

# Verkehrsflächen in ungebundener Bauweise – Oberbaumechanik von mit Lkw befahrenen Pflasterflächen

Mit der rechnerischen Modellierung von Pflasterflächen wird ein erster Versuch unternommen, Ableitungen für die Praxis anhand relevanter Variablen zu schaffen. Die Modellrechnungen basieren auf klassischen und validen Ansätzen aus dem Erd- und Grundbau sowie der Halbraumtheorie. Den Berechnungen werden statische wie dynamische Kennwerte mit vertikalen und horizontalen Belastungen zugrunde gelegt. Auf Basis einer statischen Belastung wird das Grundbruchverhalten von Pflasterstraßen abhängig von verschiedenen Parametern geprüft. Dynamische Einflüsse wirken sich auf horizontale Verschiebungen in der Pflasterfläche aus.

## 1 Mechanische Beanspruchung

Pflasterdecken in befahrenen Verkehrsflächen werden in verschiedener Art und Weise durch Radlasten der Fahrzeuge beansprucht. Neben Vertikallasten handelt es sich hierbei auch um horizontale Kräfte bzw. Lasten, die aus

- Antrieb,
- Beschleunigung,
- Bremsen,
- Hangabtrieb infolge Längs- und Querneigung oder
- Kurvenfahrten (Zentrifugalkräfte)

resultieren.

Diese Kräfte müssen über den Pflasterbelag in die Bettung und die darunterliegende Trag- und Frostschicht eingeleitet werden, wobei es sich im Wesentlichen um dynamische Vorgänge handelt. Lediglich im Bereich von Kreuzungen, Ampeln und Parkplätzen/Abstellplätzen mit längeren Standzeiten spielen die stati-

schon Eigenschaften des Belages die maßgebliche Rolle.

Das kleinteilige, schubsteife Deckensystem aus Pflastersteinen muss unter dem Aspekt der Einwirkungszeit und der Häufigkeit der wiederkehrenden Belastungen betrachtet werden.

Beispielsweise wird bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 50 km/h bzw. 14 m/s bei einem Überrollvorgang ein Pflasterstein einer Oberfläche von 20/20 cm in 14 Millisekunden überfahren.

Die Überfahrzeit, bezogen auf die Anplattungsfläche, beträgt 24 Millisekunden.

In dieser geringen Zeitspanne (Impuls) kann sich kein Grundbruch im Sinne der klassischen Bodenmechanik ausbilden.

Tatsächlich haben wir es im Fahrverkehr oberbaumechanisch mit einer Vielzahl von kurzzeitigen periodischen/stochastischen immer wiederkehrenden Impulsen im Millisekundenbereich auf sehr kleine Bauelemente zu tun. Für

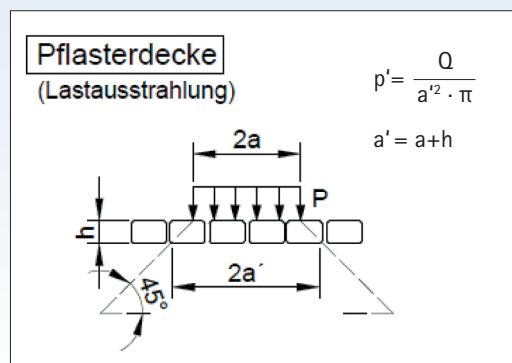


Bild 1: Lastausstrahlung einer Radlast auf einer Pflasterdecke

diese Art der Beanspruchung des ungebundenen Oberbaus sind dessen bodendynamische Kennwerte und auf Dauer die Anzahl der Impulse maßgeblich.

Die herangezogenen Kennwerte unterscheiden sich ganz erheblich von den relevanten Bodenkennwerten, wie sie bei statischer Beanspruchung zugrunde gelegt werden. So beträgt beispielsweise der dynamische E-Modul ein Mehrfaches des statischen. Ebenso verhält es sich beim dynamischen Schubmodul, der bei der Beurteilung kurzzeitiger Ein-

leitung horizontaler Kräfte maßgeblich ist.

Durch die Vielzahl von immer wiederkehrenden Belastungen kommt es zu einer Nachverdichtung (bei Spurverkehr zu Spurrinnenbildung) und schließlich bei unzureichender Steifigkeit der Bettung und Tragschicht zu einem „Grundbruch auf Raten“ mit leichter seitlicher Hochwölbung und Auflockerung des Oberbaus. Derartige Schadensbilder sind insbesondere zu erwarten, wenn der Oberbau nicht ausreichend dimensioniert bzw. mit Gesteins-

