

Lehrstuhl und Prüfamnt
für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik
der Technischen Universität München

Schriftenreihe
Heft 29

GEOTECHNIK

**Forschung und Entwicklung
über zwei Jahrzehnte – 1980 bis 2000**

von
Rudolf Floss

München 2000

Herausgegeben von Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Floss
Ordinarius für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik

Geleitworte aus Wissenschaft und Bauindustrie

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. h.c. Gerd Gudehus

Wenn eine akademische Fachdisziplin über zwei Jahrzehnte in Lehre und Forschung mit großem Erfolg vertreten worden ist, ist es sicher Zeit zu einem Rück- und Überblick, zumal wenn der Ordinarius sich in Kürze emeritieren läßt. Gerne nehme ich die Gelegenheit wahr, der hiermit vorliegenden Synopse einige Geleitworte mitzugeben. Sie gelten einer fruchtbaren Schaffensperiode in unserem Fachgebiet und einem hochgeschätzten Fachkollegen.

Verständlicherweise konnte ich im Laufe der letzten beiden Jahrzehnte nicht alle der zahlreichen Berichte und Veröffentlichungen des Münchner Lehrstuhls und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik lesen, etliche habe ich aber in guter Erinnerung behalten, weil sie den Erkenntnisfortschritt in unserem Gebiet des geotechnischen Ingenieurwesens bemerkenswert voran gebracht haben. Zur Zuverlässigkeitstheorie kamen die ersten deutschen Beiträge geotechnischer Ausrichtung aus München und haben Eingang in die Vorschriften gefunden. Die gewichtigen Begriffe Baugrundrisiko und geotechnische Kategorien erhielten damit eine rationale Grundlage. Die nichtlineare Bodendynamik wurde in München schon früh intensiv erforscht, vor allem experimentell. Als Pionierleistung sind die dortigen Beiträge zur flächendeckenden Verdichtungskontrolle beispielhaft zu nennen. Sehr früh kamen aus München auch Beiträge zur allmählichen Veränderung von Spannungen und dem damit verbundenen Stabilitätsverlust, insbesondere bei Böschungen. Ein schwieriges Teilgebiet ist auch der Transport kontaminierten Porenwassers unter Verkehrsanlagen und Deponiebauwerken. Die Beiträge des Münchner Lehrstuhls und Prüfamts haben die Fachwelt rasch überzeugt und dadurch Eingang in die Praxis gefunden. Auf dem Gebiet der Geokunststoffe nehmen die Münchner unangefochten eine Spitzenstellung ein, was durch viele Beiträge über das Materialverhalten, die bewehrende Wirkung und Filterphänomene eindrucksvoll belegt wird. Auch die Felsmechanik wurde in München schon früh intensiv gepflegt, insbesondere im Hinblick auf Kavernen.

Ein derart breites Spektrum signifikanter Beiträge wäre ohne eine unermüdlich führende und ordnende Hand sicher nicht zustande gekommen. Dieser Erfolg kam nicht von ungefähr, wie man aus der vorangegangenen Tätigkeit von Herrn Kollegen Floss an der Bundesanstalt für das Straßenwesen sehen kann. Die wichtigsten Veröffentlichungen aus dieser Zeit sind mir seit langem bekannt, und es ist sehr schön zu sehen, daß die Hauptthemen des Erd- und Grundbaus in München weiter gepflegt wurden. Bemerkens- und aner kennenswert ist die Ausweitung und Vertiefung der Arbeit in Lehre, Forschung und Entwicklung über nunmehr zwanzig Jahre. Hinter den vielen Forschungsberichten, Doktorarbeiten und Veröffentlichungen steht ein unermüdliches Engagement, das sicher manches Mal an die persönlichen Kapazitätsgrenzen heranreichte. Hinzu kamen und kommen arbeitsintensive Ehrenämter wie die Leitung der Fachsektion Geokunststoffe in der DGGT, das Dekanat und die Leitung einer Strukturkommission an der Münchner Bauingenieur fakultät.

