

## Einsparung von hochwertigen Dammbaustoffen durch die Erhöhung der Tragfähigkeit von direkt befahrenen Schüttungen mit Geokunststoffen

FA 5.140

Forschungsstelle: Technische Universität München, Zentrum Geotechnik (Prof. Dr.-Ing. N. Vogt)

Bearbeiter: Vogt, S. / Bräu, G.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Februar 2011

### 1 Aufgabenstellung

Bei der Errichtung von untergeordneten Verkehrswegen (z. B. Wald- und Wirtschaftswege) sowie zeitlich begrenzt zu nutzenden Wegen, welche etwa im Rahmen von Baumaßnahmen oder während großer Veranstaltungen notwendig sind, wird meist aufgrund wirtschaftlicher Randbedingungen auf eine Befestigung der oberen Tragschicht aus Asphalt oder hydraulischen Bindemitteln verzichtet. Ist der Untergrund nicht ausreichend tragfähig, so ist die Höhe der ungebundenen Tragschicht anzupassen, damit die auf dem wenig tragfähigem Untergrund wirkenden Spannungen reduziert werden. Um eine sichere Lastausbreitung unter der Verkehrslast sowie eine gewisse Eigenstabilität des Korngerüsts zu garantieren, wird als ungebundenes Tragschichtmaterial meist ein grobkörniges, frostsicheres und oft scharfkantiges (gebrochenes Material) sowie in seiner Kornverteilung weit abgestuftes Gemisch aus Gesteinskörnungen verwendet. Dieses Tragschichtmaterial wird mittels geeigneter Technik verdichtet, um einen möglichst steifen Verbund des Kornsystems zu erreichen, was für die Tragfähigkeit von entscheidender Bedeutung ist.

Ferner hat die Praxis gezeigt, dass durch den Einsatz von Geokunststoffen, welche zwischen dem Untergrund und der Tragschicht eingebaut werden, die Tragfähigkeit unter bestimmten Randbedingungen deutlich verbessert wird. Zudem kann die Befahrbarkeit von Verkehrswegen mit ungebundenen Tragschichten verbessert bzw. verlängert werden. Je nach Randbedingungen, welche vor allem aus dem Untergrund, dem Tragschichtmaterial sowie der einwirkenden zeitlich veränderlichen Last bestimmt werden, kann eine große Wirksamkeit der Geokunststoffeinlage erreicht werden, was sich in einer Reduzierung der Verformung unter einer bestimmten Last ausdrücken lässt. Durch den richtigen Einsatz von Geokunststoffen kann somit die Höhe der ungebundenen Tragschicht zum Teil erheblich verringert werden, was ökologische sowie ökonomische Vorteile mit sich bringt.

Bei der Dimensionierung von ungebundenen Tragschichten mit einer Lage aus Geokunststoff wird bisher meist empirisch vorgegangen. So kann während der Baumaßnahme die Tragschichthöhe so lange erhöht werden, bis unter einer bestimmten Verkehrslast die Verformungen als tolerierbar bewertet werden. Weiter kann in einer Übertragung aus Erfahrungswerten eine Tragschichthöhe gewählt werden, welche in einer konservativen Abschätzung eine ausreichende Tragfähigkeit vermuten lässt. Zudem gibt es einige meist auf analytischen Lösungen basierende Modellvorstellungen, welche das mechanische Tragverhalten zwischen Untergrund, Geokunststoff und Tragschicht beschreiben. Diese Modelle basieren jedoch auf starken Vereinfachungen, welche die Verformungswiderstände des weichen Untergrunds, das Materialverhalten des Geokunststoffes sowie des Tragschichtmaterials umfassen. Zeitabhängige Prozesse, die aus einer meist zyklisch wirkenden Verkehrslast und den komplexen sowie gekoppelten Vorgängen, welche das Materialverhalten des weichen Untergrunds maßgebend bestimmen, werden nicht weiter erfasst. Der Effekt, der aus einer geeigneten Verdichtung herrührenden Verbund-

wirkung des Korngerüsts der Tragschicht unter sehr geringen vertikalen Effektivspannungen sowie Einflüsse, welche aus einer mehr oder weniger starken Abhängigkeit der Verformungswiderstände vom Sättigungsgrad der Böden herrühren, können bisher nur grob umschrieben werden, sind aber nicht mit Modellen prognostizierbar. Aufgrund der Fülle von Einflussparametern und der Komplexität der Interaktion zwischen Untergrund, Geokunststoff und Tragschicht können die publizierten Berechnungsverfahren in der Baupraxis nicht allgemein angewendet werden.

