

# **BEMESSUNG VON BODENKONSTRUKTIONEN**

## **Resttragverhalten von Entkopplungssystemen**

## 1 Vorwort

Entkopplungen werden vielfach zum Ausgleich von Verformungsdifferenzen zwischen Belag und Lastverteilungsschicht eingesetzt. Entkopplungssysteme können parallel zur Belagfläche ein unterschiedliches Verformungsverhalten (Bild 1) aufweisen.

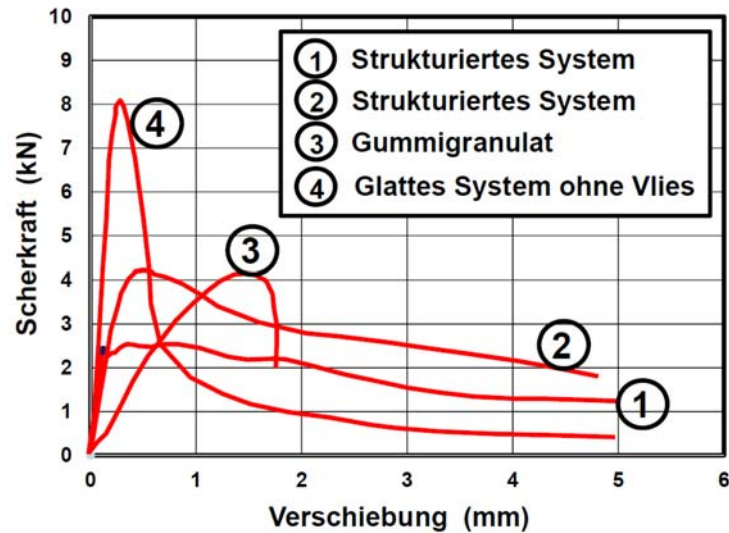


Bild 1: horizontale Verschiebungswiderstände Entkopplungen

Glatte Entkopplungssysteme (4) weisen ein lineares Tragverhalten auf. Nach dem Überschreiten der Scherfestigkeit löst sich der Verbund und es können keine Scherkräfte mehr aufgenommen werden. Systeme mit schallentkoppelnder Wirkung (3) weisen ein nichtlineares Verhalten auf. Dies zeigt sich im Neigungswechsel der Last-Weg-Kurve. Bei einer Scherkraft, bei der der Neigungswechsel stattfindet, ergeben sich Strukturänderungen innerhalb des Systems, die bei einer Entlastung sich nicht mehr zurückbilden. Strukturierte Systeme (1) (2) weisen ein nichtlineares Verhalten auf. Nach dem Überschreiten einer Grenzscherspannung weisen diese ein Verformungsverhalten ähnlich dem Fließen von Stahl auf. Da die Verformungsdifferenz zwischen Belag und Lastverteilungsschicht vielfach größer als die Verformung beim Erreichen der Grenzscherspannung ist, liegt es nahe, dieses „Fließen“ von Entkopplungssystemen technisch zu nutzen.

An ausgewählten Beispielen wird aufgezeigt, ob ein „Fließen“ von Entkopplungssystemen wirksam nutzbar ist.

## 2 Verformungsverhalten von Bodenkonstruktionen

Eine Bodenkonstruktion (Bild 2) besteht aus der Lastverteilungsschicht, dem Mörtel- bzw. Entkopplungssystem und dem Belag.



Bild 2: Aufbau Bodenkonstruktion

Zum Zeitpunkt der Erstellung der Bodenkonstruktion haben die unterschiedlichen technischen Eigenschaften der jeweiligen Bauteile keinen Einfluss auf die Beanspruchung der Konstruktion. Erhöht sich jedoch die Temperatur der Bodenkonstruktion, so führen die unterschiedlichen Temperaturendeckungskoeffizienten der einzelnen Bauteile zur Systembeanspruchungen in Form von Druck und Zugspannungen, die zum Versagen der Bodenkonstruktion führen können. Bei einer Erhöhung der Temperatur der Bodenkonstruktion (Bild 2) ist die Verformung der Lastverteilungsschicht größer als die des Belages.

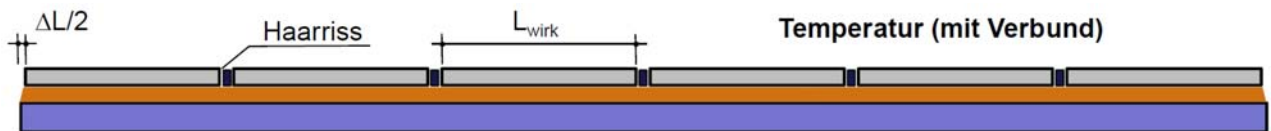


Bild 3: Verformung Bodenkonstruktion

Dies führt dazu, dass der Belag auf Zug beansprucht wird. Diese Zugspannungen können durch Bildung von Haarrissen in den Fugen reduziert werden.

Ergibt sich ein Schwinden der Lastverteilungsschicht (Bild 4), so wird der Belag auf Druck und die Lastverteilungsschicht auf Zug beansprucht.

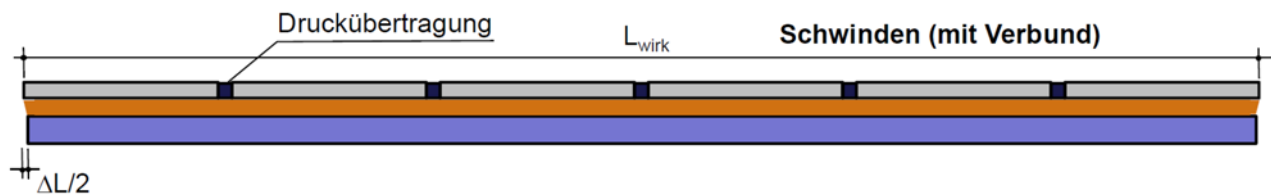


Bild 4: Verformung Bodenkonstruktion

Durch die Druckfestigkeit des Fugenmörtels entfällt die entkoppelnde Wirkung der Mörtelfugen. Hierdurch ergibt sich technisch die Wirkung eines über die Lastverteilungsschicht durchgehenden Belages.

### 3 Kennlinien Entkopplungen

Grundlage für die Bemessung der Beläge sind die Scher- und Drucksteifigkeit des Verlegemörtels bzw. der Entkopplung auf der Basis des Merkblattes Nr. 7 der Deutschen Natursteinakademie ([www.denak.de](http://www.denak.de)) „Ermittlung der technischen Eigenschaften von Entkopplungen“

Kennlinien von Entkopplungssystemen, die auf der Basis des Merkblattes Nr. 7 ermittelt wurden, sind in Bild 5 dargestellt. Zu erkennen sind Verformungslinien mit nichtlinearem Verhalten. Dies bedeutet, dass ab einer Grenzlast sich die Neigung der Verformungslinie ändert. Ab der Grenzlast erfolgt eine Schädigung des Verbundes. Bei einer Entlastung des Entkopplungssystems, das oberhalb der Grenzlast belastet wurde, geht das Entkopplungssystem nicht mehr in seine Ursprungslage zurück. Bei einer Beanspruchung in einer Richtung, wie diese beim Schwinden von Lastverteilungsschichten auftritt, muss eine Nutzung des Resttragverhaltens (Fließbereich) kein Nachteil darstellen.

Aus der Grenzlast und der Größe der Scherfläche ergibt sich die Grenzscherspannung, ab der das Entkopplungssystem in den Fließbereich übergeht.