Diese beeindruckende Leistung zeugt von Hingabe und Begeisterungsfähigkeit. Wie schön, daß es in unserem Fachgebiet so viel zu forschen und zu entwickeln gab und gibt. Meinem hochgeschätzten Kollegen Professor Dr.-Ing. Rudolf Floss möchte ich an dieser Stelle Dank und Anerkennung aussprechen und ihm für den nächsten Lebensabschnitt weitere Erfüllung ohne so umfangreiche Pflichten wie bisher wünschen.

Karlsruhe, im Dezember 1999

Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Karlheinz Bauer

Herr Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss konnte, als er 1980 den Lehrstuhl und das Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik an der Technischen Universität in München übernahm, bereits auf eine fast 20-jährige Forschungstätigkeit an der Bundesanstalt für Straßenwesen zurückblicken. Er hatte sich dort mit sehr vielseitigen Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der Geotechnik - überwiegend im Bereich von Verkehrswegen - beschäftigt. Besonders hervorzuheben sind seine zahlreichen Untersuchungen zur Verdichtung und Verbesserung der Tragfähigkeit von Böden, die Entwicklung von Meßverfahren hierzu, die Untersuchung von Gewölbebauwerken aus Stahlbetonfertigteilen sowie die Überprüfung des französischen Bauverfahrens der "Bewehrten Erde".

Als Professor in München hatte er mit seinem großen Institut und Prüfamt noch mehr Möglichkeiten zur Forschung und nutzte diese Chance in bewundernswerter Vielseitigkeit und großem persönlichen Einsatz. Dies zeigen auch seine vielen Veröffentlichungen und die 17 bisher unter seiner Vaterschaft durchgeführten Dissertationen. Bemerkenswert ist die ausgewogene Mischung von theoretischen und praxisnahen Themen.

Große Aufmerksamkeit in der geotechnischen Fachwelt riefen die großmaßstäblichen Versuche an Kleinbohrpfählen unter axial-zyklischer Belastung hervor. Diese neuen Erkenntnisse werden auch Eingang in die Bemessung und die Normung von Pfählen finden. Eine weitere für die Praxis wichtige und kostensparende Entwicklung war die Untersuchung von dynamischen Vorgängen bei der Vibrationsverdichtung im Boden; sie ermöglichte eine nahezu vollständige, flächendeckende Qualitätskontrolle bereits während des Verdichtungsvorgangs.

Ein besonders aktiv und kreativ betriebenes Hauptaufgabengebiet des Instituts von Professor Floss war die Messung von Verformungen im Boden und am Bauwerk, an Pfählen, Brücken und verankerten Wänden. Mit konstruktiven und statischen Hinweisen sowie umfangreichen Messprogrammen begleitete er schwierigste Gründungen oder Baugruben, wie z.B. im Seeton von Rosenheim.

Professor Floss erkannte schon sehr frühzeitig die vielfältige Verwendungsmöglichkeit von Kunststoffen für die Baupraxis, insbesondere für den Erd- und Spezialtiefbau. Er führte dazu an seinem Institut zahlreiche Forschungsvorhaben aus und schuf sich national und international einen bedeutenden Ruf. Er war vier Jahre lang Vizepräsident der IGS (International Geosynthetics Society) und ist seit vielen Jahren Leiter der nationalen Fachsektion "Kunststoffe in der Geotechnik" innerhalb der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik.

Professor Floss war stets bemüht, sich Anregungen aus der Praxis der Bauindustrie zu holen und dort auftretende Probleme durch Grundlagenforschung zu untersuchen. So fanden neben vielen Einzelkontakten jährliche Erfahrungsaustausch-Treffen mit Vertretern der Bayerischen Bauindustrie und auch mit der Firma Bauer Spezialtiefbau statt. Diese Gespräche waren immer sehr informativ und für beide Seiten fruchtbar und sorgten für einen ständigen Praxisbezug der Forschungsarbeit seines Instituts.