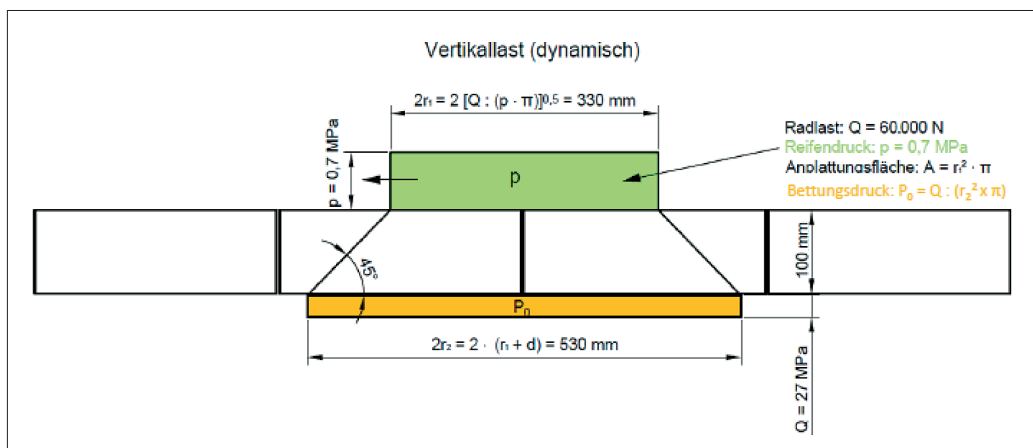


Bild 2: Lastverteilung unter vertikaler Radlast

### Verfasser

Dipl.-Ing. (FH)  
Wolfgang Donderer

Alexander Eichler

Obmann Technischer  
Ausschuss QS-Pflaster

Dipl.-Ing. Markus Gerigk

QS Pflaster e. V.  
D-63843 Niedernberg  
info@qspflaster.de  
www.qspflaster.de

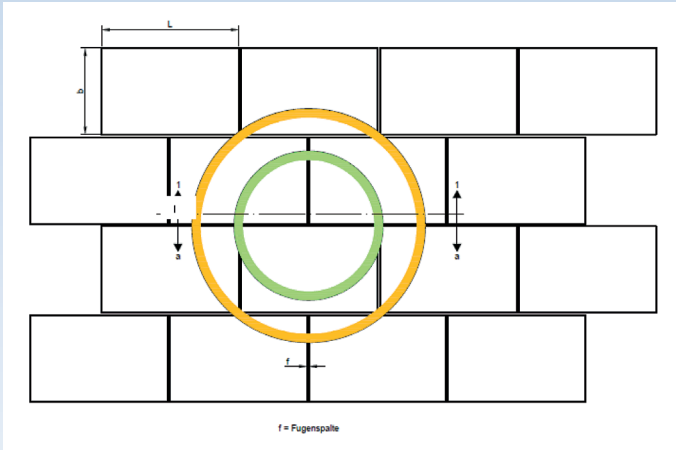


Bild 3: Lastverteilung unter vertikaler Radlast

körnungen aus Rundkorn ausgeführt wurde. Der Vergleich zeigt, dass der Reibungswinkel der eingesetzten Materialien einen maßgeblichen Einfluss auf die Stabilität des Oberbaus hat.

Zur Aktivierung des vollen Reibungswiderstandes sind naturgemäß ein Verschiebeweg und eine entsprechende Verschiebezeit erforderlich, die sich nach dessen Überwindung noch vergrößern. Um die Scherfestigkeit zwischen Pflaster und Bettung bzw. die Schubfestigkeit der ungebundenen Schichten des Oberbaus zu erreichen, bedarf es einer Verschiebezeit, die lediglich in der Endphase eines Bremsvorgangs erreicht wird. Hierbei ist zwischen Reibungswiderstand und Scherfestigkeit zu unterscheiden. Durch die Reibung wird die Reibungskraft auf der Oberfläche eines auf schubbeanspruchten, kegel-

stumpartigen Körpers – hier der ungebundene Oberbau – generiert. Dieser Kegelstumpf erfährt eine Schubverzerrung (Verzerrungswinkel = Schubspannung/ Schubmodul). Mit zunehmender Verzerrung erreicht die Schubspannung die Reibungskraft. Dabei wird die geringe Neigung der Vertikallast aus der Rollreibung ( $\mu = 0,05$ ) in den Berechnungen vernachlässigt.

Grundbruchberechnungen im Sinne von DIN 4017 bilden somit einerseits die tatsächlichen Verhältnisse bei der Beanspruchung aus Fahrverkehr nicht ab, da sie auf längeren Verformungszeiten fußen. Sie gelten allenfalls für den ruhenden Verkehr bei längeren Standzeiten. Andererseits können derartige Grundbruchberechnungen herangezogen werden, um die relativen Unterschiede der verschiedenen Oberbaukonstruktionen

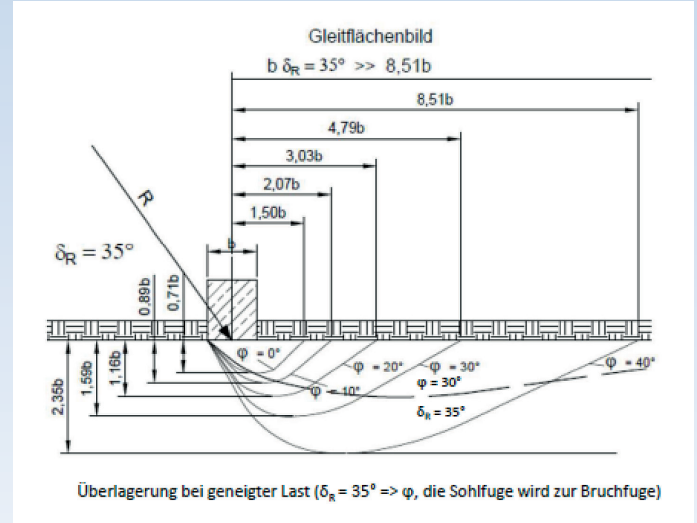


Bild 4: Gleitflächenbild „Grundbruch“ bei unterschiedlichen Reibungswinkeln phi

nen in Bezug auf ihre Verformbarkeit miteinander zu vergleichen.

