

Bericht

Auftraggeber:	durcrete GmbH
Auftrag:	Beeinflussung der Steifigkeiten bei massiven Maschinenbetten
ProjektNr.:	185058
Ersteller:	durcrete GmbH Dr.-Ing. Bernhard Sagmeister Am Renngraben 7 65549 Limburg
Datum:	25. Juni 2018
Seitenzahl:	1 bis 6

1. Veranlassung

Zielsetzung bei der Konstruktion eines Maschinenbettes für Dreh-, Fräs- und Schleifmaschinen ist die Erzielung einer maximalen Steifigkeit und somit das Erreichen minimalen Verformungen. Die Freiheit des Konstrukteurs wird dabei durch vorgegeben Begrenzungen bei Geometrie, Gewicht und Kosten beschränkt.

Bei Naturstein kann lediglich die Gesteinsart und die Geometrie variiert werden. Bei gegossenen massiven Materialien wie epoxidharzgebundenen Mineralguss oder zementgebundenen Ultra High Performance Concrete (UHPC) können auch Stahleinlagen zur Steuerung der Steifigkeit verwendet werden.

Nachfolgend werden am Beispiel eines typischen Maschinenbettes verschiedene Konstruktionsarten berechnet und quantitativ bewertet.

2. Was ist Steifigkeit?

Der für die Durchbiegung eines Bauteils charakteristische Wert ist die Biegesteifigkeit

$$E \times I \quad [\text{z.B. in MNm}^2].$$

E [MN/m²] ist dabei der E-Modul, eine Materialkonstante welche angibt, welche Kraft man benötigt um das Material um einen bestimmten Längenwert zusammenzudrücken.

I [m⁴] ist das Flächenträgheitsmoment oder das Flächenmoment zweiten Grades, das sich aus der Geometrie des Querschnittes ergibt.

Tabelle 1: Statischer E-Module für massive Gestellwerkstoffe

Material	E-Modul in MN/m ² = N/mm ² = MPa
Nanodur Beton E80	80.000
Nanodur Beton E45 (Standard)	45.000
Vergussmasse durfill 60	32.000
Andere zementgebundene Vergussmassen	35.000 – 60.000
Naturhartgestein Granit	90.000 – 120.000
Epoxidharzgebundener Mineralguss	30.000 – 45.000
Baustahl S355 (St52) oder S235 (St37)	210.000
Bewehrung Betonstahl B500	200.000

3. Bewehrung im Bauwesen

Das Eingießen von speziellen Stahleinlagen in Beton ist im Bauwesen durch Normen und Vorschriften geregelter Standard. Der dahinterstehende Gedankengang zielt jedoch nur auf die Tragfähigkeit ab. Durch die Inkaufnahme von gerissenen Querschnitten wird die Steifigkeit infolge des Einsatzes von Bewehrung deutlich gemindert.

