen.

„Der Krieg ist der Vater aller Dinge. So hat schon im Ersten Weltkrieg der Ingenieur Georg Schlesinger [2] versucht, im Jahre 1917 Gusseisen für Werkzeugmaschinengestelle durch zementgebundenen Beton zu substituieren. Aufgrund des hohen Verschleißes konnte sich die Technik nicht durchsetzen. Ein erneuter Versuch wurde 1939 zu Beginn des Zweiten Weltkrieges versucht. Dort erkannte man schon, dass Gestelle aus massivem Material ein besseres dynamisches Verhalten als Gestelle aus Gusseisen aufwiesen. Ab 1940 wurden Werkzeugmaschinegestelle aus Zementbeton in größerem Umfang gefertigt, konnten sich aber nach dem Krieg nicht wirklich durchsetzen.“

Zeitgleich wurde im Schiffsbau versucht, den kriegswichtigen Stahl durch zementgebundenen Beton zu substituieren. Dyckerhoff war im Zweiten Weltkrieg an einem Unternehmen beteiligt, welches zwischen 50 und 200 Schiffe aus Zementbeton herstellte [3]. Diese Idee des schwimmenden Betons fasziniert Menschen bis heute. So gibt es in Deutschland mehrere öffentlich geförderte Forschungsvorhaben, die sich mit dem Bau von Pontons für unterschiedlichste Zwecke beschäftigen [4]. Eine der erfolgreichsten Marketingmaßnahmen der deutschen Zementindustrie ist die alle zwei Jahre stattfindende Betonkanuregatta, bei der Teams aus Universitätsstudenten in den Kategorien Geschwindigkeit und Design/Konstruktion gegeneinander antreten.

In den 80er Jahren begann die damalige Firma VDF Böhringer (heutige MAG IAS GmbH) mit dem Einsatz von Betonmaschinenstellen in größerem Maßstab. Diese Bauteile haben noch keine Funktionsflächen, sondern dienen als eine Art Tisch, auf den ein gusseiserner Block aufgeklebt wird. Der verwendete Beton