

# Auswirkungen von Bewehrungslagen in den unteren Teilen eines Dammes im Hinblick auf die Beanspruchung des Untergrundes durch Verkehrslasten bei Straßen auf wenig tragfähigem Untergrund

FA 5.124

Forschungsstelle: Technische Universität München, Zentrum Geotechnik, Lehrstuhl und Prüfstelle für Grundbau, Boden- und Felsmechanik (Prof. Dr.-Ing. N. Vogt)

Bearbeiter: Bräu, G. / Lehmann, E.

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

Abschluss: Januar 2003

## 1. Aufgabenstellung

Der tragfähige Gesamtaufbau einer Straße auf wenig tragfähigem Untergrund muss so bemessen sein, dass die Verkehrslasten und die damit verbundenen Erschütterungen weder zu Verformungen der Fahrbahn führen noch den Untergrund zu langandauernden Verformungen anregen.

Um die dynamischen Auswirkungen der Verkehrsbelastung auf das Setzungsverhalten des Untergrundes zu minimieren, ist 1950 anhand von Erfahrungswerten die Empfehlung abgeleitet worden, einen tragfähigen Gesamtaufbau von mindestens 2 m einzuhalten.

Aus folgenden Gründen kann die Empfehlung in einigen Fällen unwirtschaftlich werden:

- geeignetes Schüttmaterial ist oft teuer und nicht immer einfach zu gewinnen,
- bei Straßen mit weitgehend geländegleicher Gradienten sind Dammkörperdicken von 2 m oft nur mit einem Bodenaustausch zu realisieren,
- ein Straßenkörper mit 2 m Gesamtaufbau kann infolge der hohen Belastung auf sehr setzungsempfindlichem Untergrund zu langdauernden Setzungen führen.

Aus diesen Überlegungen heraus stellt sich die Frage, ob es möglich ist, mit Hilfe eines Gesamtaufbaus geringerer Mächtigkeit, dafür jedoch mit gezielt gestaltetem Aufbau unter Einsatz von Geokunststoffen, die Lasten aus Verkehr ohne Beeinflussung des Untergrundes abzutragen. Insbesondere sollte recherchiert werden, inwieweit Erfahrungen mit Ersatzmaßnahmen gemacht wurden, durch die die Auswirkungen der Verkehrsbelastung auf den Untergrund vermindert werden können.

Unter Ersatzmaßnahmen werden Bauweisen verstanden mit

- Geokunststoffbewehrung des Straßenkörpers,
- verfestigten Bodenschichten zur Versteifung des Untergrundes oder des Dammkörpers,
- Leichtbaustoffen als Schüttmaterial zur Verringerung der statischen Belastung.

Ein wirtschaftlicher Vorteil wird durch diese Bauweisen allerdings nur dann erzielt, wenn auf einen umfangreichen Bodenaustausch verzichtet und der Straßendamm mittels Konsolidationsverfahren direkt auf den gering tragfähigen Untergrund geschüttet werden kann. In zahlreichen Forschungsvorhaben und Messprogrammen sind die bei dieser Bauweise auftretenden

Primär- und Sekundärsetzungen beobachtet und die Auswirkungen der Ersatzmaßnahmen auf Konsolidierung und Setzungsverhalten untersucht worden.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist, anhand einer Literaturstudie abzuklären, inwieweit sich Untersuchungen auch mit den Auswirkungen dynamischer Verkehrsbelastung auf das Gesamtsystem Damm und Ersatzmaßnahme beschäftigt haben. Anhand dieser Erfahrungen sollte geklärt werden, ob und wann eine Verringerung der tragfähigen Schicht auf unter 2 m möglich ist, sodass eine Beeinflussung des gering tragfähigen Untergrundes aus der zyklischen Verkehrsbelastung ausgeschlossen werden kann.

Die Zusammenstellung der Literatur soll einen Überblick über den Stand der Wissenschaft liefern, um weitere Forschungsprojekte darauf abstimmen zu können.