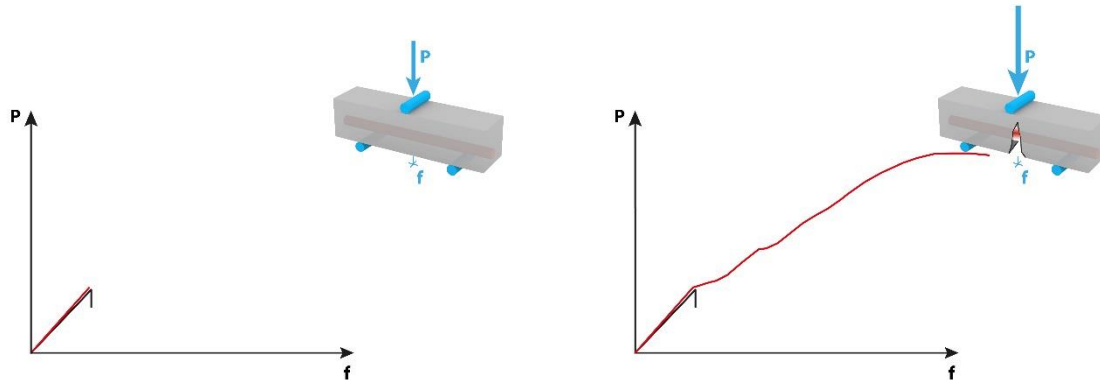


Bild 1: Kraft-Verformungsdiagramm a) ungerissener und b) gerissener Querschnitt

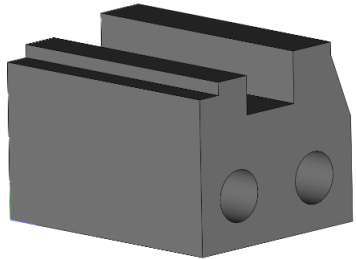
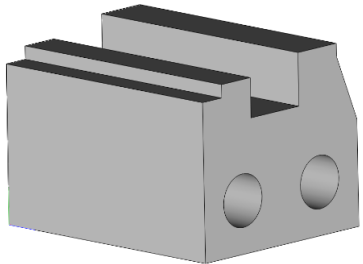
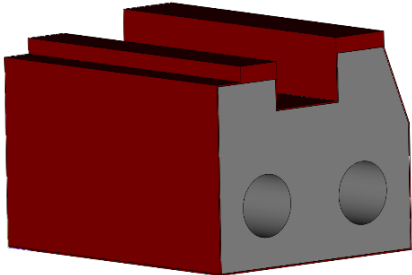
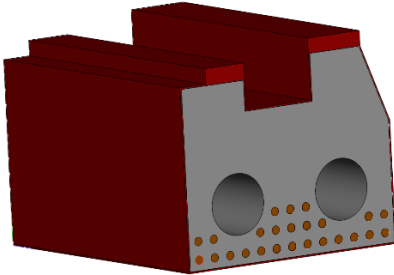
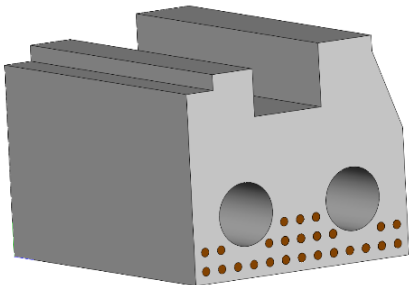
Nach Überschreiten der Zugfestigkeit des Betons reißt der Querschnitt. Bei der Bemessung wird berücksichtigt, dass die Bewehrung den Riss überbrückt. Der Stahl wird bei weiterer Laststeigerung bis zum Fließen beansprucht und es entsteht ein großer innerer Hebelarm zwischen dem plastifizierenden Zugglied und der kleinen Betondruckzone am oberen Rand. Damit können sehr hohe Lasten abgetragen werden und es stellt sich ein duktileres Verhalten mit Vorankündigung des Versagens ein. Der Preis hierfür ist ein hochgradig nichtlineares Verformungsverhalten mit einem sich ständig erweiternden Riss und weicher werdenden Querschnitt.

Eine Bemessung nach dem linken Bild 1a wäre im Bauwesen höchst unwirtschaftlich. Die Dehnungen von gerippten Stabstahl und Beton sind wegen des vollständigen Verbundes gleich groß. Bei einem Beton mit einem E-Modul von 35.000 MN/m^2 und einer Spannung von 5 MN/m^2 an der Unterseite liegt im unten angeordneten Bewehrungsstab eine Spannung von circa $\sigma = 5 \times 200.000 / 35.000 = 28,6 \text{ MN/m}^2$ vor. Ein Betonstahl B500A mit einer charakteristischen Zugfestigkeit f_t von 525 MN/m^2 wird bei weitem nicht ausgenutzt.

4. Stahleinlagen im Maschinenbau

Nachfolgend werden massive Querschnitt im ungerissenen Zustand untersucht. Dies entspricht einem linear elastischen Verhalten oder der Gültigkeit des Hookeschen Gesetzes. Die äußere Geometrie mit $b = 800 \text{ mm}$, $h = 700 \text{ mm}$ ist gleichbleibend. Die Querschnittsfläche $A = 0,412 \text{ m}^2$ und das Flächenträgheitsmoment $I = 0,01474 \text{ m}^4$ ist bei allen Querschnitten identisch.