Ich wünsche Herrn Professor Floss weiterhin Kreativität und Innovationsfreude.

Schrobenhausen, im Dezember 1999

GEOTECHNIK

Forschung und Entwicklung über zwei Jahrzehnte - 1980 bis 2000

Inhalt

1. Einführung

2. Kurzbeschreibung der Forschungsarbeiten und Dissertationen

- 2.1 Themengruppen
- 2.2 Übersicht der Arbeiten
- 2.3 Kurzbeschreibungen

3. Anhang

- A1 Übersicht der Forschungs- und Entwicklungsprojekte in den Jahren 1960 - 1980 aus der Tätigkeit des Autors an der Bundesanstalt für Straßenwesen
- A2 Literaturhinweise
- A2.1 Schriftenreihe des Prüfamtes für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München (Hefte 1 - 28)
- A2.2 Literaturhinweise auf Sonderveröffentlichungen

1. Einführung

Die Forschung auf dem Gebiet der Geotechnik hat in den zwei Jahrzehnten meiner Tätigkeit als Ordinarius an der Technischen Universität München einen besonderen Stellenrang eingenommen und die wissenschaftliche Entwicklung des Lehrstuhls und Prüfamtes für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik geprägt. Der Gedanke lag nahe, die in der Berichterstattung und Publikation verstreuten Forschungsarbeiten in einem Sonderheft der Schriftenreihe zusammenfassend übersichtlich zu dokumentieren.

Das Sonderheft beinhaltet die Kurzbeschreibungen der in der Zeit von 1980 bis 2000 für öffentliche Auftraggeber ausgeführten Forschungs- und Entwicklungsprojekte. Die am Lehrstuhl in dieser Zeit entstandenen Dissertationen, die zum Gesamterfolg der Forschung wesentlich beigetragen haben, sind dabei mit erfaßt. Die Forschung bedurfte einer intensiven, wechselseitig befruchtenden Betreuung, die am Lehrstuhl und Prüfamte stets durch Gruppenarbeit im Zusammenwirken von Lehrstuhlinhaber und wissenschaftlichen Mitarbeitern erfolgreich praktiziert werden konnte. Einige Forschungen und Dissertationen werden sich erst im Laufe des Jahres 2000 und 2001 abschließen lassen, so daß ihre Dokumentation hier noch nicht mit enthalten ist.

Insgesamt umfaßt die Dokumentation 51 Projekte, eingeteilt nach 10 Themenschwerpunkten. Die Grundlagenforschung findet besonderen Niederschlag in den Beiträgen über die Zuverlässigkeitstheorie (Themengruppe Nr. 1), die Bodendynamik (Nr. 2), die Bewehrung von Erdkörpern (Nr. 5) sowie über die Spannungs- und Stabilitätszustände in Böschungen und Dämmen (Nr. 7) sowie bei Felshohlraumbauten (Nr. 3). Prüftechnisch orientierte Forschungen und Entwicklungen beinhalten die Beiträge über dynamische Triaxial- und Verformungsversuche (Nr. 2), über die für den Erdbau entwickelten Qualitätsprüfungen (Nr. 4) sowie über die Festigkeits- und Kraft-Dehnungseigenschaften von Geokunststoffen (Nr. 6). Zur Untersuchung von phänomenologischen Eigenschaften gehören Beiträge über die Verbundmechanismen von Boden und Geokunststoffen (Nr. 5), wie auch die umfangreiche Forschung über die Dichtungs-, Filter- und Dränwirksamkeit von Materialien in Abhängigkeit vom Sättigungsverlauf (Nr. 9). Zu der mehr anwendungsorientierten Forschung zählen Beiträge über den Grundwasserschutz an Verkehrsanlagen (Nr. 8), über die Deponiebauwerke (Nr. 10) sowie die Untersuchungen über das Tragverhalten von zyklisch belasteten Pfählen (Nr. 2).

