

Testergebnisse zur Steifigkeit von Pflasterflächen

Test results on the stiffness of paved surfaces

Brian Shackel Sydney/Australia; Johann Litzka, M. Zieger Vienna/Austria

Überreicht durch:



UNI-INTERNATIONAL
Bausysteme GmbH + Co.
Josef-Hermann-Straße 1
D-76473 Iffezheim
Tel. 0 72 29/38 41
Fax 0 72 29/38 43
<http://www.uni-international.de>



Sonderdruck aus BETONWERK + FERTIGTEIL-TECHNIK BFT, Heft 4/2000
Bauverlag GmbH, Am Klängenweg 4a, 65396 Walluf



Verbundsteinpflaster

Testergebnisse zur Steifigkeit von Pflasterflächen

Die Steifigkeit von Pflasterflächen hängt ab von Steinform, Dicke und Verlegemuster. Sie ist wesentlicher Ausgangswert für Analyse und Bemessung von Betonsteinpflaster-Befestigungen – trotz ihrer Bedeutung wird sie aufgrund des erforderlichen Aufwandes häufig nicht ausreichend untersucht. Das hierfür entworfene Modell von Brian Shackel hat sich bewährt. Darauf kann jetzt in der Praxis zurückgegriffen werden.

Neueste Testergebnisse aus Australien und Wien zeigen, dass mit Betonsteinen gepflasterte Flächen sich unter Belastung in ihrer Verformung überwiegend elastisch verhalten. Mit dieser Erkenntnis wurde eine Methode entwickelt, mit der das tatsächliche Verhalten von Betonpflasterflächen auch im Laborversuch nachvollziehbar wird. Als Modell wird eine elastische Schicht (Platte) zugrunde gelegt, die unter Last zur gleichen

Interlocking concrete block pavements

Test results on the stiffness of paved surfaces

The stiffness of paved surfaces depends on the shape, the thickness of the paving block and the laying pattern. It is an essential value for the analysis and design of surfaces paved with concrete blocks – but despite its significance it is often not sufficiently examined due to the complexity involved.

The model designed for this by Brian Shackel has proved itself and can now be used in the practice.

DANKSAGUNG/ACKNOWLEDGEMENT

Die in diesem Beitrag beschriebenen Versuche wurden von Uni International Bausysteme GmbH finanziert. Die Autoren danken Michael Schmitz, Technischer Direktor von Uni International, für seine Unterstützung.

The tests described in this paper were funded by Uni International Bausysteme GmbH and Co. The authors thank Michael Schmitz, Technical Director of Uni for his help.

Latest test results from Australia and Vienna show that surfaces paved with concrete blocks under load show a largely plastic behavior. Based on this knowledge, a method has been determined with which the actual behavior of block pavements can also be studied in laboratory tests. As model serves an elastic layer (slab) which under load leads to the same deformation as the block pavement itself. In this case it was found best to express the stiffness of the block pavement through their moduli of elasticity.



Prof. Dr. Brian Shackel, University of New South Wales, Kensington Australia. "Pope of concrete paving", specialist in all the questions of paving blocks for structural laying.



o.Univ.Prof.Dipl.-Ing. Dr. Johann Litzka ist Vorstand des Institutes für Straßenbau und Straßenerhaltung der TU Wien. Seine Hauptarbeitsgebiete sind Oberbaubemessung, Straßenbautechnik und systematische Straßen-erhaltungsplanung.



ADir.Ing. Manfred Zieger ist Projektleiter des Gestein- und Asphaltlabors des Österreichischen Forschungs- und Prüfzentrums Arsenal. Seine Hauptarbeitsgebiete sind Prüfung von Materialien für den Straßenbau und Baustoffprüfungen.

Verformung führt, wie die Steinfläche selbst. In diesem Fall war es passend, die Steifigkeit der Pflastersteinfläche durch deren E-Modul auszudrücken.

In diesem Programm wurden sowohl „konventionelle“ Steintypen als auch solche für wasserdurchlässiges Pflaster (Ökosteine) eines neuen Betonverbundpflastersteins getestet.

Der Einfluss des Verlegemusters war geringer, und im praktischen Verhalten zeigte sich wenig Unterschied zwischen konventionellem und Ökopflaster. Für die untersuchten Steintypen werden typische Bereiche für die E-Moduln angegeben und miteinander verglichen.