Tabelle 2: untersuchte Querschnitte mit $b=800\text{mm}$ und $h = 700\text{mm}$

Nr.	Beschreibung	Bild
1	Naturstein mit $E= 95.000 \text{ MN/m}^2$	
2	Nanodur Beton E45 mit $E = 45.000 \text{ MN/m}^2$	
3	Verbundkonstruktion mit 5mm Blech und oberseitig 50mm Leisten aus S355, $E\text{-Modul Beton} = 37.000 \text{ MN/m}^2$	
4	Verbundkonstruktion wie Nr. 3, jedoch zusätzlich 26 Bewehrungsstäbe $\varnothing 28\text{mm}$ B500A dies entspricht einem zusätzlichen Stahlgewicht von ca. 125 kg/lfdm	
5	Nanodur Beton E80 mit $E = 80.000 \text{ MN/m}^2$ und zusätzlich 26 Bewehrungsstäbe $\varnothing 28\text{mm}$ B500A dies entspricht einem zusätzlichen Stahlgewicht von ca. 125 kg/lfdm	

Zu den Konstruktionen nach Zeile 2 ist anzumerken, dass große einbetonierte Stahlleisten z.B. als Befestigung für Linearführungen die Steifigkeit nicht erhöhen. Sowohl bei epoxidharzgebundenem als auch bei zementgebundenem Mineralguss schrumpft der Werkstoff beim Aushärten. Um Risse infolge Zwang im frühen Alter zu vermeiden, werden die Stahlleisten deshalb regelmäßig mit einem kleinen Spalt gestoßen. Dadurch leisten sie bei langen Maschinenbetten nur einen geringen Beitrag zur Gesamtsteifigkeit. Wenn man den Steifigkeitsbeitrag der Stahlleisten nutzen will, müssen diese nachträglich aufgeklebt werden.

Bei der Verbundkonstruktion nach Zeile 3 und 4 ist darauf zu achten, dass zwischen Beton und Stahl in der Berechnung ein 100% Verbund angenommen wurde. Hierfür reicht es nicht aus, dass durch den Quelldruck der Verfüllmasse Haftung vorhanden ist. Entscheidend ist die Aufnahme der Schubkraft zwischen den beiden Materialien, welches durch Schubnocken oder anderen Verbindungsmitteln gewährleistet werden muss. Eine Haftung wie bei einem Magneten auf einer öligen Platte reicht nicht aus, das aneinander Vorbeigleiten der beiden Oberflächen muss zuverlässig verhindert werden. Die jeweiligen Spannungsverteilung und die Verschiebung am Balkenende zeigt die nachfolgende FEM-Berechnung am Beispiel eines Kragarmes.

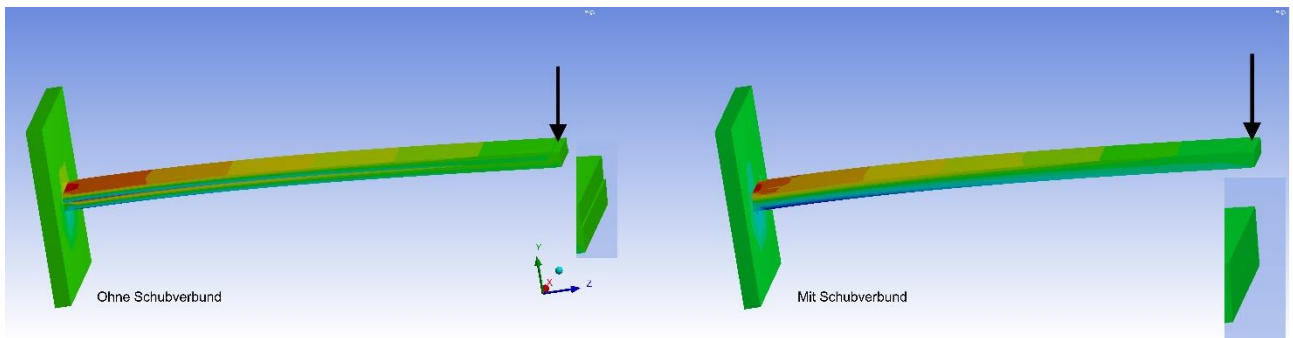


Bild 2: Kragarmberechnung mit a) zweiteiligem und b) einteiligem Querschnitt



Bild 3: Beispiel für Schubverbund

Die Berechnung der Querschnittswerte kann auf einfache Weise händisch oder auch mit kostenfreien Softwareprogrammen wie z. B. nach [2] durchgeführt werden.