In dem gleichen Zeitraum war das Prüfamte, wie bereits in den Jahren vorher, an zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten im Rahmen nichtöffentlicher Aufträge für die Bauindustrie und Bauverwaltung maßgeblich beteiligt und hat dabei zur Entwicklung von Bauweisen und zur Sicherheit von Bauwerken in der Geotechnik wesentlich beigetragen. Wegen der großen Anzahl dieser Arbeiten können sie hier nicht mit dokumentiert werden.

Meiner Berufung im Jahr 1980 ging bereits eine intensive Forschungstätigkeit an der Bundesanstalt für Straßenwesen voraus. Mit der Übersicht dieser Arbeiten im Anhang A 1 dieses Sonderheftes ist die Gesamtforschung, die über vier Jahrzehnte reicht, im vollständigen

Zeitraumen dokumentiert. Der Anhang A 2 enthält Literaturhinweise, soweit Bezüge zu den dokumentierten Forschungsarbeiten bestehen.

Die Zusammenstellungen verdanke ich der Unterstützung durch meinen wissenschaftlichen Mitarbeiter, Herrn Dr.- Ing. J. Fillibeck. Für die Geleitworte zu diesem Sonderheft gebührt mein herzlicher Dank meinen verehrten Kollegen, den Herren Dr.- Ing. Dr.- Ing. E.h. Karlheinz Bauer, Schrobenhausen und Univ.- Prof. Dr.- Ing. Dr.- Ing. h. c. Gerd Gudehus.

München, im Januar 2000

R. Floss

2. Kurzbeschreibung der Forschungsarbeiten und Dissertationen

2.1 Themengruppen

- 1 Zuverlässigkeitstheorie in der Bodenmechanik
- 2 Bodendynamik
- 3 Felsmechanik, Tunnelbau
- 4 Qualitätssicherung im Erdbau
- 5 Verbundwirkung bewehrter Erdkörper
- 6 Eigenschaften von Geokunststoffen
- 7 Spannungs- und Stabilitätsanalysen
- 8 Grundwasserschutz an Verkehrsanlagen
- 9 Eigenschaften von Dichtungs-, Filter- und Dränmaterialien
- 10 Deponiebauwerke

Themengruppe 3 - Felsmechanik, Tunnelbau

- | | | |
|-----|---|-------------|
| 3.1 | Grundlagenuntersuchungen über Gestaltung und Sicherung von großen Felshohlräumbauten (Kavernen) in Abhängigkeit von Umfang und Güte der felsmechanischen Vorinformationen | 1987 - 1993 |
| 3.2 | Ein Beitrag zur Vorhersage von Verformungen und Spannungen des Baugrundes und des Ausbaues bei Hohlräumbauten | 1989 |
| 3.3 | Zur Strategie der Gestaltung großer Krafthauskavernen | 1993 |
| 3.4 | Probabilistische Standsicherheitsanalyse für tetraedrische Felskeile | 1993 |

Themengruppe 4 - Qualitätssicherung im Erdbau

- | | | |
|-----|---|-------------|
| 4.1 | Dynamische Verdichtungsprüfung bei Erd- und Straßenbauten | 1980 - 1991 |
| 4.2 | Erprobung des dynamischen Fallplattenversuchs als Schnellprüfverfahren für die Qualitätssicherung im Erdbau und für ungebundene Tragschichten | 1987 - 1990 |
| 4.3 | Qualitätssicherung beim Verfüllen von Leitungsgräben | 1989 - 1993 |
| 4.4 | Anpassung der flächendeckenden dynamischen Prüfung der Verdichtung an die baustellenspezifischen Anforderungen | seit 1995 |