Zum besseren Verständnis des Tragverhaltens wurden international eine Reihe von experimentellen Untersuchungen vorangetrieben, welche modellmaßstäbliche Versuche und größere Freifeldversuchsstrecken umfassten. Eine große Schwierigkeit, welche mit einer allgemeingültigen Beschreibung des Tragverhaltens verbunden ist, besteht darin, dass oft Randbedingungen, unter welchen die experimentellen Versuchsreihen stattgefunden haben, nicht oder nur sehr ungenau gemessen bzw. beschrieben werden. Dies betrifft vor allem den Mangel an Beschreibungen und gut dokumentierten Referenzversuchen, welche die Beschaffenheit sowie das mechanische Verhalten des weichen Untergrunds, der eingesetzten Geokunststoffe sowie des Tragschichtmaterials behandeln. Zum anderen berücksichtigen viele Untersuchungen nur jeweils einzelne Aspekte des Tragverhaltens oder beschränken sich in den Versuchsreihen auf bestimmte Produktgruppen oder Hersteller von Geokunststoffen. Ein allgemein anerkanntes sowie auf unterschiedliche Randbedingungen übertragbares Prognosemodell und eine ganzheitliche Betrachtung und Analyse von experimentellen Untersuchungen des Tragverhaltens von ungebundenen Tragschichten mit einer Geokunststoffeinlage liegt bisher nicht vor. Aus diesem Grund wurde mit der Forschungsarbeit ein fundierter Beitrag geleistet, mit dem es möglich sein soll, durch entsprechend dokumentierte experimentelle Untersuchungen unter verschiedenen Randbedingungen wesentliche Einflussparameter genauer und konsistenter in zukünftigen Berechnungsmodellen erfassen zu können.

### 2 Untersuchungsmethodik

Eine Systemanalyse mittels numerischer Berechnungsmethoden kann die Wirkungsweise einer Geokunststofflage zwischen dem weichen Untergrund und der ungebundenen Tragschicht verdeutlichen. Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden hierzu die Möglichkeiten von Finite Elemente-Programmen und Diskrete Elemente-Programmen untersucht.

In allen Berechnungen zeigte sich, dass durch die Einlage eines Geokunststoffes die Scherbeanspruchung des Untergrunds reduziert wird. Parallel dazu werden die Vertikalspannungen infolge der Verkehrslast in einem größeren Bereich auf die Oberfläche des weichen Untergrunds verteilt. Horizontalspannungen in der Tragschicht werden zum größten Teil durch die Geokunststoffzwischenlage aufgenommen. Die Tragfähigkeitserhöhenden und setzungsreduzierenden Effekte durch eine Bewehrungsfunktion des Geokunststoffes nehmen mit zunehmender Tragschichthöhe und zunehmender Tragfähigkeit des Untergrunds rasch ab. Die Systemanalyse zeigte, dass bei aus Fahrzeugen üblichen Lasten ab einer undrainierten Scherfestigkeit von ca. 60 kN/m<sup>2</sup> bzw. einer Tragschichtdicke von ca. 60 cm eine Bewehrungsfunktion nicht mehr relevant ist. Die Steifigkeit des Geokunststoffes erscheint als der Parameter in der Simulation der Geokunststoffzwischenlage, der die Effektivität des Gesamtsystems am stärksten beeinflusst. Allerdings nimmt der prozentuale Einfluss Geokunststoffsteifigkeit mit steigenden Werten rasch ab, was den Einsatz sehr dehnsteifer

Geokunststoffe zur Traglaststeigerung als unwirtschaftliche Lösung erscheinen lässt. Eine größere Verankerungslänge zur Übertragung der Zugspannungen im Geokunststoff auf den Boden scheint keinen wesentlichen Einfluss auf das Tragverhalten zu haben. Vielmehr erfolgt die Kraftübertragung in einem vergleichsweise lokalen Bereich um den Lasteintragsbereich.

Es zeigte sich, dass die Beschreibung eines sehr gering tragfähigen Untergrunds mit dem Stoffmodell Mohr-Coulomb nur zur Abschätzung der Traglast herangezogen werden kann, allerdings kaum Aussagen zu auftretenden Setzungen möglich sind. Hier scheint der Einsatz von Stoffmodellen, welche realistischere Prognosen des Bodenverhaltens sowohl der Tragschicht als auch des weichen Untergrunds geben können, sinnvoll. So ist die Möglichkeit der Wiedergabe von sich akkumulierenden plastischen Verformungen unter einer zyklischen Last mit einem elasto-plastischen Stoffmodell (z. B. MMC-Modell) nicht möglich. Es existieren jedoch Modelle, mit denen es prinzipiell möglich ist, das Bodenverhalten unter zyklischer Beanspruchung zu simulieren. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass mit steigender Komplexität des Stoffmodells die benötigte Rechenzeit stark ansteigt. Die Relevanz langer Berechnungszeiten ist insbesondere bei der Simulation mehrerer zyklischer Belastungsvorgänge von großer Bedeutung.