Lastverhalten im Verbund

In den letzten 20 Jahren wurden viele Versuche mit Betonpflaster im Maßstab 1:1 durchgeführt, um die Reaktion dieser Befestigungen auf Belastung durch den Verkehr zu verstehen [1]. Die meisten dieser Versuche betrafen die Konstruktion und die zeittraffende Verkehrsbelastung von Prototyp-Befestigungen mit vollen Abmessungen. Solche Versuche sind teuer und zeitaufwändig, und deshalb wurde in letzter Zeit mehr Gewicht auf die Entwicklung einfacher Laborversuche gelegt [2],[3]. Dieser Beitrag beschreibt die Anwendung einer solchen Testprozedur auf die Charakterisierung neu entwickelter Betonsteintypen. Diese Versuche ermöglichen die Messung der mechanischen Eigenschaften einer Pflasterfläche unter Laborbedingungen. Auf Betonverbundsteine wurde diese Technik zunächst an der Universität von New South Wales in Sydney, Australien, und dann in Zusammenarbeit mit dem Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung der TU Wien dort im Labor der ÖFPZ Arsenal angewendet. Die untersuchten Einflussgrößen umfassten die Steinform und das Verlegemuster. Die

In this program, both "conventional" block types and ecological paving were tested.

Load behavior in interlock

Many full-scale tests of concrete block pavements have been conducted during the last twenty years with the objective of understanding how such pavements respond to loads and traffic. These have been reviewed elsewhere [1]. Most of these tests have involved the construction and accelerated trafficking of full-scale prototype pavements. Such tests are expensive and time-consuming and recently more emphasis has been given to developing simpler laboratory test procedures e.g. [2], [3]. This paper describes the application of one such procedure to the characterization of newly developed paving stones. This procedure enables the mechanical properties of a paver surface to be measured under laboratory conditions. This technique was first applied to paving stones at the University of New South Wales in Sydney [2], [4] and subsequently in Vienna at the ÖFPZ Arsenal Laboratories in conjunction with the Institute for Road Construction of the Technical University. The factors studied included the influence of the paver shape and the laying pattern. Outputs include typical values of

Bild 1. Uni-Priora und Optiloc-Pflastersteine

Fig. 1. The Uni-Priora and Uni-Optiloc paving stones



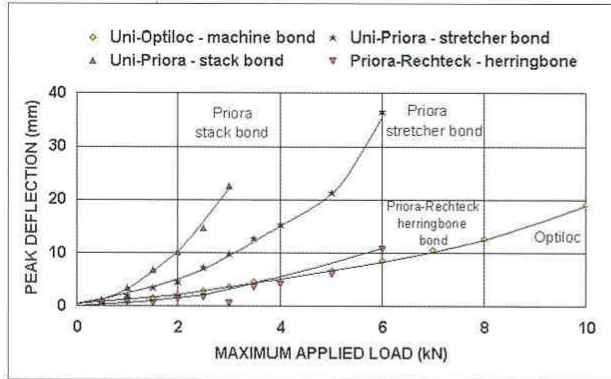
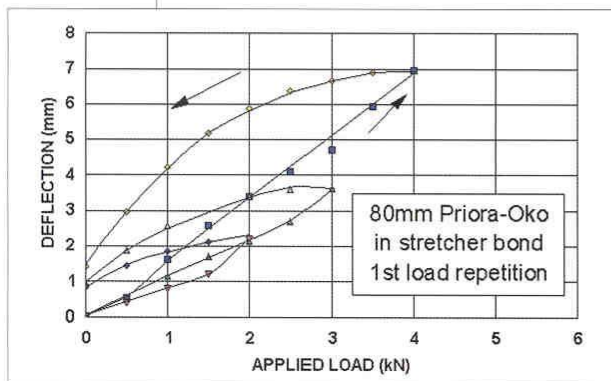


Bild 2. Beziehung zwischen maximaler Belastung und bleibender Verformung

Fig. 2. The peak mat deflections as functions of the applied load

Bild 3. Typisches Uni-Priora Ökopflaster im Läuferverband mit Kreuzfuge

Fig. 3. Typical load-deflection curves for Uni-Priora-Öko paving stones laid in stretcher bond



Ergebnisse stellen typische Werte für die E-Moduln dar, die für die Charakterisierung der Pflasterdecke im Zuge der mechanistischen Oberbaubemessung geeignet sind.