Themengruppe 5 - Verbundwirkung bewehrter Erdkörper

- | | | |
|-----|--|-------------|
| 5.1 | Wirkungsweise von Geotextilien als Trennlage unter Tragschichten bei intensiver Verkehrsbeanspruchung | 1984 - 1987 |
| 5.2 | Einfluß einer Bewehrung auf das Verformungs- und Tragverhalten des Zweischichtensystems | 1984 - 1988 |
| 5.3 | Untersuchungen zur Wirksamkeit einer Bewehrung im Zweischichtensystem | 1993 |
| 5.4 | Aufstellung eines Bemessungsverfahrens für die Bodenbewehrung mit Vliesstoffen auf der Grundlage der bei Zug- und Zugkriechversuchen mit Bodenkontakt gewonnenen Parameter | seit 1997 |
| 5.5 | Der Einfluß der Verbundwirkung zwischen Boden und Geotextil auf das Verformungsverhalten von bewehrten Steilböschungen | 1997 |
| 5.6 | Untersuchungen über das Spannungs-Verformungs-Verhalten von mehrlagigen Kunststoffbewehrungen in Sand | 1998 |

Themengruppe 6 - Eigenschaften von Geokunststoffen

- | | | |
|-----|--|-------------|
| 6.1 | Festigkeitsprüfungen an Geotextilien | 1982 - 1985 |
| 6.2 | Entwicklung von Laborprüfmethoden zur Bestimmung der Wirkungsweise von Geotextilien im Boden unter dynamischen Beanspruchungen | 1986 - 1990 |
| 6.3 | Untersuchungen zum Kraftdehnungsverhalten von Geotextilien unter Bodeneinbaubedingungen | 1991 - 1994 |

Themengruppe 7 - Spannungs- und Stabilitätsanalysen

- | | | |
|-----|--|-------------|
| 7.1 | Bestimmung der Langzeitfestigkeit von Böschungen | 1981 - 1990 |
| 7.2 | Einfluß des Spannungszustandes auf die Festigkeits- und Verformungseigenschaften silikatgelinjizierter Sande | 1984 - 1987 |
| 7.3 | Einarbeitung der "Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen" in DIN 4017 - Grundbruchberechnungen | 1985 - 1987 |
| 7.4 | Bituminöse Abdichtungen im Erdstaudambau | 1986 - 1993 |
| 7.5 | Bruchvorgänge infolge der Isareintiefung südlich Münchens und die kritischen Höhen der Talhänge | 1988 |
| 7.6 | Beitrag zum zeit- und temperaturabhängigen Materialverhalten von Asphaltbeton für Kerndichtungen in Schüttdämmen unter besonderer Berücksichtigung des ebenen Verzerrungszustandes | 1996 |
| 7.7 | Beitrag zum Verhalten mehrschichtiger Dichtungssysteme mit Kunststoffdichtungsbahnen unter Scherbeanspruchung | 1999 |

Themengruppe 8 - Grundwasserschutz an Verkehrsanlagen

- | | | |
|-----|--|-------------|
| 8.1 | Eignung natürlicher Böden als Dichtungstoffe zum Grundwasserschutz im Bereich von Verkehrsflächen | 1985 - 1988 |
| 8.2 | Auswertung und Beurteilung bisher in der Praxis angewandter bautechnischer Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten | 1986 - 1989 |
| 8.3 | Untersuchungen zur Eignung von Kunststoffdichtungsbahnen für die Anwendung als Abdichtungsmaterial bei Straßen in Wassergewinnungsgebieten | 1991 - 1994 |
| 8.4 | Sicherheitsbewertung bautechnischer Maßnahmen zum Grundwasserschutz an Straßen in Wassergewinnungsgebieten auf probabilistischer Grundlage | 1993 - 1996 |
| 8.5 | Anwendung von Bentonitdichtungsmatten zum Grundwasserschutz an Verkehrswegen und -flächen | 1994 - 1997 |