Tabelle 3: Ergebnisse der Berechnung

Nr.	Material	E x A in MN	E x I in MN/m ²	E x I	Max. M in MNm ²	Max. M
1	Naturstein E = 95.000	39.155 MN	1.401 MN/m ²	100 %	0,227 MNm ²	100 %
2	Nanodur Beton E45 E = 45.000	18.547 MN	663 MN/m ²	47 %	0,227 MN/m ²	100 %
3	Baustahl und Beton mit E = 37.000	20.734 MN	986 MN/m ²	70 %	0,360 MN/m ²	159 %
4	Baustahl, Betonstahl und Beton mit E = 37.000	23.143 MN	1.171 MN/m ²	84 %	0,485 MN/m ²	214 %
5	Nanodur Beton E80 E = 80.000 und Betonstahl	34.820 MN	1.286 MN/m ²	92 %	0,260 MN/m ²	115 %

Das aufnehmbare Moment M wurde bei einer einheitlich angenommenen Randspannung des massiven Materials (Beton oder Naturstein) von $\sigma = 5 \text{ N/mm}$ errechnet.

Um mit der Konstruktion aus Zeile 2 die gleiche Steifigkeit wie bei Zeile 3 zu erreichen, müsste der Querschnitt um 120 mm auf $h = 820 \text{ mm}$ erhöht werden.

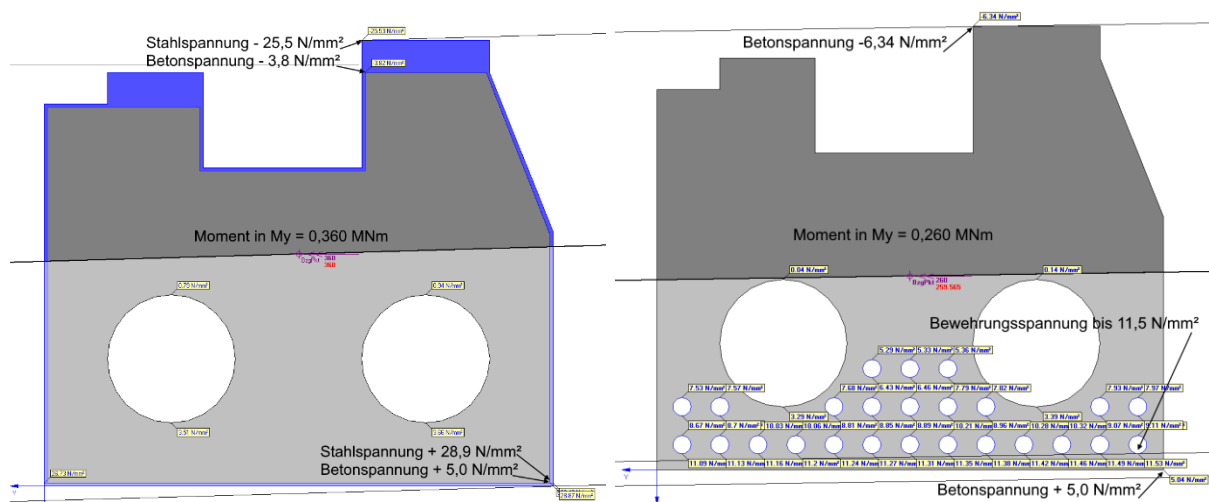


Bild 4: Spannungsverteilung System Nr. 3 (links) und System Nr. 5 (rechts)

5. Literatur

[1] Bernhard Sagmeister „Maschinenbauteile aus zementgebundenem Beton“ DIN, Beuth-Verlag Berlin, 2017, ISBN 978-3-410-27186-4

[2] Programm INCA2 des Institutes für Massivbau der TU Hamburg-Harburg, Ersteller Dr.-Ing. Uwe Pfeiffer. Die Lizenzierung/Registrierung ist auch bei kommerzieller Nutzung kostenlos.