Aufbau und Ablauf der Versuche

Die getesteten Pflastersteine waren der neu entwickelte Uni-Priora- und der Uni-Optiloc-Stein (Bild 1). Der Uni-Priora Stein wurde in zwei Versionen getestet, als quadratische (Uni-Priora Klassik) und als rechteckige Form (Uni-Priora Rechteck) mit einem Längen-Breiten-Verhältnis von „drei zu zwei“. Darüber hinaus wurden von diesem Steinsystem die jeweils normale Ausführung und die „Öko-Version“ getestet. Die Öko-Steine sind derart gestaltet, dass sie durch größere Fugenabstände (11 mm) – außer an den Abstandsnoppen – die Versickerung von Wasser in die Befestigung ermöglichen. Bild 1 zeigt nur die „Öko-Versionen“ der Uni-Priora-Steine. Die Steine hatten eine nominelle Dicke von 80 mm. Die Uni-Optiloc Steine wurden in einem maschinenverlegbaren Verband verlegt, die Normal- und die „Öko-Version“ von Uni-Priora wurden sowohl im Läuferverband mit Kreuzfuge als auch im Läuferverband mit Versatz verlegt, während die Uni-Priora-Rechteck Steine (Öko-Version) im Fischgrätverband verlegt wurden.

Der Versuchsablauf und die zugrunde liegenden Überlegungen wurden im Detail bereits in BFT 9/99 [5] beschrieben. Die Testprozedur erlaubt die Prüfung der Pflastersteine unabhängig von den darunter liegenden Oberbauschichten. Erste Resultate wurden zum Pflasterstein-Kongress 1993 vorgetragen [2]. Trotz seiner Einfachheit zeigte sich, dass der Test die gleiche Rangfolge der Einflüsse von Steinform usw. ergab wie die komplizierteren und teureren zeitraffenden Belastungstests [1], [2], [4].

resilient modulus suitable for characterizing paving stones for the purposes of mechanistic pavement design.

Test procedure

The paving stones tested comprised the recently developed Uni-Priora and Uni-Optiloc stones. These are illustrated in Figure 1. Two versions of the Uni-Priora were tested. One had sides of equal length (Uni-Priora Klassik) whilst the other had sides in a 3:2 ratio of length to breadth (Uni-Priora Rechteck). Both normal and ecological versions of the Uni-Priora paving stones were tested. The ecological paving stones were designed to allow water to penetrate the pavement by providing wider joints (11 mm) except at the locking spacers. Only the ecological versions of Uni-Priora are shown in Figure 1. All the paving stones were nominally 80 mm thick. The Uni-Optiloc stones were installed in patterns suitable for machine laying, the normal and ecological versions (öko) of Uni-Priora were installed in both stack and stretcher bonds whilst the Uni-Priora-Rechteck (Eco-version) was laid in herringbone bond.

The test procedure and its underlying philosophy have been described in detail elsewhere [5]. The procedure allows paving stones to be tested in isolation from any pavement sub-structure. Results were first published in 1993 [2]. Despite its simplicity, the test has been shown to yield the same ranking of the effects of paver shape etc. as that given by more complicated and expensive accelerated trafficking tests [1], [2], [4].

The test involved laying and compacting the paving stones on a sand bedding in a 1.5 m square steel frame placed upon a concrete floor. The joints between the paving stones were generally maintained within the range from 2 to 4 mm. The paving stones were compacted using a plate vibrator. Following compaction, the frame, together with the intact paver mat, could be lifted by crane off the floor. Under the self-weight of the paving stones the centre of the mat of paving stones sagged sufficiently to induce arching and wedging between the individual paving stones, and between the paving stones and the test frame. As a result the paving stones achieved structural integrity and acted like an articulated slab. Despite the lack of any support, the paving stones were then capable of supporting significant vertical load. The unsupported mats of paving stones were tested like a slab beneath a computer controlled jack having a capacity of 25 kN. This applied a central load to the mats via a rigid circular plate having a diameter of 150 mm. The deflections of the mats were measured as a function of the applied load so that the equivalent quasi-elastic modulus of the paver mats could be calculated. Load was progressively applied to the paving stones beginning with a load of 0.5 kN. This was increased in steps of either 0.5 or 1.0 kN until the load capacity of the mat was reached. Each load increment was cycled 5 times and readings of deflection were made at 0.5 kN intervals during both the loading and unloading cycles.

Test results

A summary of the test data showing the peak deflections and the applied loads as functions of repetitions is given in Figure 2. It will be seen that the Uni-Optiloc paving stones exhibited less deflection at any given load than the various forms of Uni-Priora and had a higher load capacity than the other paving stones. Amongst the Priora variants, the Uni-Priora laid in stack bond did not perform as well as the other stones.