### 3 Versuchstechnische Untersuchungen

#### Modellversuche

Um die wesentlichen Einflussgrößen des Systems weicher Untergrund - Geokunststoff - ungebundene Tragschicht ermitteln zu können, wurde aufbauend auf im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten numerischen Berechnungen ein Versuch im Modellmaßstab konzipiert. Mit der Durchführung von modellhaften Belastungsversuchen wurde das Ziel verfolgt, unter möglichst genau eingestellten bzw. gemessenen Randbedingungen Einflussparameter erfassen zu können. Dazu wurde etwa der weiche Untergrund homogen aufbereitet und Scherfestigkeit, Wassergehalt sowie Dichte gemessen. Der Geokunststoff wurde kontrolliert eingebaut und die Tragschicht unter einheitlichen Bedingungen verdichtet. Die Belastung erfolgte je nach Versuchsreihe statisch monoton bzw. quasistatisch zyklisch durch einen kreisrunden Laststempel. Als Bewertungskriterium zur Erfassung der Leistungsfähigkeit des Tragsystems wurde die spannungsabhängige Setzung in den Versuchen mit statisch monotoner Beanspruchung bzw. die von der Lastwechselanzahl abhängige Setzung in den quasistatisch zyklischen Versuchen herangezogen.

In zwei Untersuchungsblöcken im Rahmen von Voruntersuchungen wurden zunächst entscheidende Fragen zur Verankerungslänge und der Tragfähigkeit des Tragschichtmaterials unabhängig vom Untergrund geklärt. Mit diesen Ergebnissen konnte zum einen sicher gestellt werden, dass aufgrund der offensichtlich nur sehr lokal um den Lasteintragsbereich erforderlichen "Verankerungsmechanismen" des Geokunststoffes die Behälterabmessungen als ausreichend groß gewählt wurden. Zum anderen war die Auswahl eines geeigneten Tragschichtmaterials möglich, welches im Bereich der möglichen Verdichtungsarbeit und erreichbaren Trockendichten bei konstantem Wassergehalt genügend große Widerstände gegenüber der Belastung aus dem Laststempel bot. Ferner konnte festgestellt werden, dass allein die Auswahl des Tragschichtmaterials einen sehr großen Einfluss auf das Systemtragverhalten hat. Eng gestufte Mittel- und Grobsande oder Kiese weisen zwar kaum "störende" Einflüsse aus Wassergehaltsschwankungen auf (ungewollte Widerstände durch Austrocknung) bieten jedoch gegenüber dem Laststempel nur geringe Eindringwiderstände. Weit gestufte grobkörnige Böden mit

einem höheren Feinkornanteil (bis 15 M.-%) können vergleichsweise hohe Tragfähigkeiten erreichen. Bei diesem Boden muss jedoch der Wassergehalt über die Dauer der Versuchsdurchführung konstant gehalten werden, da ein Austrocknen zu einem im Versuch ungewollten Festigkeitsgewinn führen würde. Umgekehrt kann die Wasseraufnahme eine Tragschicht mit höherem Feinkornanteil aufweichen, was größere Setzungen unter der zyklischen Belastung oder geringere Tragfähigkeiten unter der statisch monotonen Belastung zur Folge haben würde.

Den Hauptteil der Untersuchungen bildeten insgesamt 72 Versuche mit einer statisch monotonen Belastung und 42 Versuche mit einer quasistatisch zyklischen Belastung. Zunächst wurden statische Tragfähigkeiten in Abhängigkeit von der Verformung ermittelt. Aus dieser Auswertung konnten bereits wesentliche Erkenntnisse zum prinzipiellen Tragverhalten und wesentliche Abhängigkeiten herausgearbeitet werden. So ist zu erkennen, dass bei entsprechend geringen Untergrundfestigkeiten die Einlage eines Geokunststoffes eine hohe Wirksamkeit erzeugt. Insbesondere bei großen Verformungen und geringen Tragschichtthöhen  $h_{BC} / D = 0,5$  konnten Steigerungen der Traglast um bis zu 300 % erreicht werden. Mit steigender Untergrundfestigkeit und größeren Tragschichtthöhen reduziert sich die Wirksamkeit des Geokunststoffes deutlich. Bei einer Tragschichthöhe von  $h_{BC} / D = 1,5$  und undrained Scherfestigkeiten des weichen Untergrunds von  $c_u > 30$  kPa ist kein Einfluss der Geokunststoffzwischenlage mehr erkennbar. Ebenso nimmt der tragfähigkeitserhöhende Einfluss der Geokunststoffe mit vergleichsweise geringen Setzungen an der Oberfläche der Tragschicht ab. Im Extremfall einer großen Tragschichthöhe und hohen Untergrundfestigkeiten werden alle maßgebenden Verformungsanteile, welche zu einer Setzung führen in der Tragschicht erzeugt.

