

Weiterführende Untersuchungen zum Verhalten von Pflasterdecken unter horizontaler Belastung

FA 6.072

Forschungsstelle: Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau (Prof. Dr.-Ing. F. Wellner) / Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen (Prof. Dr.-Ing. R. Leutner)

Bearbeiter: Lerch, T. / Numrich, R. / Hampel, U. / Lorenzl, H.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: November 2003

1. Aufgabenstellung

Nach wie vor spielt die Pflasterbauweise zur Befestigung von Straßen und Plätzen im kommunalen wie im privaten Bereich eine große Rolle. Dabei entfällt der größte Anteil an befestigten Flächen auf das Betonpflaster, gefolgt von Naturstein und Klinker. An Flächen mit großer Schwerverkehrsbelastung treten allerdings immer wieder Schäden auf, die durch die horizontale Beanspruchung infolge von Brems- und Anfahrvorgängen entstehen. Solche Schäden, nur zum Teil hervorgerufen durch die Verwendung ungeeigneter Materialien oder falscher Materialkombinationen, bringen die Pflasterbauweise zu Unrecht in Misskredit.

Auf dem Markt gibt es eine unüberschaubare Vielfalt von Betonpflastersteinen, die auf Grund ihrer gestalterischen Vorteile auch für Verkehrsflächen des Schwerverkehrs eingesetzt werden. Durch verschiedene Steinformen soll ein höherer Widerstand gegen Verformungen der Decke in horizontaler und vertikaler Richtung erreicht werden. Die Größe des Einflusses der Pflastersteinform auf das horizontale Verformungsverhalten der Pflasterdecke ist jedoch noch nicht endgültig geklärt. Ebenso wenig herrscht Klarheit über die Einflüsse verschiedener Bettungs- und Fugenmaterialien.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, durch Laborversuche das Verhalten von Pflasterdecken unter Horizontallast in Kombination von Horizontal- und Vertikallast zu erfassen und durch mechanische Modelle zu beschreiben. Der Nutzung angepasste Anwendungen sollten erarbeitet und dadurch die Zuverlässigkeit der Pflasterbauweise nachhaltig verbessert werden.

2. Untersuchungsmethodik

Für die durchzuführenden Versuche wurden sieben häufig verwendete Typen von Betonpflastersteinen ausgewählt. Um den Einfluss der Fugenmaterialien untersuchen zu können, wurden an einer Steinform Versuche mit drei verschiedenen Fugenmaterialien durchgeführt. Am selben Steintyp wurden ebenfalls zwei Bettungsmaterialien getestet und miteinander verglichen. Darüber hinaus wurde einer der Pflasterstein-Typen in zwei Dicken unter sonst gleichen Bedingungen eingebaut, um auch den Einfluss der Steindicke erfassen zu können. Verschiedene Verbände bei zwei Steinformen rundeten das Versuchsprogramm ab. Aus den verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten der ausgewählten Materialien ergaben sich 14 Varianten, die in das Versuchsprogramm eingeflossen sind.

Die Durchführung des Forschungsprogramms erfolgte in zwei Teilschritten in enger Zusammenarbeit zwischen der Professur für Straßenbau der TU Dresden und dem Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig. Im ersten, von der TU Braun-

schweig durchgeführten Teil, wurde die Wirkungsweise der Einzelkomponenten Betonstein, Fuge und Bettung untersucht. Es sollte geklärt werden, welche mechanischen Wechselwirkungen zwischen den Einzelkomponenten Betonstein, Fugen- und Bettungsmaterial bestehen.

Es wurden die Korngrößenverteilung und die Filterstabilität zwischen Bettung und Tragschicht sowie zwischen Fugenfüllung und Bettung untersucht. Weiterhin wurden die Rohdichten, die Schüttdichten, die dichteste und die lockerste Lagerung bestimmt sowie Proctor-Versuche, Fließversuche und CBR-Versuche durchgeführt. In Triaxial-Versuchen wurden bodenmechanische Kennwerte ermittelt. An den Pflastersteinen wurden die Rauheit und die Rautiefe untersucht und Zugversuche durchgeführt.