Um den Fließbereich eines Entkopplungssystems nutzen zu können müssen die Scherspannungen in der Bodenkonstruktion die Grenzscherspannung überschreiten. Aus diesem Grunde ist die Ermittlung der Scherspannungen erforderlich, um eine Beurteilung des Entkopplungssystems vornehmen zu können.

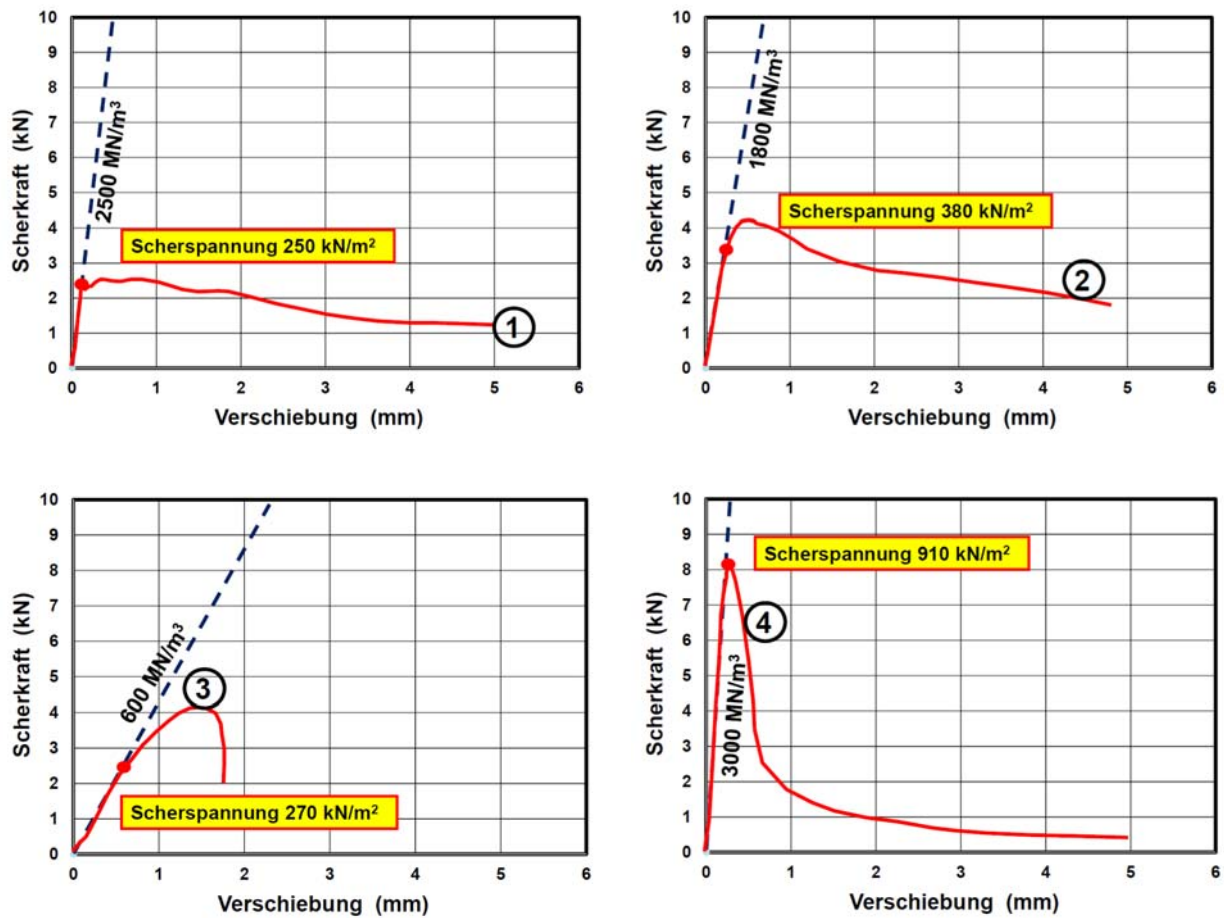


Bild 5: horizontale Bettungsziffer und Grenzscherspannungen

Die Nutzung des Fließbereichs des Entkopplungssystems und die Ermittlung der Beanspruchung von Belag und Lastverteilungsschicht sind rechnerisch aufwendig und erfordern eine iterative Berechnung.

Eine qualitative Beurteilung des Entkopplungssystems auf der Basis des möglichen Verschiebeweges ist nicht möglich.

## 4 Ermittlung Scherspannungen

### 4.1 Verbundkonstruktion

Bodenkonstruktionen, bestehend aus Lastverteilungsschicht, Mörtel und Belag stellen Verbundkonstruktionen dar. Differenzverformungen (Bild 6) der Materialien infolge Temperatur und Schwinden von Baustoffen führen bei Verbundkonstruktionen zu Spannungen in den jeweiligen Schichten der Konstruktion.

Die Differenzverformung zwischen Belag und Lastverteilungsschicht wird bei einer Verbundkonstruktion durch die Verformung der einzelnen Bauteile aufgenommen. Die Summe der Verformungen der jeweiligen Bauteile entspricht der Differenzverformung der Bauteile ohne Verbund.

Die Verteilung der Differenzverformung auf die einzelnen Bauteile ist abhängig von der Steifigkeit der Bauteile. Eine große Steifigkeit der Lastverteilungsschicht führt zu einer höheren Beanspruchung des Belages. Steife Beläge führen zu einer höheren Beanspruchung der Lastverteilungsschicht. Bei einem starren Untergrund wird die Differenzverformung alleine durch die Verformung des Belages aufgenommen.

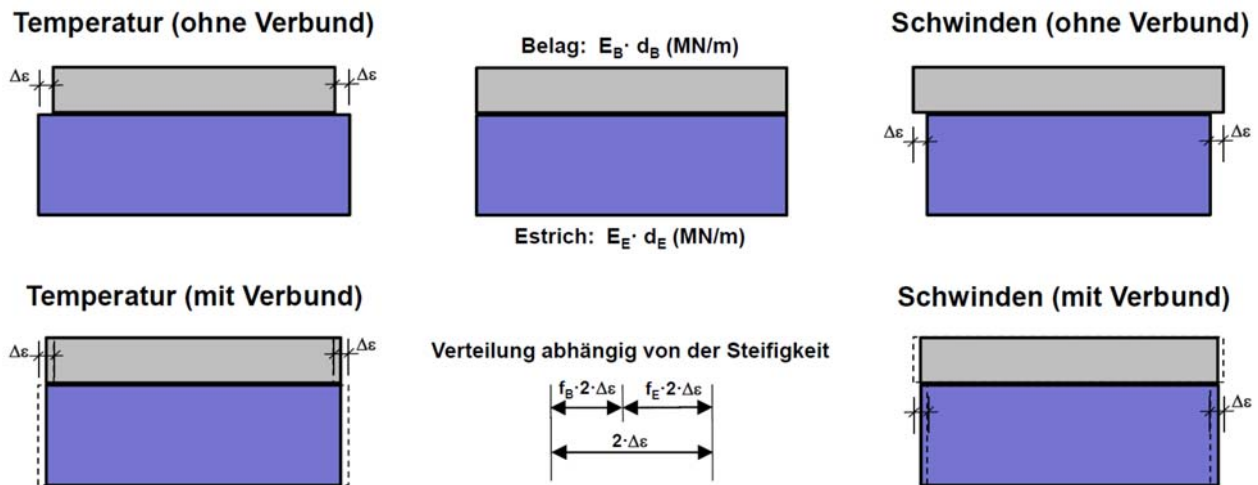


Bild 6: Verbundquerschnitt

**4.2 Ersatzelastizitätsmodul**

Zur Vereinfachung der Berechnung der Spannungen aus Differenzverformungen kann die Nachgiebigkeit der Lastverteilungsschicht durch die Ermittlung eines Ersatzelastizitätsmoduls für den Belag berücksichtigt werden. Der Ersatzelastizitätsmodul für den Belag kann nach folgender Beziehung ermittelt werden.