## 2. Vorgehensweise bei der Literaturrecherche

Bei dem vorliegenden Forschungsvorhaben handelt es sich vorrangig um eine Literaturrecherche. Die Recherche wurde mit Hilfe nationaler und internationaler bibliothekarischer Datenbanken sowie in den Bibliotheken der BAST und der TU München durchgeführt. Des Weiteren wurden die Beiträge von verschiedenen einschlägigen geotechnischen Kongressen mit verarbeitet. Durch Gespräche mit Fachleuten konnten verschiedene Sichtweisen und Erfahrungen zur Problemstellung bei der Recherche mit berücksichtigt werden. Zu nennen sind hier insbesondere die Diskussionen im Betreuungsausschuss der Bundesanstalt für Straßenwesen.

In den bibliothekarischen Datenbanken konnten einige Tausend Literaturhinweise recherchiert werden, aus denen sich ca. 500 Titel als relevant herausstellten. Aus diesen wurden mittels der Abstracts 177 ausgewählt und in die Auswertung einbezogen.

Die Schwerpunkte der Recherche wurden auf folgende Überlegungen und Inhalte abgestimmt:

- Zunächst wird auf die verschiedenen Bauverfahren auf gering tragfähigen Böden eingegangen, dabei insbesondere auf das Konsolidationsverfahren.
- Eine kurze Einführung in die Grundlagen der Schwingungs- und Wellentheorie soll die Wellenausbreitung im inhomogenen System Boden näher beleuchten.
- Ein Teil der Recherche befasste sich mit den Ursachen von Fahrzeugschwingungen und den daraus resultierenden dynamischen Lasten an der Straßenoberfläche.
- Die Zusammenstellung von Spannungsmessungen im Unterbau und Untergrund dient dazu, die Lastausbreitung im Untergrund bei unterschiedlichen Deckenaufbauten bzw. Fahrzeuggeschwindigkeiten infolge des überrollenden Fahrzeuges abzuschätzen.
- Der nächste Teil der Recherche sollte klären, inwieweit zyklische Belastungen, wie sie in den vorigen Abschnitten charakterisiert werden konnten, Auswirkungen auf das Verformungsverhalten von bindigen Böden haben. Schwerpunkt bildete die Suche nach zyklischen Triaxial- und Scherversuchen.

- Es folgt eine Beschreibung von Bauverfahren mit Geokunststoffen, verfestigten Bodenschichten und Leichtbaustoffen. Es war angestrebt, die Literaturrecherche auf Untersuchungen zu konzentrieren, die das Verhalten von zyklisch belasteten Straßendämmen, bei Gründung mit obigen Bauweisen, beschreiben. Allerdings hat sich gezeigt, dass dynamische Aspekte in der recherchierten Literatur kaum berücksichtigt werden. Daher ist vor allem auf die statischen Gesichtspunkte bei Dammgründungen eingegangen worden. Bei Geokunststoffanwendungen sind zusätzlich Untersuchungen zur Bewehrungswirkung in Zweischichtsystemen und Ergebnisse von dynamischen Laborversuchen in den Bericht mit eingeflossen.
- Einen Großteil der Recherche stellt die Zusammenstellung von Baumaßnahmen dar. Ziel war, anhand der gefundenen messtechnisch begleiteten Straßendämme eine Abschätzung vornehmen zu können, inwieweit sich die verschiedenen Gründungsarten auf das Langzeitverhalten von Straßendämmen unter zyklischer Last auswirken. Da sich Berichte bei Straßendämmen vor allem auf das Konsolidationsverhalten unter statischer Last beschränkt haben, sind zusätzlich Messungen an Bahndämmen mit aufgenommen worden.

Die Zusammenstellung aller gefundenen Baumaßnahmen, also auch derjenigen, die allein den statischen Belastungsfall behandeln, erfolgt in tabellarischer Form.