Anhand von in-situ-Versuchen wurde anschließend das Verhalten des Gesamtsystems unter Horizontalbelastung realitätsnah untersucht. Basierend auf den Laboratoriumsergebnissen wurden Pflasterflächen anhand des Versuchsprogramms in Versuchsfeldern, 5,00 m x 5,00 m groß, richtlinienkonform eingebaut.

An diesen Pflasterflächen wurden mit dem Spreizgerät Druck-Verschiebungs-Linien ermittelt. Die Spreizversuche wurden je Variante in drei horizontalen Belastungsrichtungen mit Dreifachbelegung durchgeführt. Der Durchmesser der Lastplatte von 500 mm erlaubte die Einleitung von Horizontalkräften in einem Abstand von 250–450 mm. Die Prüfkraft betrug 0–25 kN. Die Flächen wurden quer, diagonal und längs zur Fahrtrichtung belastet. Die abschließende Auswertung ermöglichte eine vergleichende Gegenüberstellung der Einzelergebnisse und eine umfassende Beschreibung des Verhaltens des Gesamtsystems Pflasterdecke unter horizontaler Belastung.

Die Versuchsfelder wurden nicht überrollt. Eine mögliche Nachverdichtung des Fugenmaterials hat daher nicht stattgefunden. Die gemessenen Verschiebungen waren größer, als sie in der Praxis bei durch Überrollung des Verkehrs nachverdichteten Flächen zu erwarten wären.

Im zweiten, an der TU Dresden durchgeführten Teil, wurden die auftretenden Verschiebungen und Verformungen ebenfalls an Pflasterkonstruktionen im Maßstab 1:1 untersucht. Dabei wurden in Dauerbelastungsversuchen gleichzeitig dynamische Horizontal- und Vertikallasten in die Konstruktionen eingeleitet.

Die Lasteintragung erfolgte über eine pulsierende dynamische Belastungseinrichtung mit einem Hydraulikdruckzylinder in Versuchsfeldern mit einer Größe von 2,50 m x 5,00 m. Die horizontal eingebrachte Belastung wirkte in Längsrichtung der Versuchsfeldfläche. Die vertikale Last entsprach der in Deutschland maximal zulässigen Radlast nach StVZO von 57,5 kN. Die horizontalen Kräfte lagen entsprechend der auftretenden Brems- und Anfahrkräfte von Lkw bei $F_H = \mu \cdot F_V = 34,5 \text{ kN}$ (Haftreibungskoeffizient $\mu = 0,60$; Gummi auf Beton).

Die dynamische Lasteinleitung erfolgte in Form einer Sinusschwingung mit einer Frequenz von 5–6 Hz und einer Lastwechselzahl von $1 \cdot 10^6$. Die Last wurde über eine kreisrunde Lastplatte aus Stahl mit einem Durchmesser von 300 mm in die Pflasterfläche eingeleitet. An der Unterseite der Lastplatte war eine Gummipatte aufgeklebt, um die Horizontalkräfte durch Reibung übertragen zu können. Zur Sicherung auf der Pflasterfläche dienten Stahlverbindungsbolzen zwischen Platte und Pflaster.

Die auftretenden Verformungen in horizontaler und vertikaler Richtung wurden gemessen und bewertet.

3. Untersuchungsergebnisse

Anhand der Spreizversuche ließ sich feststellen, dass der geringste Gesamtverschiebungswert bei einem T-Verbundstein auftrat. Grundsätzlich war zwischen den Verbundsteinen und den Rechtecksteinen bezüglich der Gesamtverschiebung zu unterscheiden. Hiervon ausgenommen ist das als Fischgrät verlegte Rechteckpflaster, das deutlich geringere Verschiebungswerte aufwies.

Grundsätzlich konnte bei den Verbundsteinen ein besserer Verschiebungswiderstand in Querrichtung als in Längsrichtung festgestellt werden. Einige wenige Verbundsteine wiesen in allen drei Richtungen einen annähernd gleichen Verschiebungswiderstand auf.