Themengruppe 9 - Eigenschaften von Dichtungs-, Filter- und Dränmaterialien

9.1	Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel	1986 - 1989
9.2	Die Bestimmung des Sättigungsverlaufes mineralischer Abdichtungsmaterialien als Grundlage für die Beurteilung der Infiltrationsmöglichkeit von grundwassergefährdenden Substanzen	1988 - 1990
9.3	Anforderungen an die Durchlässigkeit von ungebundenen Tragschichten	1989 - 1993
9.4	Untersuchung zur Filterwirksamkeit von Geotextilien bei geringen hydraulischen Gradienten im Straßenbau	1994 - 1997
9.5	Ein Verfahren zur Bestimmung der Durchlässigkeit mit Infiltrationsversuchen	1994
9.6	Untersuchung der Empfindlichkeit von Geotextilien und Geokunststoffen im Boden gegenüber dynamischer Beanspruchung	seit 1995
9.7	Aufstellen eines Systems für die Anforderung an Geotextilien und Geokunststoffe hinsichtlich ihrer Beanspruchung beim Einbau	seit 1996
9.8	Auswirkungen von Kationenaustauschvorgängen auf die Dichtungswirksamkeit von geosynthetischen Tondichtungsbahnen	seit 1998

Themengruppe 10 - Deponiebauwerke

10.1	Optimierung des Auflagermaterials von Dränrohren in Deponie-Basisabdichtungen	1993 - 1996
10.2	Untersuchungen zur Beurteilung der Filterwirksamkeit von Geotextilien bei geringer hydraulischer Belastung im Deponiebau	1994 - 1997
10.3	Filter- und Dränwirksamkeit von Abdecksystemen von Deponien mit oder ohne Geotextilien	seit 1998

2.3 Kurzbeschreibungen

1.1

Talsperrensicherheitsstudie auf probabilistischer Basis

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Forschung und Technologie

Forschungsnummer: 31A1 - 7591 - RGB 8205/5

Zeitraum: 1982 - 1987

Literatur: 8

Sachbearbeiter: Alther, D. (Diss.: 1987)

Die Ermittlung und Vorhersage von Bodenkennwerten durch Versuche und aufgrund von Erfahrungswerten, sowie ihre Beurteilung zur Festlegung von Rechenwerten anhand der jeweiligen Problemstellung, sind die Kernpunkte jeder geotechnischen Untersuchung. Während in der praktischen Arbeit noch die traditionellen deterministischen Verfahren dominieren, brachte die Übernahme der zuverlässigkeitstheoretischen Betrachtungsweise in die geotechnische Forschung umwälzende Neuerungen mit sich. So wird neben dem geforderten einheitlichen Sicherheitskonzept auch eine wesentlich zutreffendere Idealisierung des Bodens in erdstatischen Berechnungen ermöglicht. Letztere manifestiert sich nun nicht mehr durch eine Reihe von Rechenwerten, sondern in einer statistischen Beschreibung der Bodenkennwerte.

In dieser Forschungsarbeit wurde ein stochastisches Modell für die Streuung von Bodenkennwerten an einer Vielzahl von Aufzeichnungen verschiedenster Baustellen überprüft und ausgewertet. Obwohl hierbei hauptsächlich Klassifikationskenngrößen wie Dichte, Wassergehalt, Kornverteilung usw. vorlagen, kann wegen der vielfältigen Korrelationen von Bodenkennwerten untereinander die Übertragbarkeit auf statisch relevante Festigkeits- und Verformungskenngrößen postuliert werden.

Mit dieser Auswertung liegen ausreichende a priori Informationen über die Verteilung der Prozeßparameter vor, um praktische Anwendungen ohne ergänzende (a posteriori) Informationen vornehmen zu können. Die theoretische Untersuchung des stochastischen Bodenmodells wurde vor allem im Hinblick auf die Autokorrelationseigenschaften und die Variationskoeffizienten bei gleitender Mittelung vorgenommen.

Mit der Erweiterung des stochastischen Prozesses von der Geraden in die Ebene und in den Raum war es somit möglich, die Autokorrelationsfunktion und die Varianzreduktionsfunktion in Abhängigkeit von den Prozeßparametern und der Baustellengröße anzugeben. Weiterhin sind neben Hilfsmitteln für die Anwendung und Abschätzungen für anisotrope Böden einige Beispiele stochastischer Standsicherheitsuntersuchungen anhand von Grund- und Böschungsbruch zusammengestellt.