$$E^* = \frac{d_E \cdot E_E}{d_B \cdot E_B + d_E \cdot E_E} \cdot E_B \tag{1}$$

$$= f_B \cdot E_B$$

- $d_B$  (m) Belagdicke
- $d_E$  (m) Dicke Lastverteilungsschicht (Estrich bzw. Hohlboden)
- $E_B$  (MN/m<sup>2</sup>) Elastizitätsmodul Belag
- $E_E$  (MN/m<sup>2</sup>) Elastizitätsmodul Lastverteilungsschicht
- $f_B$  (/) Reduktionsfaktor Elastizitätsmodul Belag
- $f_E$  (/) Reduktionsfaktor Elastizitätsmodul Estrich
- $E^*$  (MN/m<sup>2</sup>) Ersatzelastizitätsmodul

Der Faktor  $f_B$  kann mit Hilfe von Bild 7 ermittelt werden. Für die Lastverteilungsschicht kann der Faktor zur Bestimmung des Ersatzelastizitätsmodul mit folgendem Faktor ermittelt werden.

$$f_E = 1 - f_B \tag{2}$$

Die Druck- bzw. Zugspannung im Belag ohne Entkopplungssystem ermittelt sich nach folgender Beziehung:

$$\sigma_{B,Z} = E^* \cdot \frac{\Delta \epsilon}{1000} \tag{3}$$

- $\sigma_{B,Z}$  (N/mm<sup>2</sup>) Zwängungsspannung im Belag ohne Entkopplung
- $f_R$  (/) Reduktionsfaktor
- $\Delta \epsilon$  (mm/m) Verformungsdifferenz

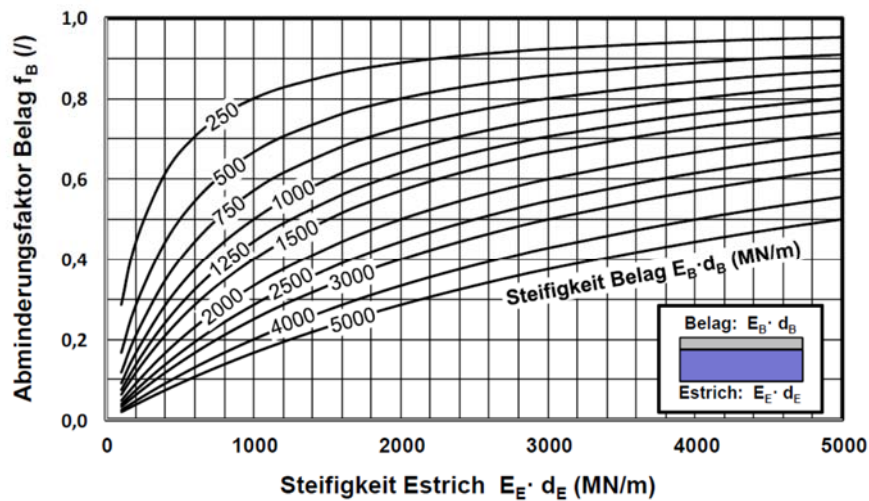


Bild 7: Verformungsanteil Belag

**4.3 Scherspannungen**

Die Möglichkeit der Nutzung der Resttragfähigkeit kann über die Kenntnis der Scherspannung in der Bodenkonstruktion beurteilt werden. Die Scherspannung kann mit Hilfe der Bilder 8 und 9 ermittelt werden. Aus den Bildern ist ersichtlich, dass die Scherspannung bei 4 m und 8 mm Länge der Lastverteilungsschicht sich nur bei geringen Bettungsziffern geringfügig unterscheiden.

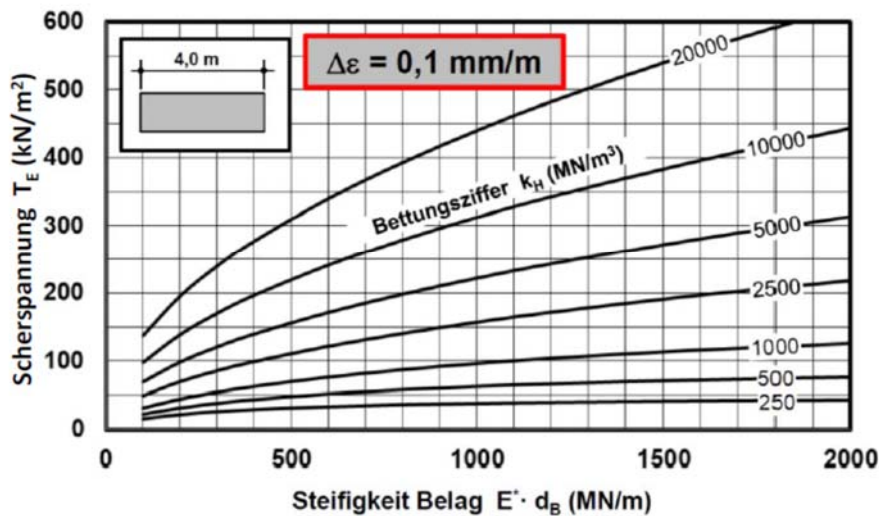


Bild 8: Einheitsscherspannung Konstruktionslänge 4,0 m

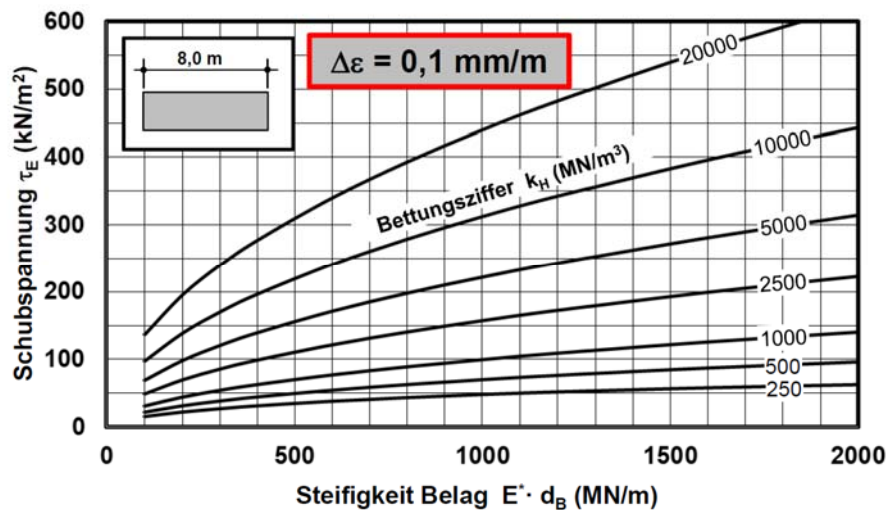


Bild 9: Einheitsscherspannung Konstruktionslänge 8,0 m

Mit Hilfe der Einheitsscherspannung kann die Scherspannung des Mörtelsystems bzw. des Entkopplungssystems ermittelt werden.

$$\tau = \tau_E \cdot \frac{\Delta\varepsilon}{0,1} \tag{4}$$

- $\tau$  (kN/m<sup>2</sup>) Scherspannung
- $\tau_E$  (kN/m<sup>2</sup>) Einheitsscherspannung
- $\Delta\varepsilon$  (mm/m) Differenzschwindmaß zwischen Belag und Estrich

## 5 Nutzung des Resttragverhaltens von Entkopplungen

### 5.1 Beispiele

Die mögliche Nutzung des Resttragverhaltens (Fließen) von Entkopplungssystemen wird an Beispielen aufgezeigt. Es folgt eine Variation von Lastverteilungsschicht, Belagsteifigkeit und Entkopplungssystem.