## 2 Vertikale Beanspruchung

### 2.1 Ruhender Verkehr

Eine Grundbruchberechnung mit einer modifizierten Radlast von 60 kN zeigt Folgendes:

Bei einer Steindicke von 8 cm und einem Reifeninnendruck von 0,7 N/mm<sup>2</sup> ergibt sich bei einer radlastabhängigen Normalspannung von 319 kN/m<sup>2</sup> und einem mittleren Reibungswinkel phi = 35°, einer Betonwichte von 23 kN/m<sup>3</sup> und einer mittleren Bodenwichte von 20 kN/m<sup>3</sup> eine Grundbruchsicherheit von 0,8. Dieser Wert ist kleiner als 1,0 und wesentlich

kleiner als die erforderlichen Sicherheitsbeiwerte 1,5 bis 2,0. Das heißt, dass sich unter statischen Aspekten bei entsprechend langer Einwirkungsdauer (Standzeit der Fahrzeuge) grundbruchartige Verformungen ausprägen können.

Bei einem Bettungs- und Tragschichtmaterial höheren Reibungswinkels phi = 40°, wie es beispielsweise bei Schottertragschichten zu finden ist, erhöht sich die Grundbruchsicherheit bei sonst gleichen Verhältnissen auf 1,77 (> 1,5 < 2,0).

Bei Vergrößerung der Steindicke von 8 auf 12 cm, einem Reibungswinkel phi = 35° und sonst gleichen Verhältnissen erhöht sich die Grundbruchsicherheit auf 1,4. Sie ist damit immer noch kleiner als 1,5 bzw. 2,0.

Bei Einbau von 12 cm dicken Pflastersteinen und einem Reibungswinkel phi = 40° beträgt die Grundbruchsicherheit 3,1.

Die Einsenkung (Setzung) beträgt beispielsweise bei 10 cm dicken Pflastersteinen bei 50 mm Bettungsdicke ca. 0,2 mm, wenn man nur die Kompression der Bettung berücksichtigt. Aus Tabelle 3 ist sichtbar, dass bei zunehmender Bettungsdicke die Verformbarkeit des Systems zunimmt.

### 2.2 Dynamische Beanspruchung

Die dynamische Beanspruchung ist von vier maßgeblichen Kennwerten bestimmt, nämlich dem dynamischen Steifemodul und

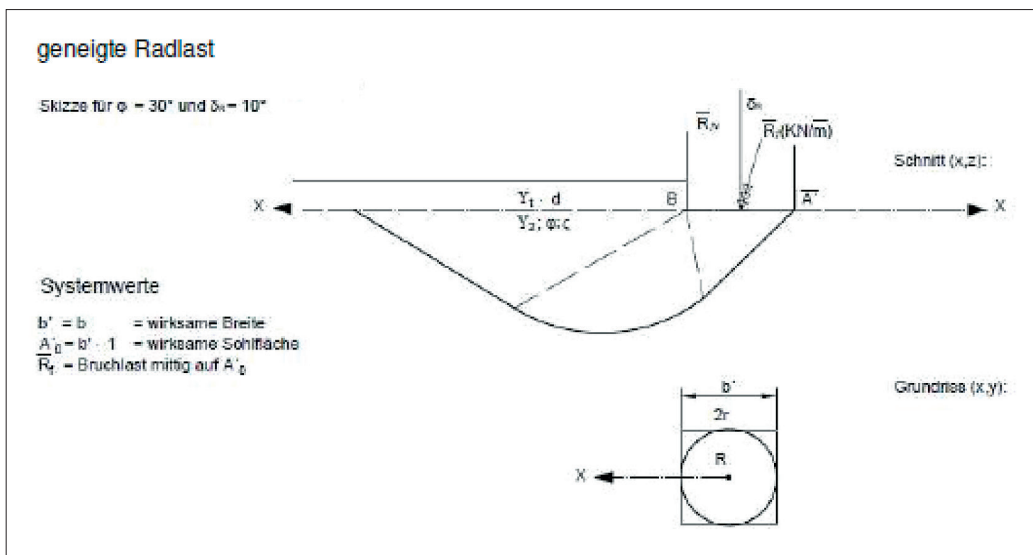


Bild 5: Gleitflächenbild „Grundbruch“ bei geringer Lastneigung  $\delta_R = 10^\circ$

Dicke der Pflastersteine	Grundbruchsicherheit
8 cm	0,80
10 cm	1,07
12 cm	1,40
14 cm	1,78

Tabelle 1: Grundbruchsicherheit in Abhängigkeit von der Pflastersteindicke bei einem Reibungswinkel  $\phi' = 35^\circ$  der Tragschicht

Dicke der Pflastersteine	Grundbruchsicherheit
8 cm	1,77
10 cm	2,36
12 cm	3,07
14 cm	3,90

Tabelle 2: Grundbruchsicherheit in Abhängigkeit von der Pflastersteindicke bei einem Reibungswinkel  $\phi' = 40^\circ$  der Tragschicht

Dicke der Bettung	Einsenkung in mm
6 cm	0,27
5 cm	0,23
4 cm	0,18
3 cm	0,14

Tabelle 3: Statische Einsenkung in Abhängigkeit von der Bettungsdicke

dem dynamischen Schubmodul aus der Bettung und der Tragschicht. Die Berechnung erfolgt unter anderem nach den Versuchen von Heukolom.