Um den Einfluss einer zyklischen Lasteinwirkung auswerten zu können, wurden 42 Einzelversuche unternommen. Ausgewertet wurden Setzungen nach 100 und 100 000 Zyklen. Die zyklische Last wurde dabei konstant bei  $q_c = 110$  kPa eingestellt. Unter dieser Last konnten Einflüsse aus einer Geokunststoffzwischenlage ab hohen Untergrundfestigkeiten  $c_u > 30$  kPa und großen Tragschichtthöhen  $h_{BC} / D = 1,5$  nicht mehr festgestellt werden. Bei der Auswertung der Setzungen unter der zyklischen Last zeigt sich damit grundsätzlich ein konsistentes Ergebnis im Bezug auf die Resultate der Versuche unter statisch monotoner Lastaufbringung. Bei geringen  $c_u$ -Werten des Untergrunds sowie vergleichsweise geringen Tragschichtthöhen  $h_{BC} / D$  kann jedoch durch die hohe Intensität der Spannungen in der weichen Bodenschicht eine Konsolidation bzw. Verdichtung der Bodenschicht unter der zyklischen Last festgestellt werden. So wurden nach der Beanspruchung durch 100 000 Zyklen verglichen zu den Anfangsbedingungen deutlich geringere Wassergehalte und höhere undrained Scherfestigkeiten im Bereich der Lasteintragsung gemessen. Die sich bei diesen Systemen einstellenden Setzungen generieren sich überwiegend in Folge der ersten 100 Zyklen. Danach überwiegt offensichtlich die Konsolidation des weichen Bodens und die Setzungsinkremente reduzieren sich mit zunehmender Zyklenanzahl.

#### Großmaßstäbliche Belastungsversuche

##### (Plattendruckversuche unter zyklischer Belastung)

Mit den durchgeführten großmaßstäblichen Belastungsversuchen konnten wesentliche Informationen über das Trag- und Verformungsverhalten von Tragschichtaufbauten, welche realistische Abmessungen und Zwischenlagen bestehend aus marktüblichen Geokunststoffen besitzen, gewonnen werden. Zur Durchführung der Versuche stand eine 4,0 m lange, 3,3 m breite und 1,5 m tiefe Grube aus Stahlbeton innerhalb einer beheizten und witterungsgeschützten Halle zur Verfügung. Die

Belastung erfolgte quasistatisch zyklisch über eine kreisrunde Lastplatte  $\varnothing$  300 mm, welche die Lasten auf die Oberfläche der Tragschicht übertrug. Eingestellt wurden die zyklischen Spannungen zu  $q_c = 350$  kPa,  $q_c = 450$  kPa und  $q_c = 550$  kPa. Dabei schwankte die Festigkeit des weichen Untergrunds durch die unter gleichen Bedingungen stattfindende Aufbereitung des sehr homogenen Ausgangsmaterials nur in sehr engen Grenzen. Insgesamt wurden in 5 Versuchsdurchgängen 25 einzelne Belastungsversuche mit bis zu 100 000 Zyklen durchgeführt. Dabei wurde in 4 Versuchsreihen eine Untergrundfestigkeit von  $c_u \approx 30$  kPa eingestellt. Um den Einfluss einer sich ändernden Festigkeit des weichen Untergrunds zumindest ansatzweise analysieren zu können, wurde in einer Versuchsreihe eine Festigkeit von  $c_u \approx 60$  kPa erreicht.