Typical deflection-load curves for the Uni-Priora-Öko paving stones laid in stretcher bond are given as Figure 3. This type of response was typical of all the paving stones tested here. It may be seen that, irrespective of the applied load, the total deflection was made up of both a large recoverable or resilient deflection and a smaller non-recoverable or residual deformation. Each of these components is now considered in more detail.



Der Test beginnt mit der Verlegung und Verdichtung der Pflastersteine auf einem Sandbett in einem quadratischen Stahlrahmen von 1,5 m mal 1,5 m, der auf einem Betonboden aufliegt. Die Fugen zwischen den Steinen wurden generell im Bereich von 2-4 mm gehalten. Die Verdichtung erfolgte mit einer Vibrationsplatte. Nach der Verdichtung konnte der Stahlrahmen zusammen mit der intakten Pflasterfläche von einem Kran vom Boden aufgehoben werden. Unter dem Eigengewicht der Pflastersteine senkte sich das Zentrum der Pflasterfläche um ein gewisses Maß, wodurch eine Bogen- und Keilwirkung zwischen den einzelnen Steinen und zwischen den Steinen und dem Prüfrahmern aufgebaut wurde. Dadurch erreichten die Pflastersteine eine strukturelle Eigenständigkeit und wirkten wie eine gelenkige Platte. Obwohl in keiner Weise unterstützt, waren die Pflastersteine hierauf in der Lage, nennenswerte vertikale Lasten zu tragen. Die freiliegende Pflasterdecke wurde wie eine Platte mittels eines computergesteuerten Laststempels mit einer Kapazität von 25 kN geprüft. Damit wurde über eine steife Kreisplatte mit einem Durchmesser von 150 mm eine zentrale Last in die Pflasterfläche eingeleitet. Die Deflektionen der Pflasterfläche wurden in Abhängigkeit von der aufgetragenen Last gemessen, sodass der äquivalente quasi-elastische Modul der Pflasterdecke berechnet werden konnte. Die Last wurde stufenweise, beginnend mit 0,5 kN auf die Steinfläche aufgebracht. Die Zunahme erfolgte in Schritten von 0,5 kN bzw. 1,0 kN, bis die Tragfähigkeitsgrenze der Pflasterfläche erreicht war. Jede Laststufe wurde fünfmal wiederholt, und die Deflektionsablesungen bei den Lastintervallen von 0,5 kN wurden jeweils während des Be- und des Entlastungszyklus vorgenommen.

Versuchsergebnisse

Bild 2 zeigt die Zusammenfassung der Versuchsdaten mit den maximalen Deflektionen und den aufgetragenen Belastungen als Funktion der Lastwiederholungen. Es ist zu erkennen, dass die Uni-Optiloc Pflastersteine in allen Lastbereichen eine geringere Deflektion als die verschiedenen Formen der Uni-Priora Steine erfahren und zugleich eine höhere Belastungskapazität aufweisen als die anderen Steintypen. Innerhalb der Priora-Varianten verhielt sich das Uni-Priora Pflaster im Läuferverband mit Kreuzfuge nicht so gut wie die anderen Steintypen. Typische Last-Setzungskurven für das Priora-Öko-Pflaster im Läuferverband mit Versatz zeigt Bild 3. Der gezeigte Kurvenverlauf ist typisch für alle in diesem Test untersuchten Steintypen. Es zeigt sich, dass unabhängig von der aufgetragenen Last sich die Gesamtdeflektion sowohl aus einer großen reversiblen oder elastischen Deflektion als auch einer kleineren nicht reversiblen oder bleibenden Verformung zusammensetzt. Beide Komponenten werden in der Folge detaillierter betrachtet.

Bleibende Verformung

Wie Bild 3 zeigt, umfasst die nicht reversible Deformation nur einen kleinen Teil der gesamten Deflektion der Pflasterfläche. Die im Bild angegebenen Werte beziehen sich auf den ersten Belastungszyklus. Hier ist der Anteil der bleibenden Deflektion größer als bei den nachfolgenden Lastwiederholungen. Dieses Verhalten ist für die meisten Materialien flexibler Befestigungen typisch.

Die Beziehung zwischen den maximalen bleibenden Deformationen nach fünf Lastzyklen und der aufgetragenen Last ist in Bild 4 dargestellt. Es zeigte sich, dass das Priora-Pflaster im Läuferverband mit Versatz unter Belastung geringere Deformationen aufwies als bei Verlegung im Läuferverband mit Kreuzfuge.