Hiemit wird erstmals ein verifiziertes stochastisches Bodenmodell vorgestellt, das in beliebigen Dimensionen gültig ist und brauchbare, plausible Ergebnisse innerhalb des statistischen Sicherheitskonzepts liefert. Seine Anwendungsmöglichkeiten erstrecken sich über den gesamten Bereich der Geotechnik, sei es im Rahmen des statistischen Sicherheitskonzepts, bei Setzungsabschätzungen, bei der Baugrunderkundung oder bei Baukontrollprüfungen im Erdbau.

1.2	Bewertung der Verdichtungsprüfungen im Erdbau auf statistischer Grundlage im Hinblick auf die Gütesicherung
-----	--

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr
Forschungsnummer: 5.084 G 85 C
Zeitraum: 1985 - 1989
Literatur: 16
Sachbearbeiter: Kudlá, W. (Diss.: 1990)

Alle Erdbauwerke erfordern aus unterschiedlichen Gründen eine ausreichende Verdichtung. Die dabei zu überprüfenden Merkmale (Verdichtungsgrad und Verformungsmodul) werden als Zufallsvariable betrachtet, die einer Normalverteilung unterliegen. Die Prüfungen für die Bodenverdichtung lassen sich einteilen in flächendeckende Prüfverfahren, Prüfungen nach einem statistischen Prüfplan und Prüfungen bei denen die Versuchspunkte subjektiv ausgewählt werden. Bei Prüfungen nach einem statistischen Prüfplan erfolgt die Beurteilung eines Prüfloses auf Grund einer Stichprobe. Die Versuchspunkte für die Messungen der Merkmalswerte müssen dabei völlig zufällig ausgewählt werden. Aufgrund der Prüfgröße, die aus den Merkmalswerten der Stichprobe und den Prüfplanparametern berechnet wird, und der Entscheidungsregel wird über Annahme oder Ablehnung des Prüfloses entschieden. Bei einer Ablehnung des Prüfloses muß das gesamte Los nachverdichtet werden.

Die Festlegung der Anforderung erfolgt sinnvollerweise durch die Festlegung eines Grenzwertes und die Bestimmung eines maximal zulässigen Schlechtanteiles (Fraktileforderung). Die quantitative Festlegung muß in engem Zusammenhang mit der nachfolgenden Überprüfung mittels eines statistischen Prüfplanes gesehen werden.

Die Vorteile der einzelnen Prüfplanarten (Einfachstichprobenprüfpläne, Doppelstichprobenprüfpläne, Folgeprüfpläne) werden erläutert und die Berechnung der Prüfplanparameter wird angegeben. Für die Möglichkeit einer Schwachstellenprüfung wird ein eigener Prüfplan hergeleitet. Die Annahmewahrscheinlichkeit eines Prüfloses bei festgelegten Prüfplanparametern zeigt die Operationscharakteristik des Prüfplanes.

Der mittlere Prüffehler bei der Bestimmung des Verdichtungsgrades wird berechnet. Dieser wird bei der quantitativen Festlegung der Anforderung näherungsweise berücksichtigt. Unter Einbeziehung des Prüffehlers ergibt sich, daß die Forderung einer 10%-Fraktile für die gemessenen Merkmalswerte bei den üblichen Mindestwerten zwischen 95% und 100% Verdichtungsgrad zu einer sinnvollen Anforderung führt.

Mit Hilfe einer umfangreichen Datensammlung von Prüfungen des Verdichtungsgrades und des Verformungsmoduls wird das ungefilterte Produktionsangebot erfaßt und mittels Bayesscher Theorie modelliert. Mit dieser Vorinformation und den Operationscharakteristiken der Prüfpläne werden die Prädiktorverteilungen von Mittelwert, Standardabweichung und Schlechtanteil berechnet. Die Prädiktorverteilungen sind das Hilfsmittel zur Quantifizierung des gefilterten Produktionsangebotes. Daraus lassen sich die Auswirkungen der statistischen Abnahmekontrollen auf das ungefilterte Produktionsangebot abschätzen.