Ziel der Untersuchungen war es, die Erkenntnisse der modellmaßstäblichen Versuche auf realistische Baugrund- und Baustellensituationen mit einer sehr viel höheren Belastung des Tragschichtaufbaus zu übertragen. Hierzu wurde primär sowohl der Einfluss einer Geokunststoffzwischenlage als auch der Einfluss der Tragschichthöhe untersucht. In den jeweiligen Versuchsreihen wurde dementsprechend ein relativ dehnweicher Geovliesstoff, ein Geogitter sowie ein Verbundprodukt, das vorab getrennt untersuchten Geovliesstoffes und Geogitters, zwischen dem weichen Untergrund und dem Tragschichtmaterial eingebaut. Als Vergleich hierzu wurden Versuche des jeweiligen Systemaufbaus ohne eine Geokunststoffzwischenlage durchgeführt und vergleichend ausgewertet. Die Tragschichthöhe wurde in jedem Versuchsdurchgang variiert und lag entsprechend dem Analysebereich der modellmaßstäblichen Belastungsversuche bei Werten von  $h_{BC} = 0,5 \cdot D$ ,  $h_{BC} = 1,0 \cdot D$  und  $h_{BC} = 1,5 \cdot D$ .

Ausgewertet wurden primär die zyklusabhängigen Setzungen der kreisrunden Lastplatte. Um kleinere nicht zu vermeidende Schiefstellungen der Lastplatte in der Berechnung der mittleren Setzung berücksichtigen zu können, wurden diametral 2 Wegsensoren montiert. Dennoch musste insbesondere bei weichen Tragschichtaufbauten der Versuch zum Teil bereits nach wenigen Zyklen vorzeitig abgebrochen werden, da die Setzungen der Lastplatte sehr stark anstiegen. In Abhängigkeit von der Tragschichthöhe  $h_{BC}$  und der Größe der zyklischen Spannungen  $q_c$  stellten sich bereits nach wenigen Zyklen große Verformungen der Tragschicht unter der Lastplatte ein. So musste z. B. ein Versuch eines Systems ohne Geokunststoffeinlage mit einer Tragschichthöhe von  $h_{BC} = 0,5 \cdot D$  und einer Spannung von  $q_c = 450$  kPa bereits nach 10 Zyklen abgebrochen werden, da eine Setzung von mehr als  $0,5 \cdot D$  erreicht war. Auch bei mächtigeren Tragschichthöhen von  $h_{BC} = 1,0 \cdot D$  oder  $h_{BC} = 1,5 \cdot D$  oder geringeren zyklischen Spannungen von  $q_c = 350$  kPa konnte das System nur mit wenigen 100 Zyklen beansprucht werden. Im Vergleich hierzu konnten die Setzungen durch den Einbau einer Geokunststoffzwischenlage deutlich reduziert werden.

Im Falle einer Untergrundfestigkeit von  $c_u \approx 60$  kPa erreichten alle untersuchten Systeme mit einer Geokunststoffzwischenlage bestehend aus einem Geovliesstoff die angestrebten 100 000 Lastwechsel. Die Setzungen am Ende dieser Beanspruchung nahmen mit zunehmender Tragschichthöhe und geringerer Belastung  $q_c$  ab. In allen Fällen stellte sich bei einer Untergrundfestigkeit von  $c_u \approx 60$  kPa eine zyklische Beruhigung der Verformungen ein. Das bedeutet, dass die Zunahme der Setzungen mit größer werdender Lastwechselzahl innerhalb eines logarithmischen Inkrementes der Lastwechselzahl abnimmt. Dieses Verhalten war im Falle einer Untergrundfestigkeit von  $c_u \approx 30$  kPa nur für die Systeme mit einer relativ steifen Geokunststoffzwischenlage bestehend aus dem untersuchten Geogitter oder dem Verbundstoff aus Geogitter und Geovliesstoff feststellbar. Die geringsten Setzungen wurden bei den Systemen mit einer Geokunststoffzwischenlage aus dem Verbundstoff

bestehend aus dem Geogitter und dem Geovliesstoff festgestellt. Die absoluten Setzungsmaße lagen hier für eine genügend große Anzahl an Lastwechsel stets unter denen der anderen Systeme. Interessant ist weiter, dass sich für manche Randbedingungen ( $h_{BC} = 0,5 \cdot D$  und  $q_c = 350$  kPa,  $h_{BC} = 1,0 \cdot D$  und  $q_c = 450$  kPa bzw.  $h_{BC} = 1,5 \cdot D$  und  $q_c = 550$  kPa) und insbesondere im Bereich einer kleinen Lastwechselanzahl kaum Unterschiede zwischen den 3 Systemen mit verschiedenen Geokunststoffzwischenlagen erkennen ließen. Größere Unterschiede ergaben sich in diesen Fällen erst ab einer höheren Anzahl an Lastwechsel in einem Bereich von  $> 1\ 000$ .