### 3. Ergebnisse der Literaturrecherche

Straßendämme auf gering tragfähigem Untergrund werden oft nach dem so genannten Konsolidationsverfahren direkt auf den Untergrund geschüttet. Die Konsolidationssetzungen sollen bis zum Einbau der Deckschichten abgeklungen sein. Es können allerdings auch nach Abschluss der Konsolidation zusätzliche Setzungen aus der zyklischen Verkehrsbelastung nicht ausgeschlossen werden.

Die Verkehrsbelastung wird in der Bodendynamik als transiente Belastung charakterisiert. Die Ausbreitung von Schwingungen erfolgt über Scher- und Kompressionswellen. Eine rechen-technische Simulation der sich abspielenden Reflexions- und Refraktionsvorgänge unter einer sich bewegenden Last im inhomogenen Halbraum ist sehr komplex.

Neben diesen dynamischen Effekten aus Fahrzeugschwingungen und -stößen spielt der zyklische Überrollvorgang eines Fahrzeugs eine Rolle hinsichtlich der Belastung des Untergrundes.

Primären Einfluss auf die Belastung des Untergrundes hat die Art des Straßenaufbaus. Wenn auf Grund eines gering dimensionierten Straßenaufbaus Lasten aus den Fahrzeugübergängen im Untergrund messbare Auswirkungen haben, muss für die Vorhersage eventuell auftretender Setzungen die Verkehrsbelastung mit den Parametern Anzahl und Frequenz der Fahrzeugübergänge, insbesondere des Schwerverkehrs, betrachtet werden.

Die Laboruntersuchungen über das Verformungsverhalten bindiger Böden zeigen, dass auch bei Frequenzen in der Größenordnung von wenigen Hertz bei ausreichend großen Lastamplituden Verformungen bis hin zum Versagen auftreten können. Der sich infolge der zyklischen Belastung einstellende Porenwasserdruck ist bei diesen Versuchen der maßgebende Parameter. Bei unvollständig dränierten Verhältnissen ist vor allem in der ersten Phase nach Belastungsbeginn eine Porenwasserdruckentwicklung zu beobachten, die mit einem Festigkeitsverlust und Setzungen verknüpft ist.

Berichte über die Auswirkungen von zyklischen Belastungen in der Gründungsebene von Straßendämmen existieren nur sehr selten. Auch über zyklisch belastete Straßendämme, die mit Hilfe von Geokunststoffen, verfestigten Bodenschichten oder Leichtbaustoffen gegründet worden sind, existieren nur wenige Veröffentlichungen, deren Ergebnisse in die nachfolgenden Aussagen einfließen.

Beim statischen Belastungsfall aus Dämmeigengewicht ist die Verwendung von Geokunststoffbewehrungen in der Dammsohle zur Verbesserung der Standsicherheit bei weichem Untergrund sinnvoll. Auch bei Zweischichtsystemen mit geringer Tragschichtdicke ist unter statischer Last eine tragfähigkeits-erhöhende Wirkung von Geokunststoffbewehrungen in verschiedenen Veröffentlichungen nachgewiesen worden. Die Bewehrung nimmt vor allem Schubspannungen an der unteren Tragschichtgrenze auf. Unter anderem wird durch diese Ver-spannung eine Auflockerung vermieden, sodass es nicht zu progressiven Verformungen und zu einem Abfall der Scherparameter kommt. Die Membrantragwirkung der Bewehrungslage hat dagegen nur bei sehr großen Verformungen einen Einfluss.

Die Ergebnisse von bisher durchgeführten zyklischen Laborversuchen an Zweischichtsystemen können eine tragfähigkeitserhöhende Wirkung einer Geokunststoffbewehrung im Zweischichtsystem weder belegen noch lässt sie sich ausschließen.