Bei den Öko-Versionen dieser Steine ergaben sich nur geringe Differenzen im Verhalten zwischen den beiden Verlegemustern. Bei einer bestimmten Last zeigten jedoch die Öko-Steine geringfügig größere Deformationen als die konventionellen Steintypen. Generell lässt sich aus den Verformungswerten

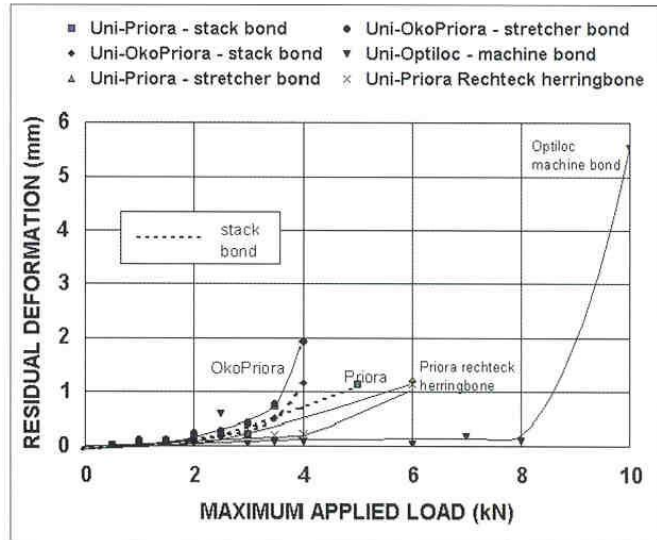


Bild 4. Beziehung zwischen Belastung und dem Anteil bleibender Verformung

Fig. 4. Relationship between maximum residual deformation and applied load

Non-recoverable deformation

As shown in Fig. 3, the non-recoverable deformations accounted for only a small part of the total mat deflection. The data given in the figure is for the first load repetition. Here the residual portion of the deflection is greater than for subsequent load repetitions. This type of behavior is typical of most flexible pavement materials.

The relationships between the maximum residual deformations after 5 load cycles and the applied load are shown in Figure 4. It was found that Uni-Priora laid in stretcher bond developed less deformation under load than when laid in stack bond. For the ecological versions of this paver there was little difference in performance between the two laying patterns. However, the ecological paving stones exhibited slightly more deformation at a given load than the conventional paving stones. Overall the deformation data suggested that the use of stretcher bond was preferable to stack bond and that the normal stones behaved slightly better than the ecological stones. However, it should be noted that the differences between the various types of Uni-Priora were small and were of little engineering significance.

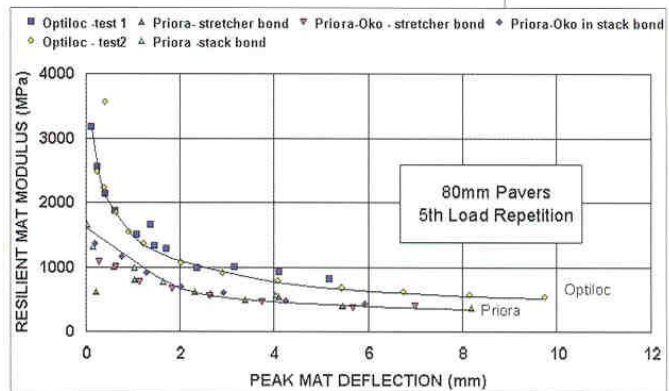


Bild 5. E-Modul in Abhängigkeit von der maximalen Deflektion

Fig. 5. Resilient modulus as a function of peak deflection



Steinform <i>Paving stone shape</i>	Bereich des E-Moduls <i>Range of Resilient Modulus (MPa)</i>
Uni-Priora	500 – 1500
Uni-Priora-Rechteck	400 – 1600
Uni-Optiloc	800 – 3500
Rechtecksteine <i>Rectangular</i>	< 750

E-Modul für
Deflektionen
< 2,5 mm

*Resilient moduli
for deflection
< 2.5 mm*

ableiten, dass die Verlegung im Läuferverband mit Versatz jener mit Kreuzfuge vorzuziehen ist und dass sich die normalen Steine geringfügig besser verhalten als die Öko-Steine. Es ist jedoch anzumerken, dass die Differenzen zwischen den verschiedenen Uni-Priora-Typen klein und von geringer ingenieurmäßiger Signifikanz sind.