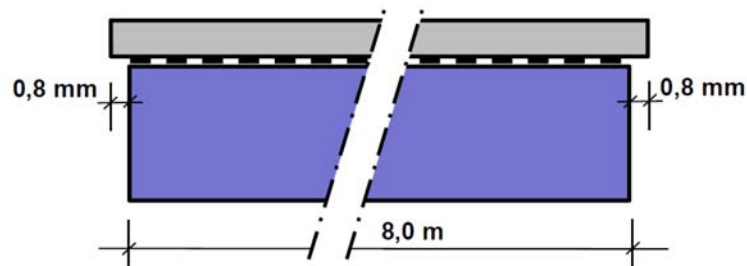


Bild 10: Längenänderung Estrichlänge 8,0 m

Um in den Bereich des Fließens der Entkopplung zukommen wird eine Lastverteilungsschicht mit einer Länge von 8,0 m gewählt. Es wird ein Schwindmaß der Lastverteilungsschicht von 0,2 mm/m angenommen.

### 5.2 Feinsteinzeug auf Estrich

Technische Daten Bodenkonstruktion:

- Belagdicke: 8 mm
- Elastizitätsmodul Belag: 70000 N/mm<sup>2</sup>
- Bettungsziffer Entkopplung: 1800 MN/m<sup>3</sup>
- Grenzscherspannung: 380 kN/m<sup>2</sup>
- Estrichdicke: 60 mm
- Elastizitätsmodul Estrich: 20000 N/mm<sup>2</sup>
- Schwinden Estrich: 0,2 mm/m

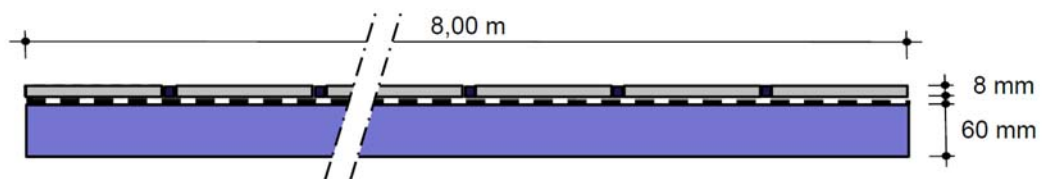


Bild 11: System

Steifigkeit Belag:  $E_B \cdot d_B = 70000 \cdot 0,008 = 560 \text{ MN/m}$

Steifigkeit Estrich:  $E_E \cdot d_E = 20000 \cdot 0,06 = 1200 \text{ MN/m}$

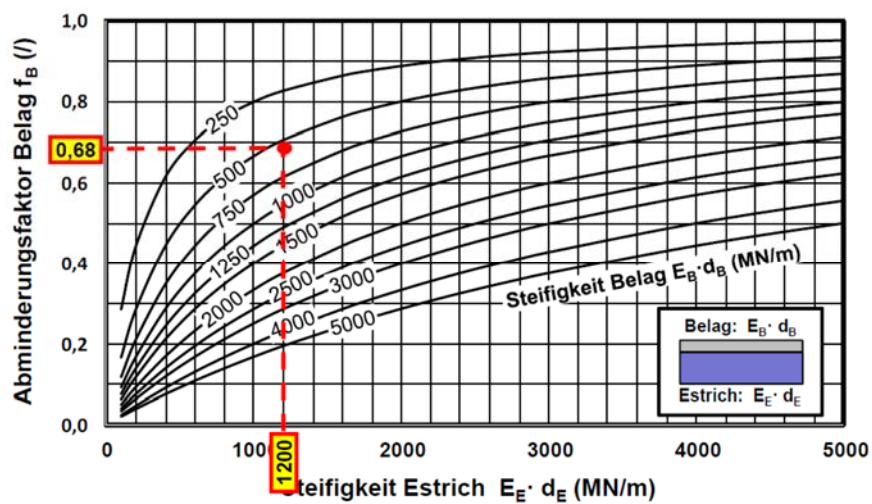


Bild 12: Verformungsanteil Belag

Ersatzelastizitätsmodul Belag:  $E^* = f_B \cdot E_B = 0,68 \cdot 70000 = 47600 \text{ N/mm}^2$

Ersatzsteifigkeit Belag:  $E^* \cdot d_B = 47600 \cdot 0,008 = 380 \text{ MN/m}$



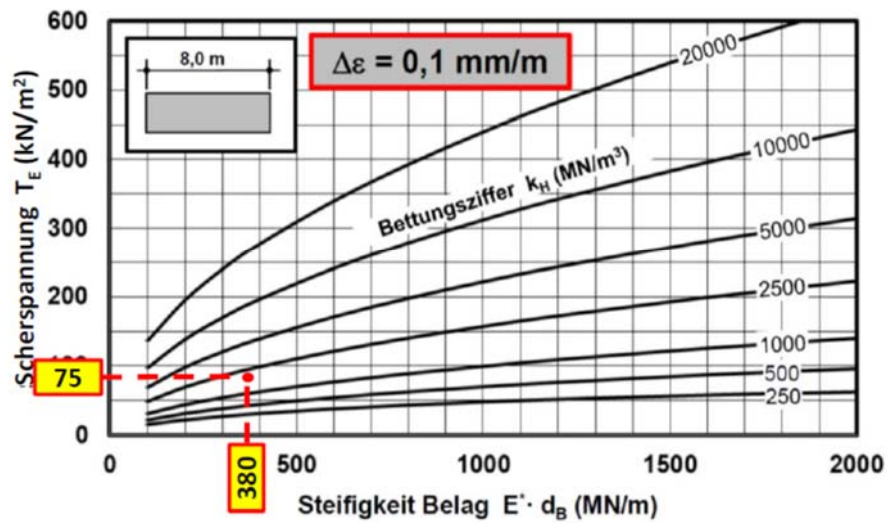


Bild 13: Einheitsscherspannung

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_E \cdot \frac{\Delta \epsilon}{0,1} \\ &= 75 \cdot \frac{0,2}{0,1} \\ &= 150 \text{ kN/m}^2 \\ &< 380 \text{ kN/m}^2 \text{ (Grenzscherspannung System ②) } \end{aligned}$$

Das Resttragverhalten des Entkopplungssystems kann nicht genutzt werden, da die Grenzscherspannung nicht überschritten wird.

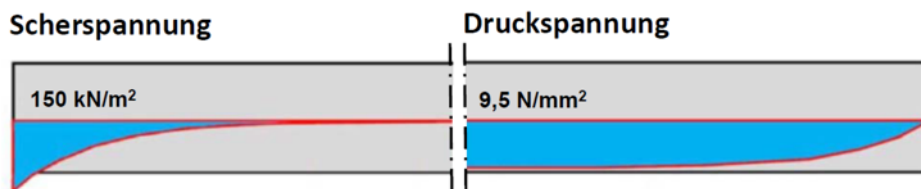


Bild 14: Verlauf Scher- und Druckspannung

$$\begin{aligned} \sigma_{B,Z} &= E^* \cdot \frac{\Delta \epsilon}{1000} = 47600 \cdot \frac{0,2}{1000} \\ &= 9,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (Spannung ohne Entkopplung) } \end{aligned}$$

Der Vergleich der Spannungen im Belag mit und ohne Entkopplungssystem zeigt, dass eine entkoppelnde Wirkung nicht nachgewiesen kann.