$E_{dyn}$  Bettung: 180 MPa  
 $E_{dyn}$  Tragschicht: 540 MPa  
 $G_{dyn}$  Bettung: 50 MPa  
 $G_{dyn}$  Tragschicht: 160 MPa.

Für die vertikale Belastung ist ersterer Wert, der dynamische Steifemodul, für die horizontale Verschiebung letzterer, nämlich der dynamische Schubmodul maßgeblich. Bei einer modifizierten Radlast von 60 kN ergibt sich

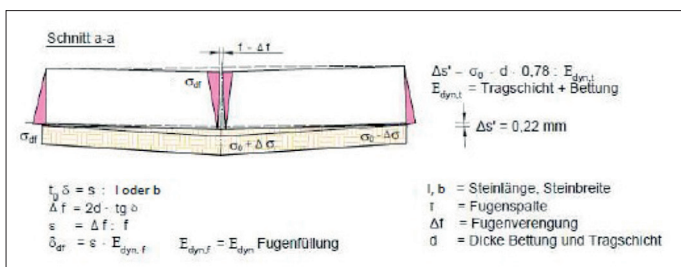


Bild 6: Impulsartige Pflasterverformung beim Überfahren

bei 10 cm dicken Pflastersteinen eine Normalspannung von 272 kN/m<sup>2</sup> bzw. 0,27 MPa.

Die hieraus ermittelte reversible/ elastische Einsenkung beträgt ca. 0,2 mm bzw. ca. 0,1 mm, wenn man lediglich den dynamischen Steifemodul der Bettungsschicht berücksichtigt und die Verformung der Tragschicht vernachlässigt.

Nun zeigen aber Versuche sowie auch diverse Messungen vor Ort, dass bei häufigen Überfahrten geringe plastische Verformungen auch bei fachgerecht ausgeführten Pflasterkonstruktionen auftreten können. Dies erklärt sich damit, dass durch die Vielzahl der Überrollungen die ungebundenen Oberbauschichten, insbesondere die Bettungsschicht, unvermeidlich nachverdichtet werden, wodurch sich zwar deren Steifigkeit etwas erhöht, aber auch bleibende Spurrinnen entstehen.

Dies könnte durch Plattendruckversuche und Spurrinnenmessungen unter Beweis gestellt werden. Wölben sich die Ränder der Spurrinnen nach oben aus, so kann dies ein Indiz für die Auflockerung infolge „Überverdichtung“ aus intensiver Verkehrseinwirkung sein. Die Ursache für vermeidbare Spurrinnenbildung liegt regelmäßig in unzureichender Steifigkeit der Unterlage und insbesondere in der weniger steifen Bettungsschicht begründet. Die Steifigkeit der Bettung ist neben der Kornzusammensetzung maßgeblich von der Intensität der Verdichtung der Pflasterdecke bestimmt.

### 2.3 Folgerungen

Wie aus der Praxis seit Langem bekannt, ist es zur Erhaltung der Gebrauchstauglichkeit von durch Lkw befahrenen Pflasterflächen erforderlich, dass die Oberbauschichten entsprechend steif mit

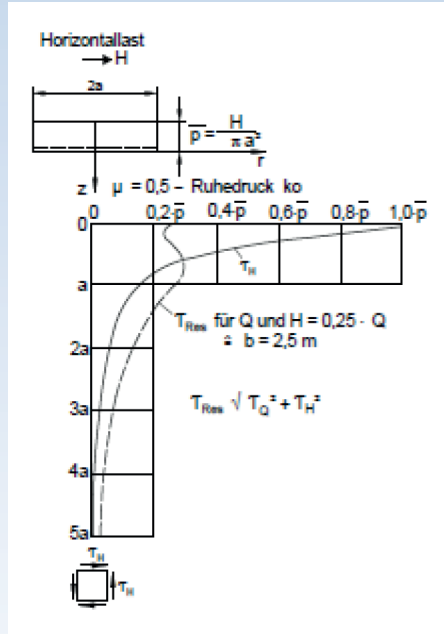


Bild 7: Spannungsverteilung längs der Achse im Halbraum infolge einer Horizontallast

hochwertigen Materialien ausgebildet werden. Dies geschieht in der Regel durch geeignete Tragschicht- und Bettungsmaterialien, welche hohe Reibungswinkel und günstige Kornzusammensetzungen

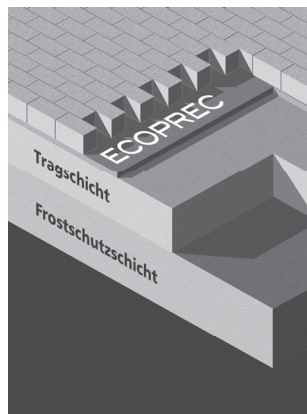
aufweisen. Eine ausreichende Verdichtung dieser Materialien und eine Überprüfung des Verdichtungserfolgs sind wichtige Grundsteine für eine „verformungsarme“ Pflasterdecke.