Elastische Deflektion

Ohne Ausnahme wurde für alle hier untersuchten Steintypen gefunden, dass der größte Teil der Deflektion während eines Zyklus von Be- und Entlastung reversibel d.h. elastisch und nur ein geringer Teil der Deformation nicht reversibel war (siehe z.B. Bild 3). Dies gilt für alle Lastgrößen. Es war deshalb in guter Annäherung sinnvoll, die Pflasterfläche durch elastisches Verhalten, das heißt in einer quasi elastischen Form, zu modellieren. Dabei wurde angenommen, dass die Poissonzahl 0,3 beträgt und dass die Pflasterfläche als kontinuierliche, elastisch-isotrope Platte analysiert werden kann, die an den Rändern unterstützt wird. Das ermöglichte es, das Verhalten der Pflasterfläche mittels eines Sekanten-E-Moduls zu modellieren, in dem die maximale Belastung und die elastische Deflektion für jeden Lastzyklus in Relation gesetzt wurden. Dieser Modul ist als Funktion der maximalen Deflektion in Bild 5 für alle untersuchten Steintypen dargestellt.

Aus Bild 5 ist zu sehen, dass wenig Unterschied im Verhalten zwischen den verschiedenen Uni-Priora-Typen auftrat. Für eine bestimmte Steinform erhielt man ähnliche Moduln für unterschiedliche Verlegemuster sowie auch für den konventionellen und den Öko-Typ des Steines. Es ergaben sich auch nur geringe Differenzen zwischen Wiederholungstests mit Uni-Optiloc-Steinen, was die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Versuchsmethode zeigt. Für unterschiedliche Steinformen ergaben sich jedoch signifikante Unterschiede in den E-Moduln. Im Bereich geringer Deflektionen war der Modul des Uni-Optiloc-Pflasters fast doppelt so hoch wie jener der verschiedenen Uni-Priora-Typen.

Beobachtungen an Pflasterbefestigungen unter zeitraffender Belastung zeigen, dass diese Befestigungen typischerweise elastische Deflektionen aufweisen, die 10- bis 20-mal größer sind als jene, die bei Asphaltbefestigungen toleriert werden können [1]. Hier können elastische Deflektionen bis ca. 2,5 mm ohne Schaden akzeptiert werden. Deshalb sind die in Bild 5 gezeigten Modulwerte für den Bereich unter 2,5 mm von größtem ingenieurmäßigen Interesse. Entsprechende Bereiche für die E-Moduln für unterschiedliche Steintypen bei Deflektionen bis 2,5 mm sind in der Tabelle angegeben.

Die in der Tabelle angegebenen Resultate gelten für Pflastersteine mit unterschiedlichen Verlegemustern, die aber keinen ersichtlichen Effekt auf die E-Modul-Werte hatten. Viel mehr ergab sich, dass die Hauptbestimmungsgröße für die Höhe des E-Moduls die Steinform war. Weiter wurde befunden, dass für die Uni-Priora-Steine wenig Unterschied zwischen den normalen und den Öko-Steinen war, d.h. die E-Modul-Werte der Priora- und Öko-Priora-Steine waren ähnlich. Das weist darauf hin, dass die Verwendung dieser Öko-Steine mit keinem strukturellen Nachteil verbunden ist. Zum Vergleich wurden in der Tabelle auch Werte angegeben, die aus früheren Tests [2] mit 80 mm dicken rechteckigen Steinen im Fischgrätverband erhalten wurden. Es kann ersehen werden, dass alle Verbundpflastersteine höhere E-Modulwerte ergaben als die Rechtecksteine.

Resilient deflection

For all the paving stones tested here, without exception, it was found that, most of the deflection during a cycle of loading and unloading was recoverable i.e. resilient and that only a small portion of the deformation was non-recoverable (e.g. Figure 3). This was true at all load magnitudes. Therefore, to a good approximation, it was reasonable to model the mats of paving stones as behaving resiliently i.e. in a quasi-elastic manner. Here it was assumed that the Poisson's Ratio was 0.3 and that the mat of paving stones could be analyzed as a continuous isotropic elastic slab supported around its periphery. This allowed the mat behavior to be modeled in terms of a secant resilient modulus relating the peak load and the resilient deflection in any given cycle of loading and unloading. This modulus is plotted as function of the peak deflection in Figure 5 for all the paving stones tested.

From Figure 5, it may be seen that there was little difference in response between the various forms of Uni-Priora. In other words, for a particular paver shape, similar moduli were obtained for different laying patterns and for both normal and ecological types of paver. There was also little difference between replicate tests of Uni-Optiloc showing that the test method was accurate and repeatable. However, there were significant differences in modulus between the tests of different paver shapes. At low deflections, the modulus of the Uni-Optiloc was nearly twice as stiff as the various types of Uni-Priora.