### Überfahrversuche

Mit Überfahrversuchen im Feld sollten unter realen Baugrund- und Baustellenbedingungen Erkenntnisse über die Effektivität verschiedener Geokunststoffzwischenlagen, um Tragschichtmaterial einzusparen, gewonnen werden. Hierzu wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens zwei Überfahrversuche durchgeführt. Die jeweiligen Randbedingungen, unter welchen die Überfahrversuche durchgeführt wurden, stellten sich jedoch aus verschiedenen Gründen als nicht günstig dar, um Unterschiede im Tragverhalten verschiedener Geokunststoffprodukte erkennen zu können. Dies macht die Auswertung der Versuchsergebnisse im Rahmen der Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens problematisch. Aus diesem Grunde wurden im Abschlussbericht nur Auszüge der vorhandenen Versuchsdatenbasis dargestellt und anhand dieser die wesentlichen Probleme der Randbedingungen, der Durchführung sowie der Auswertung und Interpretation der Überfahrversuche verdeutlicht.

Zusammenfassend kann für den ersten im Jahr 2006 durchgeführten Überfahrversuch festgestellt werden, dass im Bezug auf die Festigkeit des weichen Untergrunds mit dem an dieser Stelle beschriebenen Feldversuch die Anwendungsgrenze des Systems einer direkt befahrenen ungebundenen Tragschicht mit einer vergleichsweise dünnen Höhe erreicht bzw. überschritten wurde. Zwar konnten Bereiche der Versuchsstrecke, welche eine Geokunststoffzwischenlage aufwiesen, mit einer 12 Tonnen schweren Walze überfahren werden, jedoch bildeten sich bereits infolge der ersten Überfahrt des Walzenzuges deutliche Spurrillen in einer Größenordnung von 20 cm aus. Eine ordnungsgemäße Verdichtung des Tragschichtmaterials war dadurch nicht mehr möglich. Erst nach einer Erhöhung der Tragschichthöhe auf 60 cm und im Zusammenhang mit den sehr starken Vorverformungen, welche eine unmittelbare Aktivierung der Geokunststofffestigkeit ermöglichten, war eine ausreichende Verdichtung der Tragschicht möglich. Nach dieser Ertüchtigung des Versuchsfeldes wurde der Streckenabschnitt durch Lkw-Überfahrten beansprucht. Ferner wurden statische und dynamische Plattendruckversuche durchgeführt. Weder aus der Spurrillenbildung nach etwa 500 Überfahrten noch aus den gemessenen Verformungsmoduln konnten Unterschiede in der Leistungsfähigkeit einzelner Versuchsfelder festgestellt werden.

Eine zweite Versuchsstrecke, welche im Rahmen des Baus eines Wirtschaftsweges parallel zu einer Ausbaustrecke der Bahn im Jahr 2008 errichtet werden konnte, zeichnete sich vor allem durch vergleichsweise hohe Festigkeiten des weichen Untergrunds aus. Die auf der Oberfläche des "weichen" Untergrunds gemessenen Verformungsmoduln  $E_{v2}$  in einer Größenordnung von 15 MN/m<sup>2</sup> lassen sogar für wenige Überfahrten in einer trockenen Witterungsperiode eine direkte Befahrung des Untergrunds durch Lkw vermuten. Jedoch kann insbesondere die Befahrbarkeit stets infolge von Niederschlägen stark reduziert werden. Die Tragfähigkeit wurde in zwei Durchgängen mittels statischer Plattendruckversuche untersucht. Bereits bei einer Tragschichthöhe von  $h_{BC} \approx 30$  cm konnten keine systema-

tischen Unterschiede in der Wirksamkeit der einzelnen Tragschichtaufbauten in den Versuchfeldern festgestellt werden. Auch bei einer höheren Spannung von 700 kPa unter der Lastplatte sind keine deutlichen bzw. interpretierbaren Unterschiede im Tragverhalten der verschiedenen Geokunststoffprodukte zu erkennen. Zur Herstellung des Wirtschaftsweges war eine planmäßige Tragschichthöhe von  $h_{BC} = 60$  cm vorgesehen. Auf diesem Niveau wurden erneut statische Plattendruckversuche durchgeführt und ausgewertet. Da bereits bei einer geringeren Tragschichthöhe von  $h_{BC} \approx 30$  cm keine Unterschiede in der Effektivität der einzelnen Versuchsfelder festzustellen waren, bestätigen die Messdaten der Plattendruckversuche, dass bei vergleichsweise großen Tragschichtdicken und einer hohen Festigkeit des Untergrunds die Wirksamkeit einer Zwischenlage aus Geokunststoffen stark reduziert wird. Dieses Ergebnis wurde durch die Auswertung der Spurrillenbildung nach etwa 2 000 Überfahrten bestätigt.