Weil nicht genügend theoretische Untersuchungen existieren, um die Wirkung einer Bewehrung oder verfestigten Schicht bzw. Leichtbauschicht unter zyklischer Last zu belegen, war zunächst vorgesehen, durch das Anlegen einer Datenbank mit Beobachtungsergebnissen von Versuchs-dämmen verschiedene Dammbaumaßnahmen bzgl. ihres Langzeitverhaltens miteinander zu vergleichen. Es hat sich aber im Lauf der Recherche gezeigt, dass der Großteil der Untersuchungen allein den Bauzustand behandelt. Von den 60 recherchierten Dammbauwerken geben nur 7 Aufschluss über Setzungen nach Verkehrsfreigabe. Bei 2 Versuchs-dämmen wurden unter dynamischer Last-aufbringung Spannungs- und Setzungsmessungen vorgenommen.

Im Bauzustand kommt es sowohl zu einer statischen Belastung infolge der Dammschüttung als auch zu dynamischen Anregungen infolge von Verdichtung und Bauverkehr. Der Großteil der Setzungen tritt infolge der Dammschüttung im noch nicht konsolidierten Untergrund auf. Ob auch der Bauverkehr nennenswerte Auswirkungen auf den weichen Untergrund hat, lässt sich aus den vorliegenden Daten nicht herausfiltern.

Die Messergebnisse der einzelnen Projekte sind nur schwer miteinander vergleichbar, da die Randbedingungen, wie Bodenart und -kennwerte, Mächtigkeit des weichen Untergrundes, Dammhöhe und Verkehrsbelastung in hohem Maße variieren. Die Unterscheidung in folgende zwei Fälle, entsprechend den Erfahrungen aus der Baupraxis, kann anhand der Literaturrecherche bestätigt werden.

#### 3.1 Straßenaufbauten mit einer Dammkörpermächtigkeit größer 2 m infolge von Setzungen

Bei Dammgründungen im Vorbelastungs- und Überschüttverfahren auf breiigem/weichem, unter Umständen auch organischem Untergrund ergeben sich häufig Dammkörpergesamtmächtigkeiten von mehr als 2 m, die aus ausgeglichenen Setzungen infolge von Vorbelastungsmaßnahmen und der auf jeden Fall erforderlichen Dicke des Oberbaus resultieren. In derartigen Fällen werden Geokunststoffbewehrungen zur Erhöhung der Standsicherheit im Bauzustand im unteren Teil der Schüttung planmäßig eingebaut. Diese Bauweise ist bautechnisch anerkannt und es konnte eine große Anzahl von Dämmen

mit Geokunststoffbewehrung recherchiert werden. Da die Schüttfolge und Schüttgeschwindigkeit in der Regel anhand der Beobachtungsmethode festgelegt werden, existieren für diese Bauweisen in vielen Fällen umfangreiche Datensammlungen. Da die Gesamtmächtigkeiten des tragfähigen Aufbaus in der Regel 2 m überschreiten, haben die Erschütterungen infolge der Verkehrsbelastung keinen weiteren Einfluss auf das Verformungsverhalten des weichen Untergrundes.

Geogittereinlagen haben somit allein einen positiven Einfluss auf das Tragverhalten im Zusammenhang mit der Konsolidierung unter statischer Last. Bei Dammkörperhöhen über 2 m macht eine zusätzliche "dynamische Stabilisierung" des Untergrundes durch Geokunststoffe keinen Sinn, da die durch die dynamischen Lasten resultierenden Verformungen im Untergrund ohnehin nur sehr gering sind.

### 3.2 Straßenaufbauten mit einer Dammkörpermächtigkeit kleiner 2 m

Der Aufbau von Straßendämmen auf weichem bis steifem Untergrund orientiert sich an den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO). In Abhängigkeit von der Tragfähigkeit des Untergrundes müssen die geschütteten Dammkörperdicken 2 m nicht zwingend überschreiten. Auf Grund der geringeren Lastverteilung ist eine Auswirkung auf das Setzungsverhalten des Untergrundes infolge der Beanspruchung durch die Fahrzeugübergänge nicht auszuschließen. Insbesondere spielt die Veränderung des Porenwasserdrucks unter zyklischer Belastung eine entscheidende Rolle.