Observations of concrete block pavements subjected to accelerated trafficking show that, in service, the pavements typically exhibit resilient deflections that are 10 or 20 times larger than can be tolerated by asphalt pavements [1]. Here resilient deflections up to about 2.5 mm can be tolerated without distress. For this reason the values of modulus shown in Figure 5 are of greatest engineering interest for deflections of less than 2.5 mm. Ranges of resilient modulus are given in the Table for the various paving stones for deflections not exceeding 2.5 mm.

The results given in the Table are for paving stones installed in a variety of laying patterns but this had no obvious effect on the values of resilient moduli. Rather, it was found that the prime determinant of the magnitude of the modulus was the paver shape. Moreover, it was found that for the Uni-Priora paving stones there was little difference between the normal and ecological paving stones. I.e. the resilient moduli of the Priora and Öko-Priora paving stones were similar. This suggests that there is no structural disadvantage in using such eco-paving stones. For comparison, data obtained in earlier tests [2] of 80 mm rectangular paving stones laid in herringbone bond are also given in the Table. It may be seen that the shaped paving stones all developed higher moduli than the rectangular paving stones.

The resilient moduli given in the Table can be used directly as inputs to existing computer design programs such as LOCKPAVE [6]. This enables the pavements to be designed with more confidence than where the values of paving stone stiffness must be just assumed rather than measured. However, it should be noted that the values of the resilient modulus reported here are conservative because the test did not fully take into account the stiffening or "lock-up", of block pavements that normally occurs under the first 10,000 traffic load repetitions. As the stones progressively wedge more tightly against one another block pavements can increase their stiffness by a factor of 2 or more [1]. In the tests described here, there were only 5 repetitions of load. Despite this, it may be seen from the Table that the values of the resilient modulus ranged from approximately 400 MPa to 3,500 MPa. These values are comparable with those of conventional asphaltic surfaces. However, it is important to recognize that, as noted above, the paving stones can withstand much greater deflections than asphalt and therefore will perform better under traffic than asphalt of equal thickness.



Die E-Modulwerte aus der **Tabelle** können direkt als Eingabewerte in vorhandene Computerprogramme für die Bemessung, wie z.B. LOCKPAVE [6], verwendet werden. Dies ermöglicht die Bemessung der Befestigungen mit größerer Sicherheit als in jenen Fällen, wo die Werte für die Steifigkeit der Steindecke eher abgeschätzt werden mussten. Es muss jedoch angemerkt werden, dass die hier angegebenen Werte für die E-Moduln eher konservativ sind, da der Versuch die Versteifung beziehungsweise Verspannung der Betonpflastersteine nicht voll berücksichtigt, die normalerweise unter den ersten 10.000 Lastwiederholungen erfolgt. Indem sich die Steine zunehmend mehr miteinander verkeilen, können Pflasterdecken ihre Steifigkeit um einen Faktor 2 oder mehr erhöhen [1]. In den hier beschriebenen Untersuchungen erfolgten nur fünf Lastwiederholungen. Trotzdem kann aus der **Tabelle** ersehen werden, dass die E-Modulwerte sich zwischen ca. 400 MPa und 3.500 MPa bewegen. Diese Werte sind mit jenen konventioneller Asphalttschichten vergleichbar. Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass – wie ausgeführt – Pflasterbefestigungen wesentlich größeren Deflektionen widerstehen können als Asphaltbefestigungen und sie sich deshalb unter Verkehr besser verhalten als Asphalttschichten gleicher Dicke.

Ergebnisse und Ausblick

Die beschriebenen Untersuchungen zeigten, dass sich die Pflastersteinfläche hinsichtlich ihrer Deflektion unter einer Last überwiegend elastisch verhielt. Die Versuche haben gezeigt:

1. Bei gegebener Steindicke hängt der E-Modul der Pflasterfläche primär von der Steinform ab.
2. Für die unterschiedlichen Steintypen ergaben sich nur gering unterschiedliche Beurteilungen hinsichtlich E-Modul (Deflektion), lastverteilender Wirkung und bleibender Deformation. Generell können jedoch die neuen Pflastersteine folgendermaßen gereiht werden:
 - ▶ Uni-Optiloc im maschinenverlegbaren Verband (höhere strukturelle Tragfähigkeit).
 - ▶ Uni-Priora-Rechteck im Fischgrätverband,
 - ▶ Uni-Priora ohne Unterschied des Verlegemusters (niedrigere strukturelle Tragfähigkeit).
3. Unabhängig von der genannten Reihenfolge verhielten sich alle untersuchten Verbundpflastersteine besser als 80 mm dicke rechteckige Steine im Fischgrätverband.
4. Es ergab sich kaum ein signifikanter Unterschied zwischen den E-Moduln der Normal- und der Öko-Version der Uni-Priora-Steine. Dies bedeutet, dass trotz ihrer breiteren Fugen kein struktureller Nachteil durch die Verwendung solcher Ökosteine entsteht.
5. Für die meisten praktischen Ingenieur Anwendungen können die verschiedenen Formen der Uni-Priora-Steine als gleichwertig angesehen werden.
6. Es können typische Werte für die E-Moduln der Pflasterflächen angegeben werden. Diese Werte stellen wichtige Eingangsgrößen für die Bemessung von Pflasterbefestigungen dar. Die Verwendung dieser Werte ist den ungeprüften Annahmen vorzuziehen, die viele Bemessungsmethoden von Pflasterflächen benötigen und hilft, viele der bisher mit der Analyse von Betonsteinpflastern verbundenen Unsicherheiten zu überwinden.