#### 4 Zusammenfassung

Untergeordnete Forst- und Wirtschaftswege, sowie temporär zu nutzende Straßen (insb. Baustraßen) werden meist mit einer ungebundenen Tragschicht aus grobkörnigem Material hergestellt. Erfahrungen der Baupraxis sowie verschiedene versuchstechnische und theoretische Forschungsarbeiten zeigen, dass durch die Verwendung von Geokunststoffen die Leistungsfähigkeit der Tragschicht verbessert werden kann. Die Höhe der Tragschicht, welche oft aus hochwertigen weitgestuften Kiesen mit einer scharfkantigen Kornform besteht, kann somit entsprechend reduziert werden, was insbesondere baubetriebliche und wirtschaftliche Vorteile bieten kann - aber auch einen Beitrag zur Ressourcenschonung leistet. Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit war es, im Hinblick auf die verschiedenen Wirkungsweisen von Geokunststoffen und den entsprechenden Bauprodukten eine Bewertung der Effektivität von Geokunststoffzwischenlagen in ungebundenen Tragschichten zu ermöglichen. Hierbei sollte vor allem mit experimentellen Untersuchungen eine wissenschaftlich fundierte Datenbasis zum Tragverhalten unter verschiedenen Randbedingungen, die insbesondere durch die Verformungswiderstände des weichen Untergrunds, des Geokunststoffes und der ungebundenen Tragschicht gegeben sind, geschaffen werden.

Zur Planung experimenteller Untersuchungen wurde der Stand der Wissenschaft und der Erfahrungen der Baupraxis hinsichtlich der Forschungsziele bewertet. Hierbei wurde insbesondere im Bezug auf Belastungsversuche festgestellt, dass zum einen aufgrund wenig dokumentierter Randbedingungen oder hinsichtlich der jeweiligen Untersuchungsziele eine Übertragung der Ergebnisse auf die hier gestellte Fragestellung selten möglich ist. Zum anderen wurden Möglichkeiten und Grenzen von modernen Berechnungsmethoden mittels numerischer Rechenprogramme im Bezug auf die Möglichkeit einer theoretischen Analyse des Tragverhaltens aufgezeigt.

Den Hauptteil der aktuellen Forschungsarbeit stellten systematische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten ungebundener Tragschichten mittels modell- und großmaßstäblicher Belastungsversuche sowie die Durchführung zweier Überfahrversuche im Feld dar. In verschiedenen Graden der Abstrahierung wurde somit das Verhalten von monoton statisch, quasistatisch zyklisch sowie mit realen Verkehrslasten beanspruchten Tragschichten untersucht. Hierbei konnten mit den unter kontrollierten Randbedingungen durchführbaren modellmaßstäblichen Versuchen insbesondere Einflüsse der Festigkeit und Steifigkeit des weichen Untergrunds sowie der Tragschichtdicke grundlegend dargestellt werden. In den Überfahrversuchen konnten aufgrund ungünstiger Randbedingungen hingegen nur Grenzen der Wirksamkeit von Geokunststoffzwischenlagen analysiert werden. Die großmaßstäblichen Be-

lastungsversuche nehmen eine Mittelstellung zwischen einer zu starken Abstrahierung und den Unwägbarkeiten der Freifeldversuche ein und stellen eine effektive Alternative dar, um das Verhalten marktüblicher Geokunststoffprodukte in ungebundenen Tragschichtaufbauten über weichem Untergrund untersuchen zu können.

Insgesamt wurden 114 Versuche im Modellcharakter und 25 großmaßstäbliche Belastungsversuche durchgeführt. In der Auswertung wurde vor allem der Einfluss:

- der Festigkeit des Untergrunds,
- der Höhe der Tragschicht,
- des Geokunststoffes im Hinblick auf seine Funktion und mechanischen Eigenschaften,
- der zeitabhängigen zyklischen Last in Bezug auf die Konsolidation und Verdichtung des weichen Untergrunds

berücksichtigt.