## ECOPREC®

FÜR STABILERE PFLASTERFLÄCHEN

### Bauverfahren mit speziellem Fugen- und Bettungsmaterial

- für die Sanierung von Betonpflasterflächen
- für den Neubau von hochbelasteten Verkehrsflächen



#### ECOPREC® bewirkt:

- bei Sanierung
  - weniger Lärm, Schmutz und Parkplatznot
  - weniger unzufriedene Geschäftsleute und Bürger
  - geringere Kosten
  - je nach Baumaßnahme deutliche Reduzierung der Bauzeit
- bei Neubau
  - hochbelastbare Pflasterflächen (Bus, LKW, ...)
- stabilere Pflasterflächen bei gebundenen und ungebundenen Bauweisen

www.sf-kooperation.de

SF-Kooperation

Der internationale Verbund führender Betonsteinhersteller



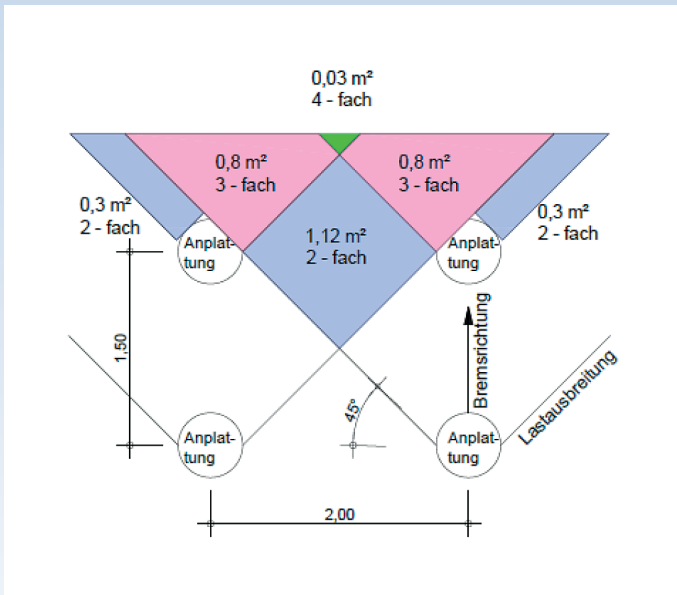


Bild 8: Lastabtragung von Horizontalkräften in vorgelagerte Pflasterbereiche

### 3 Horizontale Beanspruchung

Von den eingangs genannten horizontalen Belastungen ist die durch Vollbremsung initiierte entscheidend. Hier treten die größten Horizontalkräfte auf, welche letztendlich in die Bettung und Unterlage abgetragen werden müssen.

Dies gilt auch für Horizontalkräfte, die nicht unmittelbar unter der Radlast über die dort erzeugte Reibung in die Bettung und Unterlage eingeleitet werden.

Das heißt, auch wenn man unterstellt, dass Horizontalkräfte in die der Anplattungsfläche vorgelagerten Pflasterbereiche eingeleitet werden, so müssen auch diese Kräfte letztendlich durch das Pflastergewicht über die Reibung von der Unterlage aufgenommen werden.

#### 3.1 Lastabtragung unter statischer Betrachtungsweise

Bei Vollbremsung und einer Haftreibung  $\mu = 0,7$  ergibt sich eine Horizontalkraft von  $0,7 \times \text{Erdbeschleunigung} \times \text{Masse (Radlast)}$ . Die resultierende Kraft aus der vertikalen Last und der Horizontalkraft hat eine Neigung von  $\tan 0,7 = 35^\circ$ . Das heißt, der Reibungswinkel zwischen Pflasterunterseite und Bettung muss  $> 35^\circ$  betragen, um diese Hori-

zontalkraft in die Schichten des Oberbaus einleiten zu können.

Nach einschlägigen Literaturangaben beträgt der Reibungswinkel zwischen glattgeschalttem Beton (Stahlschalung) und Materialien wie Splitt- und Schottergemischen 0,8 des inneren Reibungswinkels des Bettungsmaterials.

Das bedeutet, dass das Bettungsmaterial einen Reibungswinkel von mindestens  $42^\circ$  aufweisen muss, damit die Horizontalkräfte unmittelbar ohne Sicherheitszuschlag in die Bettung eingeleitet werden können.

Eine sichere Einleitung von Horizontalkräften in die angrenzenden Pflasterflächen ist nicht nachweisbar, wenn man unterstellt, dass das Bettungsmaterial unter glattgeschalteten handelsüblichen Betonpflastersteinen einen Reibungswinkel von  $35^\circ$  ( $\tan 0,7$ ) hat. Das heißt, die Reibung zwischen Pflasterunterseite und Bettungssplitt beträgt  $0,7 \times 0,8 = 0,56$ . Die Resultierende hat einen Neigungswinkel  $\tan = 0,7$ . Die horizontale Differenzkraft, die von dem vorgelagerten Pflasterbelag aufgenommen werden soll, beträgt infolge  $0,7 - 0,56 = 0,14$  der Radlast.

Bei einer Betonrohddichte von  $23 \text{ kN/m}^3$  und einer Pflastersteindicke von 8 cm ist hierzu eine Fläche  $A = (0,14 \times 60) / (0,08 \times 23 \times 0,58) = \text{ca. } 8 \text{ qm}$  erforderlich, die trapezförmig dem gebremsten

Rad in Bremsrichtung vorgelagert sein muss. Dieses Trapez hat vor dem Rad eine Breite von ca. 0,5 m und bei einem Ausbreitungswinkel der Horizontalkraft von beispielsweise  $45^\circ$  im Halbverband eine Basis von 5,3 m sowie eine Länge von 2,4 m.