### 5.3 Naturwerkstein auf Hohlboden

Technische Daten Bodenkonstruktion:

- Belagdicke: 20 mm
- Elastizitätsmodul Belag: 80000 N/mm<sup>2</sup>
- Bettungsziffer Entkopplung: 5000 MN/m<sup>3</sup> (Kleber C2, 10 mm)
- Grenzscherspannung: >550 kN/m<sup>2</sup>
- Hohlbodendicke: 40 mm
- Elastizitätsmodul Estrich: 8000 N/mm<sup>2</sup>
- Schwinden Hohlboden: 0,2 mm/m

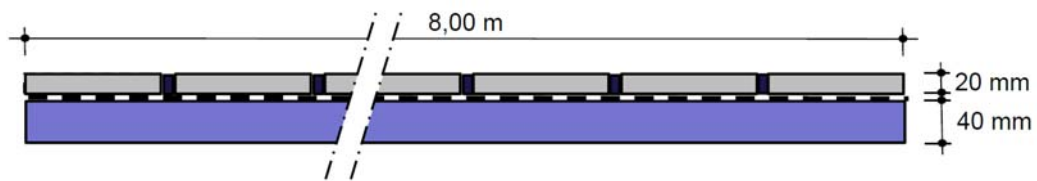


Bild 15: System zur Ermittlung der Bruchlast

Steifigkeit Belag:  $E_B \cdot d_B = 80000 \cdot 0,02 = 1600 \text{ MN/m}$

Steifigkeit Estrich:  $E_E \cdot d_E = 8000 \cdot 0,04 = 320 \text{ MN/m}$

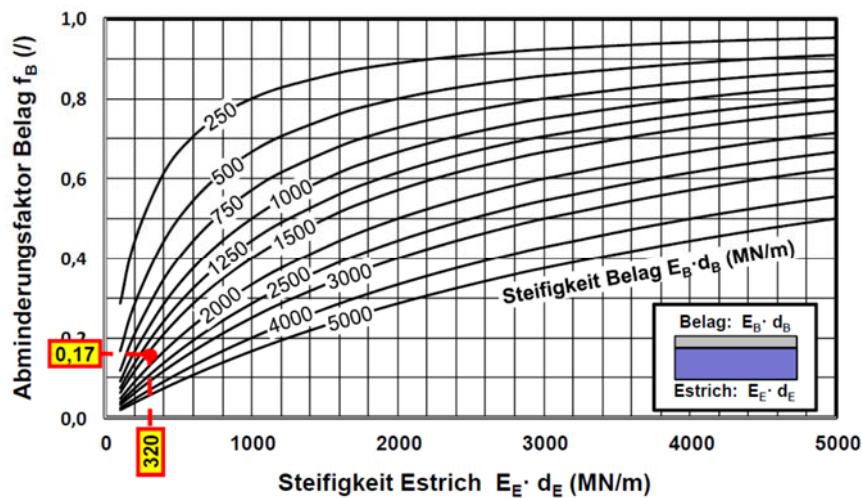


Bild 16: Verformungsanteil Belag

Ersatzelastizitätsmodul Belag:  $E^* = f_B \cdot E_B = 0,17 \cdot 80000 = 13600 \text{ N/mm}^2$

Ersatzsteifigkeit Belag:  $E^* \cdot d_B = 13600 \cdot 0,008 = 109 \text{ MN/m}$

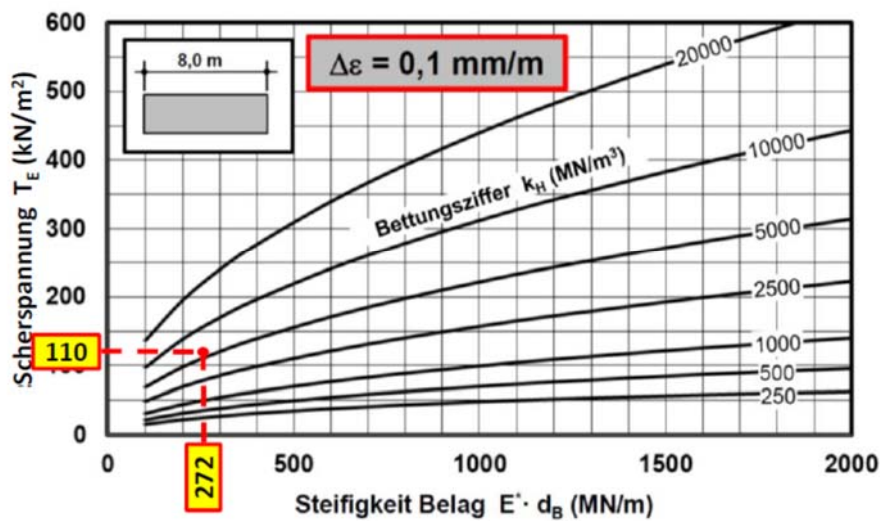


Bild 17: Einheitsscherspannung

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_E \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{0,1} \\ &= 110 \cdot \frac{0,2}{0,1} \\ &= 220 \text{ kN/m}^2 \\ &< 550 \text{ kN/m}^2 \text{ (Grenzscherspannung Kleber C2)} \end{aligned}$$

Die Grenzscherspannung wird nicht überschritten.

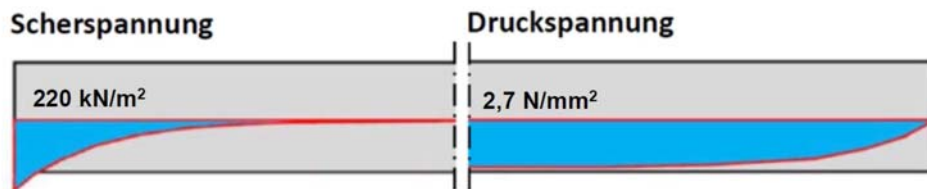


Bild 18: Verlauf Scher- und Druckspannung

$$\begin{aligned} \sigma_{B,Z} &= E^* \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{1000} = 13600 \cdot \frac{0,2}{1000} \\ &= 2,7 \text{ N/mm}^2 \text{ (Spannung ohne Entkopplung)} \end{aligned}$$

#### 5.4 Naturwerkstein auf Estrich

Technische Daten Bodenkonstruktion:

- Belagdicke: 20 mm
- Elastizitätsmodul Belag: 90000 N/mm<sup>2</sup>
- Bettungsziffer Entkopplung: 600 MN/m<sup>3</sup>
- Grenzscherspannung: 270 kN/m<sup>2</sup>
- Estrichdicke: 80 mm
- Elastizitätsmodul Estrich: 20000 N/mm<sup>2</sup>
- Schwinden Estrich: 0,2 mm/m