Unterschiede in der Wahl des Bettungs- und Fugenmaterials äußerten sich deutlich in unterschiedlichen Verschiebungswiderständen. Augenscheinlich waren die schlechtesten Verschiebungswerte bei einem Bettungsmaterial Brechsand-Splitt 0/5 mm und einem Fugenmaterial Brechsand 0/2 mm zu erkennen. Bessere Werte konnten mit einem einheitlichen Bettungs- und Fugenmaterial aus Brechsand-Splitt 0/5 mm gemessen werden. Die Wahl von Natursanden als Bettungs- und Fugenmaterial ergab wiederum bessere Werte für den Gesamtverschiebungswiderstand. Als Bettungsmaterial wurde ein Kies-Sand 0/4 mm und als Fugenmaterial ein Natursand 0/2 mm verwendet. Den besten Verschiebungswiderstand ergab eine Kombination aus Brechsanden und Natursanden. Das Bettungsmaterial bestand aus Brechsand-Splitt 0/5 mm während als Fugenmaterial ein Natursand 0/2 mm verwendet wurde. Das rauere Bettungsmaterial wies einen größeren Verschiebungswiderstand an der Pflasterunterseite auf, während anscheinend der Natursand als Fugenmaterial besser in die Fuge eingeschlämmt werden konnte und somit auch besser die Kräfte aufnehmen konnte als der Brechsand mit der gleichen Kornfraktion.

Ein genereller Unterschied in der Pflastersteindicke konnte nicht explizit ermittelt werden. Die Gesamtverschiebung eines Rechtecksteines von 6 cm Dicke entspricht in etwa der Gesamtverschiebung eines Rechtecksteines mit 10 cm Dicke.

Wesentliche Aussagen zu den Ergebnissen der dynamischen Dauerbelastungsversuche enthielten die Darstellungen der horizontalen plastischen Verformungen an den einzelnen Messpunkten über der Entfernung vom Lastmittelpunkt.

Einige Auffälligkeiten zeigten sich bei fast allen Versuchen. Es war festzustellen, dass sich das Maximum der Verformung nur selten direkt vor der Lastplatte einstellte, sondern meist im Bereich von 400–600 mm vom Lastmittelpunkt entfernt. Eine schlüssige Erklärung dieses Verhaltens konnte nicht gefunden werden. Es ist jedoch zu vermuten, dass unmittelbar vor der Lastplatte der Impuls zwischen den Steinen weitgehend in Form eines elastischen Stoßes weitergeleitet wird und deshalb diese Steine nur geringfügig verschoben werden.

Bei allen Versuchen mit Ausnahme der F+B-Verbundsteine mit Abstandshaltern war eine Nachverdichtung festzustellen. Die Verformungen an den Messpunkten zeigten ein degressives Verhalten. Bei höheren Lastwechselzahlen waren nur noch geringe Verformungszuwächse zu erkennen.

Durch die unterschiedlichen Abmessungen der Steine stand für die Verformung auch eine unterschiedliche Anzahl von Fugen zwischen Lasteintragungspunkt und Versuchskastenrand zur Verfügung. In einem weiteren Schritt der Auswertung wurde deshalb die spezifische Verformung für die einzelnen Messpunkte berechnet. Unter der spezifischen Verformung soll hier der Quotient aus der Verformung an der betrachteten Stelle und der Summe der Fugenbreiten, die zwischen der betrach-

teten Stelle und dem Kastenrand liegen, verstanden werden. Durch die Betrachtung der spezifischen Verformung ergab sich eine andere Reihenfolge in der Wertung der Versuche. Außerdem ließen sich die spezifischen Verformungsbilder der Varianten in zwei Typen einteilen. Bei einem Teil der Varianten, die sich dem Typ I zuordnen ließen, nahm die spezifische Verformung mit zunehmender Entfernung vom Lastmittelpunkt ab. Es ergaben sich näherungsweise Geraden, die abfallen. Der Typ II wies nahezu konstante spezifische Verformungen auf. Es ergaben sich damit waagrecht liegende Geraden.