Bei einer Steinbreite von 0,2 m ergeben sich in Bremsrichtung bei Reihenpflaster 12 Steinreihen, die insgesamt keine starre Scheibe bilden, sondern allenfalls aus schubsteif miteinander verbundenen kleinen Einzelementen bestehen.

Die Fugenfüllung aus Fugensplitt/Fugensand hat keine über die gesamte Fugenhöhe gleichmäßige Steifigkeit. Es ist davon auszugehen, dass die Lagerungsdichte in den unteren Bereichen größer ist als in den oberen Bereichen. Nach Beobachtungen der Praxis zeigt sich, dass meist oben etwas Fugenmaterial fehlt, sodass die resultierende horizontale Kraftübertragungslinie von Stein zu Stein nach unten absinkt. Die einzelnen Steine erfahren hierbei auch eine Verdrehung um ihre Vertikalachse.

Die Horizontalkraft greift im Anplattungsbereich zunächst exzentrisch auf der Belagsoberfläche an. Im Anschluss an die Anplattungsfläche, in Krafrichtung gesehen, ergibt sich bei einer Steindicke von 8 cm eine mittlere Druckspannung in der Anschlussfuge von 0,22 MPa. Das Fugenmaterial drückt sich hierdurch um etwa 2/100 Millimeter zusammen, der Stein verkantet sich etwas infolge des exzentrischen Lastangriffes und der unterschiedlichen Steifigkeit der Fugenfüllung.

Bei entsprechendem Achsabstand von 1,5 m in Fahrtrichtung und Radstand quer zur Fahrtrichtung von 2 m überschneiden sich die diesbezüglichen „Lastabtragungsflächen“ zweifach bis dreifach (Bild 7) bei einem Ausbreitungswinkel von ca.  $45^\circ$ .

Versuche (Radenberg & Boetcher) zeigen, dass sich die Kompressionen kumulieren, sodass es zu einer bleibenden Gesamtverschiebung infolge Pflasterfugenverengung von mehreren Millimetern bei 30.000 Übergängen allein durch die horizontalen Rollreibungskräfte

Pflastersteindicke	Mittlere Druckspannung
8 cm	0,22 MPa
10 cm	0,19 MPa
12 cm	0,16 MPa
14 cm	0,14 MPa

Tabelle 4: Mittlere Druckspannung in der Anschlussfuge abhängig von der Pflastersteindicke

Steindicke	Verschiebeweg mm
8 cm	0,44
10 cm	0,38
12 cm	0,33
14 cm	0,29

Tabelle 5: Verschiebewege (elastisch) in Abhängigkeit von der Steindicke

Steindicke	Verschiebeweg mm
08 cm	1,0
10 cm	0,8
12 cm	0,7
14 cm	0,6

Tabelle 6: Verschiebewege am Ende des Bremsweges

te kommt. Bei einer theoretischen Kompression von 0,02 mm je Fuge kommt es bei 12 Steinreihen im elastischen Bereich bei einer Vollbremsung lediglich zu einer Gesamtverschiebung von etwa 1/10 mm, wenn man die Lastausbreitung berücksichtigt.

Die Differenz zu genanntem Versuch von Radenberg/Boetcher, bei dem es zu plastischen Verformungen kam, erklärt sich aus der Tatsache, dass die innere Reibung des verwendeten Bettungsmaterials wesentlich geringer war, als hier angenommen. Bei ausreichender Reibung (Verschiebesicherung) beträgt die plastische Verformung nur 0,008 mm/1.000 Überrollungen. Die Steifigkeit des Fugenmaterials betrug anscheinend nur einen Bruchteil der in dieser Modellrechnung berücksichtigten. Die von den Unterzeichnern zugrunde gelegte Literatur enthält keine Angaben zur inneren Reibung des Bettungsmaterials 0/5 mm bzw. zwischen Pflasterstein und Bettungsmaterial und keine Angaben zur Steifigkeit

des verwendeten Fugenmaterials. Auch die Versuche mit dem Spreizversuchsgerät von Leutner dienten lediglich dazu, den relativen Unterschied des Verschiebewiderstandes unterschiedlicher Betonpflastersteine zu erfassen. Die dort aufgeführten Verschiebewege können insoweit nicht beurteilt werden, da die gemessenen plastischen Verschiebungen von bis zu 30 mm nicht realitätsnah sind.

**3.2 Dynamische Beanspruchung durch impulsartige Horizontallasten**

Wie bei der vertikalen dynami-

schen Beanspruchung spielt auch bei der horizontalen Beanspruchung die Beanspruchungsdauer eine maßgebliche Rolle.

Neben der Reibung zwischen Pflastersteinunterseite und Bettungsschicht ist hierbei vor allen Dingen die schubbedingte elastische Verzerrung der Bettungsschicht und der oberen anschließenden Bereiche der Tragschicht von entscheidender Bedeutung. Zur Darstellung dieser elastischen (reversiblen) Verzerrung dient der sogenannte dynamische Schubmodul sowie der von der Horizontalkraft und dem Schubmodul bestimmte effektive Verschiebewinkel  $\gamma$  (nach der Beziehung  $\gamma = \tau/G$  ( $\tau$  = die Schubspannung).