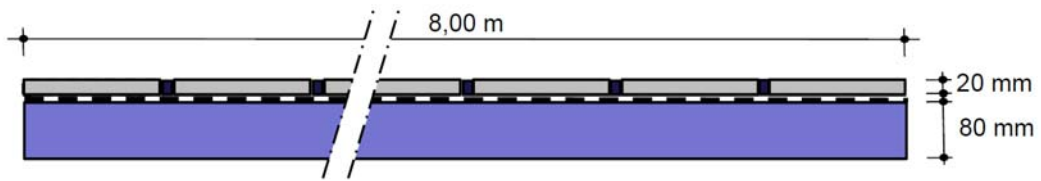


Bild 19: System

Steifigkeit Belag:  $E_B \cdot d_B = 90000 \cdot 0,02 = 1800 \text{ MN/m}$

Steifigkeit Estrich:  $E_E \cdot d_E = 20000 \cdot 0,08 = 1600 \text{ MN/m}$

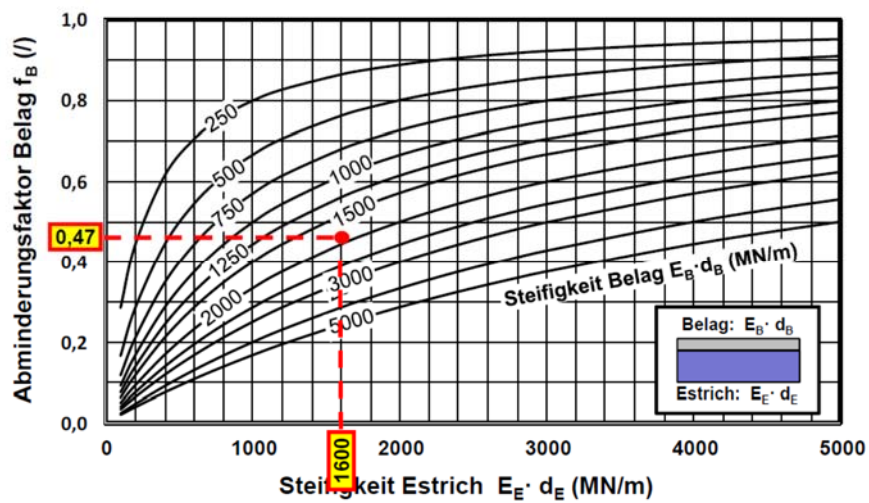


Bild 20: Verformungsanteil Belag

Ersatzelastizitätsmodul Belag:  $E^* = f_B \cdot E_B = 0,47 \cdot 90000 = 42300 \text{ N/mm}^2$

Ersatzsteifigkeit Belag:  $E^* \cdot d_B = 42300 \cdot 0,02 = 846 \text{ MN/m}$

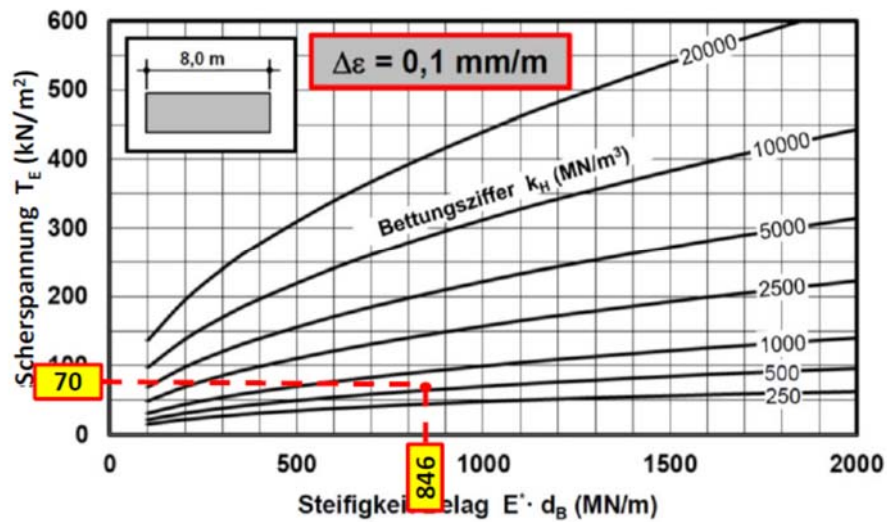


Bild 21: Einheitsscherspannung

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_E \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{0,1} \\ &= 70 \cdot \frac{0,2}{0,1} \\ &= 140 \text{ kN/m}^2 \\ &< 270 \text{ kN/m}^2 \text{ (Grenzscherspannung System ③ )} \end{aligned}$$

Das Resttragverhalten des Entkopplungssystems kann nicht genutzt werden, da die Grenzscherspannung nicht überschritten wird.

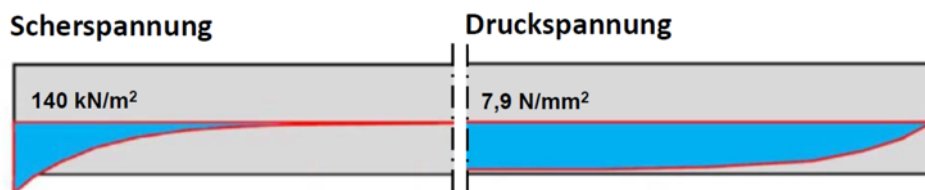


Bild 22: Verlauf Scher- und Druckspannung

$$\begin{aligned} \sigma_{B,Z} &= E^* \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{1000} = 42300 \cdot \frac{0,2}{1000} \\ &= 8,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (Spannung ohne Entkopplung)} \end{aligned}$$

Der Vergleich der Spannungen im Belag mit und ohne Entkopplungssystem zeigt, dass eine entkoppelnde Wirkung weniger als 7% beträgt und anwendungstechnisch keine Bedeutung hat.

**5.5 Feinsteinzeug auf Stahlbetondecke**

Technische Daten Bodenkonstruktion:

- Belagdicke: 8 mm
- Elastizitätsmodul Belag: 60000 N/mm<sup>2</sup>
- Bettungsziffer Entkopplung: 2500 MN/m<sup>3</sup>
- Grenzscherspannung: 250 kN/m<sup>2</sup>
- Stahlbetondicke: 180 mm
- Elastizitätsmodul Stahlbeton: 27800 N/mm<sup>2</sup>
- Schwinden Stahlbeton: 0,2 mm/m

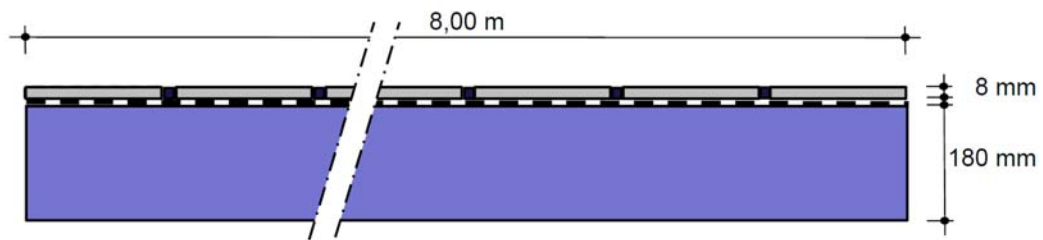


Bild 23: System

Steifigkeit Belag:  $E_B \cdot d_B = 60000 \cdot 0,008 = 480 \text{ MN/m}$

Steifigkeit Stahlbeton:  $E_E \cdot d_E = 27800 \cdot 0,18 \approx 5000 \text{ MN/m}$