Eine Geokunststoffbewehrung hat wahrscheinlich nur eine indirekte Wirkung, da die Verformungen in der Dammsohle während des Überrollvorgangs in der Regel zu klein sind, als dass zusätzliche Bewehrungskräfte aktiviert werden können. Die im Geokunststoff wirkenden Zugkräfte resultieren folglich allein aus der statischen Dammbelastung. Infolge Reibung und Verzahnung zwischen Schüttmaterial und Geokunststoffbewehrung, darüber hinaus als Folge einer filterstabilen und lagestabilen Trennung zwischen Untergrund und Damm, bleibt die Scherfestigkeit des Dammbaumaterials an der Dammaufstandsfläche erhalten. Besonders bei inhomogenen Bodenverhältnissen kann es regelmäßig zu einer Vergleichmäßigung der Belastung des Untergrundes kommen. Insbesondere können durch eine stabile Gewölbebildung im tragfähigem Damm lokale Schwächezonen im Untergrund besser überbrückt werden.

### 4. Folgerungen aus der Literaturrecherche

Den kausalen Zusammenhang zwischen den Einwirkungen und den Auswirkungen dynamischer Einflüsse auf das Setzungsverhalten des Untergrundes herzustellen, war das Ziel der Literaturrecherche.

Auf der Einwirkungsseite stehen:

- statische Belastung aus Dammeigengewicht,

- zyklische Belastung aus aufeinander folgenden Fahrzeugübergängen,
- dynamische Schwankungen der Lasten infolge Fahrzeugschwingungen.

Die Auswirkungen im Untergrund sind:

- langandauernde Sekundärsetzungen,
- Aufbau von Porenwasserüberdrücken,
- plastische Verformungen.

Allein anhand der Literaturrecherche war es allerdings nicht möglich, diesen Zusammenhang differenziert und nach Einflussgrößen getrennt zu klären. Weiter gehende Forschungsarbeiten sollten daher versuchen, eine Verknüpfung der oben genannten Einzelparameter zu ermöglichen. Fernziel ist ein Bemessungsschema, das unter Berücksichtigung der Bodenkennwerte des gering tragfähigen Untergrundes und der Bauklasse des Straßenoberbaus nach RStO zur Dimensionierung der Dammschüttung einschließlich geotextiler Filter- und Bewehrungselemente herangezogen werden kann. Wirtschaftliche Vorteile sind durch die Berücksichtigung von schwingungsreduzierenden und tragfähigkeitserhöhenden Maßnahmen bei der Dimensionierung zu erwarten. Speziell die tragfähigkeitserhöhende Wirkung von Geokunststoffen in diesen Aufbauten ist zwar allgemein anerkannt, jedoch wurde bisher kein Bemessungsverfahren bereitgestellt, das für den Endzustand wie auch für den Bauzustand und die Zwischenphasen eine Dimensionierung der Aufbauten unter dynamischen Lasten ermöglicht. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen

- einerseits Baustraßen, für die größere Verformungen akzeptiert werden können, die daher einen Gesamtaufbau geringerer Stärke erhalten können und aus denen höhere dynamische Beanspruchungen des Untergrundes resultieren, und
- andererseits dauerhaft zu benutzenden Straßen, bei denen die Einwirkungen auf den Untergrund infolge größerer Gesamtstärken des Aufbaus kleiner sind, aber bei denen auch nach sehr langandauernden und häufigen zyklischen Belastungen die Verformungen eng begrenzt bleiben müssen.

Vor allem für den ersten Fall (Baustraßen) können durch entsprechende Freifeldversuche mit Schwingungsmessungen sowohl die noch offenen Punkte der vorliegenden Literaturrecherche bearbeitet werden als auch die Grundlage für ein Bemessungsverfahren zur differenzierten Berücksichtigung der Wirkungsweise von Geokunststoffen im Straßenbau geschaffen werden.

Für den zweiten Fall sind eher Versuche unter Laborbedingungen geeignet, da es um genaue Erfassung sehr kleiner Größen geht, für die störende Randbedingungen für lange Zeit klein gehalten werden. □