Als Schubspannung kann 0,7 der Normalspannung in Ansatz gebracht werden.

Da  $\tau$  mit zunehmender Tiefe entsprechend  $\sigma$  abnimmt, verringert sich analog dazu der Verschiebewinkel. Der Schubmodul ist eine Konstante, die vom Elastizitätsmodul und der Querdehnung bestimmt ist ( $G = E : (2 + 2 \nu)$ ), wobei  $\nu$  das Maß der Querdehnung ist.

Nach einschlägiger Literatur kann für den dynamischen Schubmodul der Bettungsschicht bzw. der Tragschicht  $G_{dyn} = ca. 50$  bzw.  $160$  MPa angenommen werden.

Die Normalspannung unter 8 cm dicken Pflastersteinen beträgt

etwa 0,32 MPa, die zugeordnete Schubspannung = 0,22 MPa auf der Bettungsfläche bzw.  $\sim 0$  auf den Erdplanum. Der Verschiebewinkel  $\tan \gamma$  im ungebundenen Oberbau beträgt bei einer Ersatzhöhe von 141 mm =  $2,2 \cdot 10^{-3}$ .

Daraus ergibt sich ein Verschiebeweg auf die Gesamtdicke von Tragschicht und Bettungsschicht von ca. 50 cm und mit einer Ersatzhöhe von 191 mm = 0,44 mm.

Bezieht man den Verschiebewinkel lediglich auf die Bettung - dies dürfte der Realität am nächsten kommen -, so ergibt sich ein Verschiebeweg mit ca. 0,5 der Gesamtverschiebung bei 8 cm dicken Steinen von 0,22 mm.

Für die kommenden Ausgaben unserer Rubrik „SPECIAL“

haben wir folgende Schwerpunktthemen in Vorbereitung:

**August**

Straßenbetriebs- und Winterdienst

Betonstraßenbau

Prozessoptimierung im Straßenbau

**September**

Welt-Straßenkongress

Straßenentwässerung

**Weitere Informationen erhalten Sie von**

Elisabeth Kozur

Telefon 02 28/9 54 53-26  
e.kozur@kirschbaum.de

Dieter Sturm

Telefon 02 28/9 54 53-23  
d.sturm@kirschbaum.de

**Straße und Autobahn**

Dies ist die elastische Verschiebekomponente. Nach Entfall der Schubspannung geht das System wieder in die Ausgangslage zurück. Bei einer vieltausendfachen Wiederholung dieser Vorgänge kommt es auch horizontal zu plastischen Verformungen (eine Art Ermüdung). Das heißt, dass sich die Bodenkennwerte, insbesondere der Schubmodul, etwas verändern und sich bleibende Lageverschiebungen im Pflasterbelag ergeben.

Des Weiteren ist der Faktor „Einwirkungszeit“ eines Bremsvorganges zu berücksichtigen. Infolge des Vollbremsvorgangs verzögert sich naturgemäß die Überrollgeschwindigkeit, die Einwirkungsdauer der Horizontalkraft auf die Unterlage wächst an. Das Verhalten des Systems nähert sich im Endbereich des Bremsweges dem statischen System an. Der statische Schubmodul kann bei einer Querdehnung von 0,3 und einem E-Modul der Bettung von 60 MPa bzw. der Tragschicht von 180 MPa mit 23 MPa für die Bettung und für die Tragschicht mit 69 MPa angenommen werden. Das heißt, der Verschiebeweg verzweieinhalbfacht sich bei einer Vollbremsung, wonach bei sich häufig überlagernden Einwirkungen (Spurverkehr) mit plastischen Effekten zu rechnen ist.

Diese Überlegungen werden durch häufige Feststellungen im Bereich vielfacher Vollbremsungen bestätigt, nämlich dort, wo Pflasterflächen an vorfahrtsberechtigten Straßen oder Ampeln anschließen. In diesen Bereichen findet man häufig Horizontalverschiebungen, die insbesondere beim Läuferverband durch Ausbuchtung der Längsfugen quer zur Fahrbahn im Spurbereich auffällig werden. Dort nehmen meist auch die Spurrinntiefen zu. Man kann davon ausgehen, dass bei auffälligen Verformungen Bettung und/oder Tragschicht keinen hohen Reibungswiderstand haben bzw. unzureichend verdichtet worden sind. Weiterhin bestätigen diese Beobachtungen, dass die Verweildauer der Lasten/Kräfte einen maßgeblichen Ein-

fluss auf das Verformungsverhalten der Pflasterkonstruktionen hat.

### 3.3 Erkenntnisse

Plastische Horizontalverschiebungen, insbesondere im Bereich häufiger Vollbremsungen, sind bei Pflastersteinen mit glatten Unterseiten kaum vermeidbar. Um diese Verschiebungen zu verhindern, sind Bettungsmaterialien mit sehr großer innerer Reibung notwendig. Von großem Vorteil sind in diesen Bereichen Betonpflastersteine mit Verschiebesicherung, da für diese als Reibungskoeffizient der Tangens des inneren Reibungswinkels des verwendeten Bettungsmaterials angesetzt werden kann. Eine Abminderung auf 80 %, wie für glatte Betonunterseiten erforderlich, entfällt. Das heißt, das Bettungsmaterial muss einen inneren Reibungswinkel von nur wenig über 35° aufweisen, wohingegen bei glatter Unterseite ein innerer Reibungswinkel von über 42° erforderlich wäre. Des Weiteren empfiehlt es sich, zur Reduktion von Spurrinnenbildung in den genannten, besonders beanspruchten Bereichen die Pflasterdicken zu vergrößern, da hierdurch die wirksame Aufstandsfläche um ein Vielfaches der Mehrdicke vergrößert wird.