Es ist zu vermuten, dass der Verlauf der spezifischen Verformungslinien Hinweise sowohl auf den Verbund als auch auf das Reibungsverhalten zwischen Bettung und Pflaster gibt. Nahm die spezifische Verformung ab (Typ I), wurde die Last durch Reibung besser in die Bettung abgeleitet. Beim Typ II dagegen war die Reibung gering, es kam zu größeren Verschiebungen. Dem Typ II ließen sich vor allem die Varianten Rechteckstein im Parkettverband und L-Verbundstein zuordnen. Hier wirkten sich die in Längsrichtung durchlaufenden Fugen negativ aus.

Bei der Betrachtung der maximalen Verformungen aller dynamischen Versuche ergab sich eine Rangfolge, an deren Spitze zunächst die F+B-Verbundsteine standen. Nach dem T-Verbundstein folgten die beiden Varianten mit Rechtecksteinen und Natursand 0/2 mm als Fugenfüllung. Im Mittelfeld lagen die weiteren Verbundsteine sowie der 6 cm dicke Rechteckstein und der Rechteckstein im Fischgrätverband. Mit den größten Verformungen lagen drei Varianten des 10 cm-Rechtecksteins am Ende.

Bei der Betrachtung der spezifischen Verformungen ergab sich eine andere Rangfolge. An der Spitze lagen wieder die beiden Varianten des F+B-Verbundsteins. Es schlossen sich die beiden Varianten mit Rechtecksteinen und Natursand 0/2 mm als Fugenfüllung an. Im mittleren Bereich fanden sich neben den Verbundsteinen auch der 6 cm-Rechteckstein und der Rechteckstein im Fischgrätverband. Am Schluss fielen mit höheren spezifischen Verformungswerten neben den bereits oben erwähnten Varianten des Rechtecksteins auch zwei Verbundsteine auf.

Die Form der Pflastersteine sowie eventuell vorhandene Verbundwirkungen hatten einen großen Einfluss auf das Verformungsverhalten der Versuchsflächen. Beinahe konkurrenzlos stand der F+B-Verbundstein mit angeformten Abstandshaltern an der Spitze. Der zweitbeste Stein war der T-Verbundstein. Die folgenden Steinformen zeigten kein eindeutiges Verhalten, sondern wiesen eine starke Streuung auf. Beim Doppel-T-Verbundstein wirkt sich wahrscheinlich beim zweiten und dritten Versuch eine verringerte Rauheit an der Steinunterseite negativ aus. Bei dem H+V-Verbundstein können Schwierigkeiten bei der Fugenfüllung zu größeren maximalen Verformungswerten geführt haben.

Zum Einfluss des Verbandes war festzustellen, dass sich lange Fugen in Längsrichtung ungünstig auswirkten. Diese führten zu größeren maximalen Verformungen und zu (bis in große Entfernung vom Lastmittelpunkt vorhandenen) spezifischen Verformungen (Typ II). Der Fischgrätverband zeigte ein sehr günstiges Verhalten und eine gute Verteilung der Verformungen in die Breite.

Ein Einfluss der Steindicke auf die Verformung war nicht feststellbar.

Das Bettungsmaterial (Brechsand-Splitt-Gemisch 0/5 mm oder Kies-Sand 0/4 mm) hatte auf die maximale horizontale Verformung keinen Einfluss. Ein Unterschied zeigte sich jedoch im Verlauf der spezifischen Verformungslinien. Hier wurde deutlich, dass sich bei der Verwendung des rundkörnigen Bettungsmaterials die Verformungen weiter auswirkten als bei dem

gebrochenen Material. Außerdem waren Auswirkungen der Bettung auf die vertikalen Verformungen erkennbar.

Bezüglich des Fugenmaterials ergab sich ein Vorteil für die beiden Varianten mit einer Fugenfüllung aus Natursand 0/2 mm. Hier lagen die maximalen Verformungswerte innerhalb eines engen Bereiches. Ein Versuch mit Brechsand-Splitt-Gemisch 0/5 mm als Fugenfüllung fiel ebenfalls in diesen Bereich, die anderen Versuche mit Brechsand-Splitt-Gemisch 0/5 mm und Brechsand 0/2 mm lagen deutlich darüber. Auffällig waren hier die wesentlich höheren Schwankungen.

Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der Spreizversuche und der dynamischen Belastungsversuche war nicht direkt möglich. Die Verformungen bei den Spreizversuchen waren wesentlich höher. Stellte man die gemessene plastische Verformung aus den Spreizversuchen (in Längsrichtung) den maximalen Verformungen der dynamischen Versuche (jeweils schlechterer Versuch jeder Variante) gegenüber, ergab sich im allgemeinen ein Faktor von 5,3, um den die Ergebnisse der Spreizversuche größer waren als die der dynamischen Versuche. Deutliche Unterschiede gab es bei den Varianten Rechteckstein 6 cm, Rechteckstein Parkettverband, Rechteckstein Kies-Sand/Natursand und den F+B-Verbundsteinen. Die Fugenfüllung mit Brechsand 0/2 mm beim Rechteckstein schnitt bei beiden Versuchen sehr schlecht ab. Übereinstimmend gut waren dagegen die Ergebnisse der Varianten T-Verbundstein und Rechteckstein Brechsand-Splitt/Natursand.

Zusammenhänge zwischen den ermittelten Rauigkeiten der Pflastersteine, dem im Laborversuch untersuchten Reibungsverhalten und den Ergebnissen der dynamischen Belastungsversuche waren nicht erkennbar.

4. Folgerungen für die Praxis

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei fachgerechter Ausführung von Betonpflasterdecken mit geeigneten Materialien ein guter Widerstand gegen horizontale Verformungen erreichbar ist. Wichtig sind ein guter Verband zwischen den Steinen sowie eine gute und dauerhafte Fugenfüllung.

Der geringste Widerstand gegen horizontale Verschiebung ergab sich bei Rechtecksteinen. Bei Verbänden mit durchgeh-

enden Fugen (z. B. Parkettverband) waren dabei die größten Verschiebungen festzustellen. Läuferverband bzw. Fischgrätverband vermindern auch bei diesen Steinen die Verschiebungen bei horizontalen Beanspruchungen.

Steine mit Verbund weisen gegenüber den Rechtecksteinen z. T. einen besseren Widerstand gegen horizontale Beanspruchungen aus. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass sich auch bei Steinen mit Verbund durchgehende Fugen (z. B. zwischen den Verlegeeinheiten) negativ auswirken können.

Ein sehr guter Verformungswiderstand der Pflasterdecke gegenüber horizontaler Beanspruchung konnte bei Winkelverbundsteinen mit einem Verband ohne durchgehende Längsfugen festgestellt werden. Die neuentwickelten Rechteck-Verbundsteine mit Verschiebesicherung (F+B-Verbundsteine) zeigten bei den dynamischen Belastungsversuchen den höchsten Widerstand gegen horizontale Verschiebung.

Die Fugenfüllung aus Natursand verbessert vom Zeitpunkt des Einkehrens an wegen der einfachen Ausführung den horizontalen Verformungswiderstand. Es ist mit geringem Aufwand eine vollständige Fugenfüllung möglich. Dabei ist zu beachten, dass Natursand wegen fehlender Kohäsion auch sehr leicht aus der Fuge ("nach oben") ausgetragen werden kann. Ggf. ist hier bei mehrmaliger Verfüllung die obere Lage der Fugenfüllung unter Beachtung der Filterstabilität gegenüber der unteren Lage aus gebrochener Gesteinskörnung auszuführen.

Ein wesentlicher Einfluss der Steinhöhe auf den Verformungswiderstand konnte bei den Versuchen nicht festgestellt werden, Voraussetzung hierfür ist die vollständig gefüllte Fuge.

Da in einigen Fällen der erste Versuch der jeweils zwei Versuche je Steinvariante die geringeren horizontalen Verformungen zeigte, ist davon auszugehen, dass die Reibung zwischen Stein und Bettung einen wesentlichen Einfluss auf den horizontalen Verformungswiderstand hat. Zur Vermeidung von Schäden in stark horizontal beanspruchten Verkehrsflächen wäre zu prüfen, ob eine Formgebung der Unterseite der Steine zur Erhöhung der Reibung zwischen Stein und Bettung sinnvoll ist. □