Schließlich ist es wichtig festzustellen, dass diese Untersuchungsergebnisse eine einmalige Gelegenheit der quantitativen Bewertung des Verhaltens von Pflasterflächen darstellen, die bisher nicht verfügbar war. Dies ergab sich durch die Möglichkeit, die Pflastersteine unabhängig von anderen Befestigungsmaterialien oder Unterlagen zu prüfen und zu charakterisieren. Die hier angegebenen Modulwerte können deshalb als sehr realistische Eingangswerte für die Analyse bzw. Bemessung von Betonpflasterbefestigungen verwendet werden ohne die Unsicherheiten, die mit früheren Methoden zur Bestimmung der lastverteilenden Wirkung von Pflastersteinen verbunden waren.

LITERATUR/REFERENCES

- [1] Shackel B. (1996). Handbuch Betonsteinpflaster – Bemessung, Konstruktion, Ausführung. Beton Verlag, Düsseldorf.
- [2] Shackel B., Winarno and O'Keeffe L. (1993) Concrete Block Paving Tested as Articulated Slabs. Proc. 5th Int. Conf. on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue Univ.
- [3] Krass K. and Koch C. (1999). Pflasterkonstruktionen unter realitätsnaher Belastung. Betonwerk + Fertigteil-Technik, Vol. 64 No 9.
- [4] Shackel B.; Kaligis J. O; Muktiarto Y. and Pamudji. (1996) Infiltration and Structural Tests of Permeable Eco-Paving. Proc 5th International Conf. on Concrete Block Paving. Israel, 1996.
- [5] Shackel B. (1999) The Resilient Modulus Of Paving Stones. Betonwerk+ Fertigteil-Technik, Vol. 64 No 9.
- [6] Shackel B. (1992) Computer Methods for Segmental Concrete Pavement Design Proc. Workshop on Concrete Segmental Paving. 16th Conf. Australian Road Research Board, Perth.

Future outlook

The tests reported here have shown that the deflection response of a mat of paving stones to load was predominantly elastic.

The tests then demonstrated that:

1. For a given stone thickness, the resilient modulus of the paving stones depended primarily upon the stone shape.
2. Slightly different rankings of the paving stones were obtained in terms of modulus (deflection), load distributing capacity and residual deformation. However, overall, the new paving stones could be ranked as follows:

▶ Uni-Optiloc in machine bond (higher structural capacity)

▶ Uni-Priora Rechteck in herringbone bond

▶ Uni-Priora in any bond. (lower structural capacity).

3. Irrespective of their ranking all of the paving stones performed better than 80 mm rectangular paving stones laid in herringbone bond.

4. There was little significant difference between the moduli of normal and ecological versions of the Uni-Priora stones. This implies that there is no structural disadvantage in using such ecological stones despite their wide joints.

5. For most practical engineering purposes the various forms of Uni-Priora could be treated as being equally effective.

6. Typical modulus values for the paving stones have been given. These values provide fundamental inputs for the design of concrete block pavements. The use of such values is preferable to the untested assumptions that many block pavement design methods require and overcomes many of the uncertainties hitherto associated with the analysis of concrete block surfaces.

Finally, it is important to recognize that the test data provide an unique perspective on the quantitative evaluation of paver performance that has not been available before. This arises because the tests enabled the paving stones to be tested and characterized in isolation from any other paving materials or structures. The values of modulus reported here can therefore be used with confidence in the analysis or design of concrete block pavements without some of the uncertainties that have been associated with previous methods of determining the load distributing capacity of paving stones.

Brian Shackel/Sydney/Australia; Johann Litzka, M. Zieger, Vienna/Austria