Die Setzungsneigung (plastische Verformung) wird entsprechend reduziert.

Alternativ kann selbstverständlich auch der diesbezügliche Bereich in gebundener Bauweise gestaltet werden. In diesen Fällen ist jedoch darauf zu achten, dass die durch elastische Dehnfugen unterbrochenen Teilflächen im Fugenbereich so konzipiert werden, dass sie die Horizontalkräfte sicher aufnehmen. Eine derartige Verstärkungsstrecke sollte innerörtlich mindestens 25 m betragen.

### Schlusswort

In den Berechnungen hat sich gezeigt, dass eine günstige Lastverteilung durch die gepflasterte Deckschicht die Beanspruchungen im Oberbau reduziert. Auf die Lastverteilung üben vor allem

die Steindicke und die Wahl des Verbandes einen großen Einfluss aus. Rechnerisch haben die Bettungsdicke und der Reibungswinkel der Gesteinskörnungen sowie deren Verdichtung einen sehr hohen Einfluss auf die Beanspruchung des Oberbaus mit einer Pflasterdecke.

Es stellt sich noch die Frage, welche Schlüsse für die Praxis aus den Modellrechnungen gezogen werden können.

Für Straßen, die der Belastungsklasse Bk1,0 zugeordnet werden können, empfehlen sich Pflastersteine ab 10 cm Dicke. In höheren Belastungsklassen und bei Stellflächen für Schwerverkehr sind die Steindicken weiter zu erhöhen.

Bei der Steinwahl sollten mittelgroße Steine mit einer Kantenlänge von 20 bis 32 cm bevorzugt werden. Die Steinflanken sollten möglichst rau bzw. profiliert sein, um bei entsprechendem Fugenmaterial eine hohe Reibung zwischen den Pflastersteinen zu bewirken. Geschnittene Natursteine sollten nur eingesetzt werden, wenn die am Lastabtrag beteiligten Seitenflächen gestrahlt und aufgeraut wurden. Bei Betonsteinen kann über eine Profilierung an der Unterseite die innere Reibung der Bettung ohne Abminderung aktiviert werden. Eine geringe Bettungsdicke und hoher Reibungswinkel, wie er klassisch in gebrochenen Gesteinskörnungen zu erwarten ist, steigern die Stabilität und mindern lastbedingte Verformungen.

Bei der Ausführung ist darauf zu achten, dass Fugen- und Bettungsmaterial sorgfältig ausgewählt und entsprechend verdichtet werden. Der Verdichtungserfolg ist stichprobenartig zu überprüfen.

Letztendlich spiegeln die durch die Modellrechnung abgeleiteten Empfehlungen empirische Erfahrungen vieler Fachleute und können über eine abgestimmte Materialauswahl helfen, die Funktion, die Lebensdauer und den Unterhalt von Pflasterstraßen positiv zu beeinflussen.

### Literaturverzeichnis

Eisenmann, J.; Leykauf, G. (1987): Bau von Verkehrsflächen. In: Betonkalender 1987. Berlin: Ernst & Sohn

Eisenmann, J.; Leykauf, G. (2003): Betonfahrbahnen. Berlin: Ernst & Sohn

Lohmeyer, G.; Ebeling, K. (2006): Betonböden für Produktions- und Lagerhallen. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik

Mentlein, H. (2014): Pflaster Atlas. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller

Radenberg, M.; Boetcher, S.: Realitätsoptimierte Simulation von Lkw-Lasten auf Pflasterdecken mit der Bochum Straßenprüfmaschine. 11<sup>th</sup> International Conference on Concrete Block Pavement (ICCBP '15), 9 to 11 September 2015, International Congress Centre Dresden, Deutschland

Türke, H.: Statik im Erdbau. Berlin: Ernst & Sohn, 2017

DIN 4017: Baugrund – Berechnung des Grundbruchwiderstands von Flachgründungen. Ausgabe 2006

DIN 4019: Baugrund – Setzungsberechnungen. Ausgabe 2015

DIN 18318: Verkehrswegebauarbeiten – Pflasterdecken, Plattenbeläge in ungebundener Ausführung, Einfassungen. Ausgabe 2016

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV) (2012): Arbeitsgruppe „Infrastrukturmanagement“: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12). FGSV Verlag, Köln

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV) (2006): Arbeitsgruppe „Mineralstoffe im Straßenbau“: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Pflasterdecken und Plattenbelägen (ZTV Pflaster-StB 06). FGSV Verlag, Köln

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV) (2015): Arbeitsgruppe „Gesteinskörnungen, Ungebundene Bauweisen“: Merkblatt für Flächenbefestigungen mit Pflasterdecken und Plattenbelägen in ungebundener Ausführung sowie für Einfassungen (M FP). Ausgabe 2015. FGSV Verlag, Köln