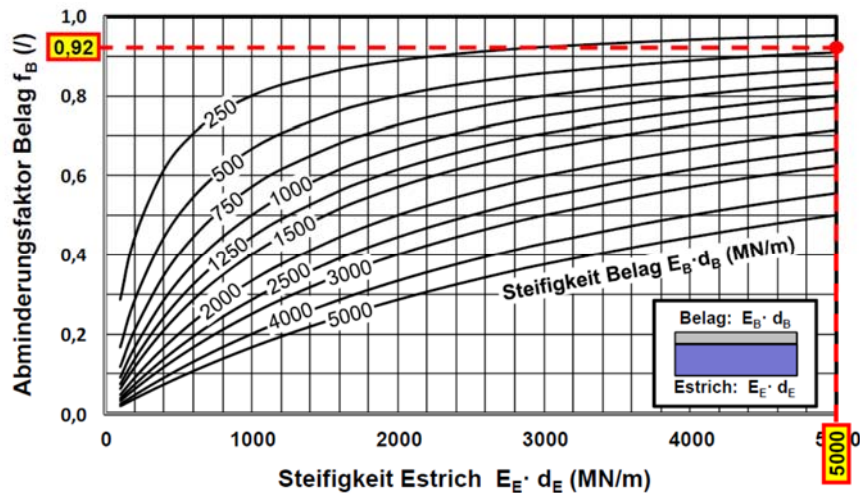


Bild 24: Verformungsanteil Belag

Ersatzelastizitätsmodul Belag:  $E^* = f_B \cdot E_B = 0,92 \cdot 60000 = 55200 \text{ N/mm}^2$

Ersatzsteifigkeit Belag:  $E^* \cdot d_B = 55200 \cdot 0,008 = 442 \text{ MN/m}$

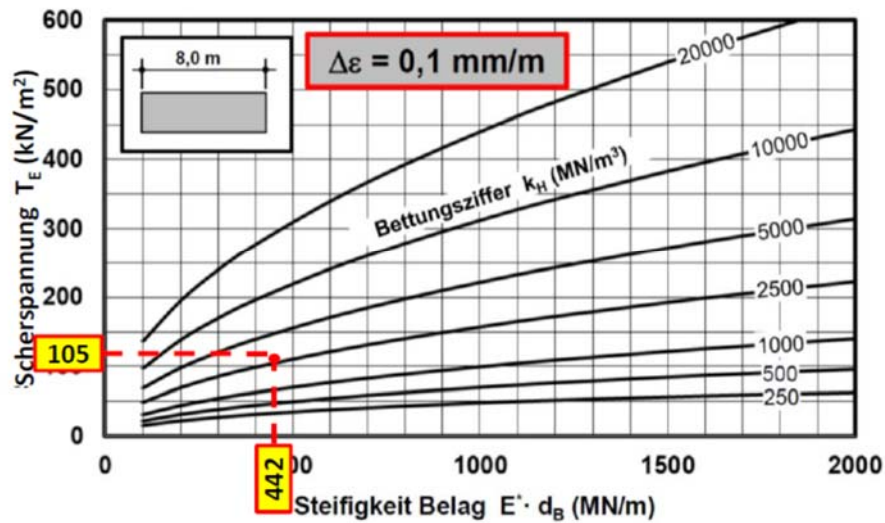


Bild 25: Einheitsscherspannung

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_E \cdot \frac{\Delta \epsilon}{0,1} \\ &= 105 \cdot \frac{0,2}{0,1} \\ &= 210 \text{ kN/m}^2 \\ &< 250 \text{ kN/m}^2 \text{ (Grenzscherspannung System ①) } \end{aligned}$$

Das Resttragverhalten des Entkopplungssystems kann nicht genutzt werden, da die Grenzscherspannung nicht überschritten wird.

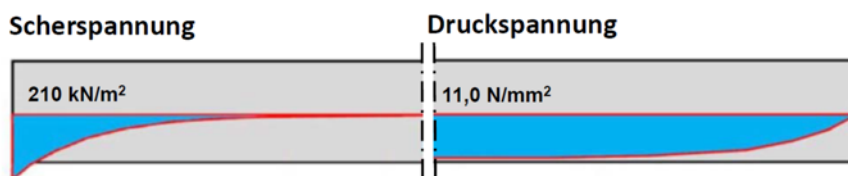


Bild 26: Verlauf Scher- und Druckspannung

$$\begin{aligned} \sigma_{B,Z} &= E^* \cdot \frac{\Delta \epsilon}{1000} = 55200 \cdot \frac{0,2}{1000} \\ &= 11,0 \text{ N/mm}^2 \text{ (Spannung ohne Entkopplung) } \end{aligned}$$

Der Vergleich der Spannungen im Belag mit und ohne Entkopplungssystem zeigt, dass eine entkoppelnde Wirkung nicht nachgewiesen kann.

**5.6 Naturwerkstein auf Stahlbetondecke**

Technische Daten Bodenkonstruktion:

- Belagdicke: 30 mm
- Elastizitätsmodul Belag: 60000 N/mm<sup>2</sup>
- Bettungsziffer Entkopplung: 2500 MN/m<sup>3</sup>
- Grenzscherspannung: 250 kN/m<sup>2</sup>
- Stahlbetondicke: 180 mm
- Elastizitätsmodul Stahlbeton: 27800 N/mm<sup>2</sup>
- Schwinden Stahlbeton: 0,2 mm/m

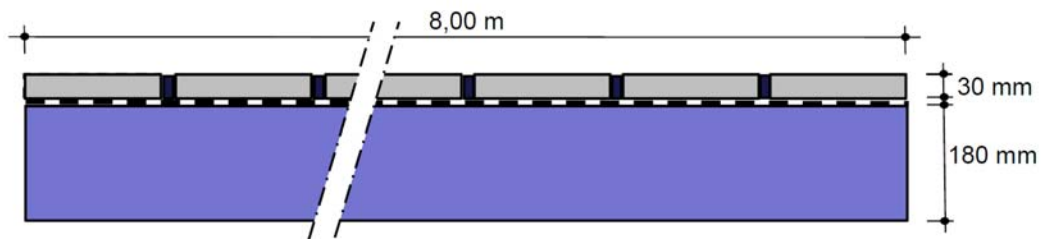


Bild 27: System

Steifigkeit Belag:  $E_B \cdot d_B = 60000 \cdot 0,03 = 1800 \text{ MN/m}$

Steifigkeit Stahlbeton:  $E_E \cdot d_E = 27800 \cdot 0,18 \approx 5000 \text{ MN/m}$

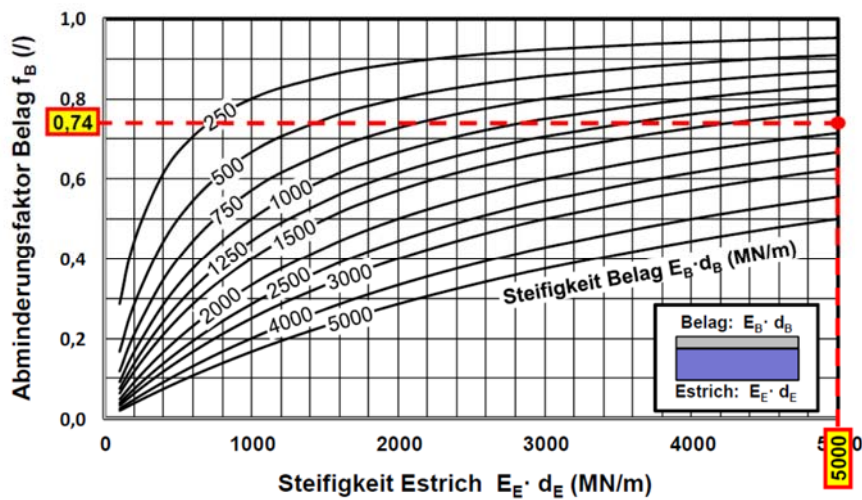


Bild 28: Verformungsanteil Belag

Ersatzelastizitätsmodul Belag:  $E^* = f_B \cdot E_B = 0,74 \cdot 60000 = 44400 \text{ N/mm}^2$