Durch die umfangreichen Versuchsreihen konnte der leistungssteigernde Einfluss einer Zwischenlage aus Geokunststoffen fundiert bewertet werden. Dabei war insbesondere im Bereich vergleichsweise geringer Untergrundfestigkeiten und geringen Tragschichthöhen eine große Wirksamkeit festzustellen. Entsprechend kann in diesem Bereich die Höhe einer Tragschicht durch die Einlage eines Geokunststoffes reduziert werden. Unter Belastungen des Gebrauchszustandes konnten Setzungen deutlich reduziert werden. Die Ausbildung von bleibenden Verformungen unter einer zyklischen Belastung konnte unter Verwendung von Geokunststoffzwischenlagen insbesondere für eine große Anzahl von Lastwechseln im Vergleich zu Systemen ohne eine Geokunststoffzwischenlage verkleinert werden. Der Einfluss der Geokunststoffe verringerte sich jedoch mit steigender Untergrundfestigkeit stetig. So konnte z. B. in einem Überfahrversuch bereits für Verformungsmoduln des Untergrunds von  $E_{v2}$  zwischen 10 und 15 MPa keine leistungssteigernde Wirkung mehr festgestellt werden. Ferner ergaben sich bei Tragschichtdicken ab 45 cm bei üblichen an Lastkraftwagen des Bauverkehrs angelegten Beanspruchungen kaum Unterschiede in den sich einstellenden zyklusabhängigen Setzungen zwischen Systemen mit und ohne einer Geokunststoffzwischenlage.hfh

#### 5 Ausblick

Die in der Forschungsarbeit vorgestellten drei Arten von Belastungsversuchen weisen aufgrund ihrer unterschiedlichen Größe und des nötigen Aufwands zur Durchführung von Versuchen jeweils Vor- und Nachteile auf. Freifeldversuche können Baugrund- und Belastungssituationen am besten abbilden. Es ist jedoch aufgrund der Inhomogenität des Untergrunds und der zeitlichen Zwangspunkte während Baumaßnahmen kaum möglich, systematische Versuche unter vergleichbaren Randbedingungen durchzuführen. In kleinmaßstäblichen Versuchen können Randbedingungen kontrolliert eingestellt bzw. sehr genau gemessen werden. Jedoch ist sowohl die Größe der Versuchsanlage als auch das Niveau der Belastung nicht geeignet, um Geokunststoffprodukte der Baupraxis untersuchen zu können. Einen Kompromiss stellen die im Forschungsbericht ausführlich beschriebenen großmaßstäblichen Belastungsversuche (Plattendruckversuche unter zyklischer Belastung) dar. Die Versuchsdurchführung bietet die Möglichkeit der Unabhängigkeit von Witterungseinflüssen und zeitlichen Zwangspunkten aus dem Baubetrieb bei der Durchführung von Überfahrversuchen in situ. Insbesondere diese Unabhängigkeit macht den Einsatz spezieller Messtechnik, um z. B. Verformungen der Tragschicht oder etwa Spannungsänderungen im Untergrund analysieren

zu können, möglich und im Rahmen der Evaluierung von publizierten Modellvorstellungen, Berechnungsschemata und numerischen Finite Elemente-Berechnungen sinnvoll. Zur Prüfung der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Berechnungsansätze oder zur Entwicklung neuer Verfahren zur Prognose des Tragverhaltens bewehrter Tragschichten können aus den dokumentierten Untersuchungsreihen eine Vielzahl von zahlenmäßigen Ergebnissen und qualitativ beobachteten Verformungsmechanismen genutzt werden. Diese Datenbasis ist zudem von großem Vorteil, sobald zu ändernde oder neue Randbedingungen zu bewerten und dazu Versuchsreihen zu planen sind. Neben der Variation der Geokunststoffe sollten zukünftig Versuchsreihen stets durch statische Belastungsversuche mit einer vergleichsweise raschen Lastaufbringung ergänzt werden, um den Einfluss der zyklischen Belastung und zeitabhängigen Effekten (insb. Konsolidation) besser verstehen zu können. Weiter wäre die Variation der Festigkeit bzw. Steifigkeit des weichen Untergrunds über einen größeren Wertebereich zielführend, um Grenzen der Wirksamkeit verschiedener Geokunststoffe (bzw. deren Steifigkeiten, Festigkeiten und Wirkungsweise) besser abschätzen zu können. Die Tragschichthöhe sollte im Bezug auf die angestrebte Einsparung von hochwertigen Dammbaustoffen entsprechend den bisherigen Untersuchungen im Bereich vergleichsweise geringer Tragschichthöhen variieren. Dies kann zudem damit begründet werden, dass höhere Tragschichthöhen entsprechend den Ergebnissen der durchgeführten Versuche kaum zusätzliche Leistungssteigerungen erwarten lassen. Interessant wäre ferner die Prüfung der Effektivität von Tragschichthöhen aus gemischtkörnigen Materialien mit höherem Feinkornanteil oder hydraulisch gebundenen Tragschichten (Zementverfestigung). Hier zeigten sowohl die Auswertung der Literaturquellen und einige Vorversuchsreihen, dass erhebliche Potenziale zur Leistungssteigerung zu erwarten sind, was zwangsläufig zu einer Schonung der Ressourcen verschiedener Baustoffe führen würde.