Ersatzsteifigkeit Belag:  $E^* \cdot d_B = 44400 \cdot 0,03 = 1332 \text{ MN/m}$



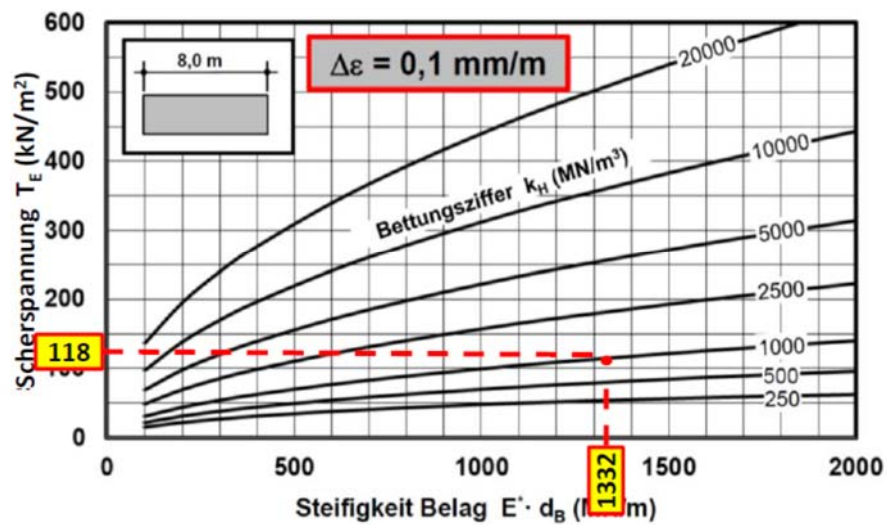


Bild 29: Einheitsscherspannung

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_E \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{0,1} \\ &= 180 \cdot \frac{0,2}{0,1} \\ &= 360 \text{ kN/m}^2 \\ &> 250 \text{ kN/m}^2 \text{ (Grenzscherspannung System ①)} \end{aligned}$$

Das Resttragverhalten des Entkopplungssystems kann genutzt werden, da die Grenzscherspannung überschritten wird.

Im Fließbereich des Entkopplungssystems variiert die wirksame Bettungsziffer zwischen 250 MN/m<sup>3</sup> und 2500 MN/m<sup>3</sup>.

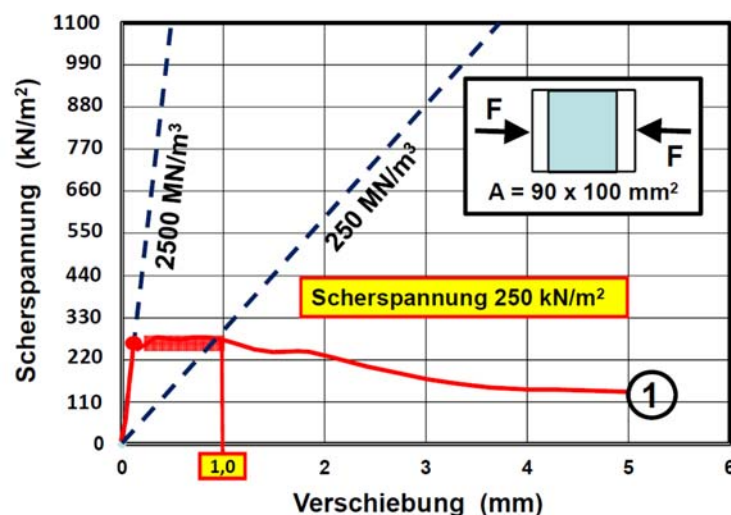


Bild 30: Fließbereich Entkopplungssystem

Die Berechnung der Beanspruchung des Belages erfolgt mit Hilfe einer FE-Berechnung. Um das Fließen des Entkopplungssystems abzubilden ist eine iterative Berechnung erforderlich. Die Berechnung erfolgt für unterschiedlich lange Fließbereiche. Die Länge des Fließbereiches kann mit Hilfe von Bild 31 für eine Grenzscherspannung von 250 kN/m<sup>2</sup> ermittelt werden.

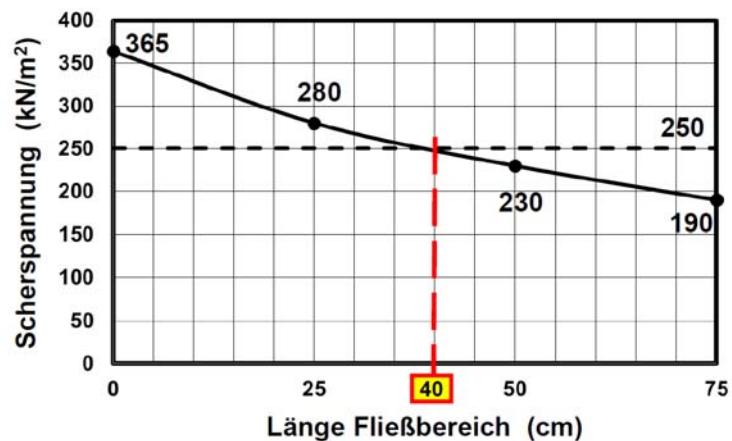


Bild 31: Iterative Ermittlung Fließbereich

Die Scher- und Druckspannungsverteilung ist in Bild 28 dargestellt. Es zeigt sich, dass das Resttragverhalten des Entkopplungssystems nicht genutzt werden kann.

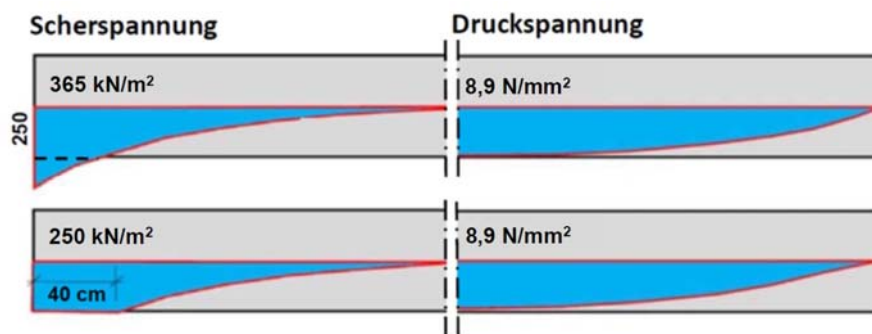


Bild 32: Verlauf Scher- und Druckspannung

$$\sigma_{B,Z} = E^* \cdot \frac{\Delta \epsilon}{1000} = 44400 \cdot \frac{0,2}{1000}$$

$$= 8,9 \text{ N/mm}^2 \text{ (Spannung ohne Entkopplung)}$$

Der Vergleich der Spannungen im Belag mit und ohne Entkopplungssystem zeigt, dass eine entkoppelnde Wirkung weniger als 2% beträgt und anwendungstechnisch keine Bedeutung hat.

## 6 Nutzung der Resttragfähigkeit von Entkopplungssystemen

Die Beispiele zeigen, dass bei den üblichen Bodenkonstruktionen die Grenzscherspannung nicht überschritten wird und somit die Resttragfähigkeit nicht genutzt werden kann. Bei sehr steifen schwindfähigen Lastverteilungsschichten kann zwar die Grenzscherspannung überschritten werden, das führt jedoch nicht zu einer wesentlichen Reduzierung der Beanspruchung der Bauteile der Bodenkonstruktion.