1.3

Quantifizierung von Setzungsdifferenzen mit Hilfe einer stochastischen Betrachtungsweise

Dissertration: Technische Universität München
Jahr: 1989
Literatur: 13
Doktorand: Reithmeier, W.

Nach Vorlage eines anhand von umfangreichen Datenmaterials verifizierten stochastischen Bodenmodells und der für die rechentechnische Bearbeitung erforderlichen Aufbereitung wurde in dieser Arbeit der Versuch unternommen, Setzungsvorhersagen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit zu quantifizieren.

Ziel war die Ableitung von möglichst allgemein gültigen Aussagen über das Setzungsverhalten von quadratischen Einzelfundamenten zueinander auf gründungsfähigen bindigen Böden. Es ist im Ergebnis gelungen, dieses von mehreren Einflüssen abhängige Problem in einzelne multiplikative Anteile aufzuspalten und in wenigen Tabellen bzw. Kurven darzustellen.

Für die praktische Anwendung wurden verschiedene Regressionsansätze aus der Literatur aufgenommen, aufbereitet und ihre Handhabung beispielhaft erläutert.

Das Verfahren bedingt ein Spannungs-Verformungsgesetz des Bodens, das dem Ansatz von Ohde genügt. Abschätzungen des Verformungsverhaltens von Bodenarten, die sich nicht mit diesem Ansatz beschreiben lassen, sind daher nicht möglich.

Neben den Einflußfaktoren, die aus den entsprechenden Tafeln und Tabellen zu entnehmen sind, müssen für den zu beurteilenden Boden die lokal vorhandenen Parameter wie Mittelwert und Varianz bekannt sein. Beide sind durch Messungen bzw. Erfahrungen oder gegebenenfalls mit Hilfe einer Regressionsrechnung aus anderen Parametern abzuschätzen. Die Güte der Vorhersage hängt natürlich wie bei jeder Berechnung auch von der zutreffenden Wahl der Eingangsparameter ab.

Eine Abschätzung der Differenzsetzungen von gleichen Gründungskörpern auf homogenem Baugrund ist nur über den Umweg einer stochastischen Betrachtungsweise möglich. Da dieses an sich komplizierte Boden- und Rechenmodell aber nur intern für die Ableitung der vorliegenden Beziehungen notwendig ist, sind für die Anwendung der Ergebnisse in der Praxis keinerlei Kenntnisse über stochastische Prozesse und die damit verbundenen Rechenverfahren erforderlich.

Im Sinne der neueren Sicherheitsphilosophie, statistische Verfahren in den Entscheidungsprozeß mit einzubeziehen, werden für die gewählte Problemstellung die hierzu erforderlichen Einzelschritte ausführlich aufgezeigt.

2.1	Untersuchung eines leicht schluffigen Kiessandes unter dynamischer Belastung in Dauerversuchen
-----	---

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: Ing. Vertrag 4 1801 102555

Zeitraum: 1980 - 1982

Sachbearbeiter: Schwarz, P.

Gegenstand des vorliegenden Forschungsvorhabens war die Untersuchung eines „leicht schluffigen Kiessandes“ in Dauerversuchen mit verschiedenen dynamischen Belastungen.

Untersuchungen dieser Art wurden von der Deutschen Bundesbahn ursprünglich bereits in den Jahren 1972/73 angeregt.

Die hier vorliegenden Untersuchungen sind insbesondere mit den für die Deutsche Bundesbahn im Auftrag der ORE in den Jahren 1977 bis 1979 durchgeführten Untersuchungen vergleichbar. Das Bodenmaterial wurde in ähnlicher Weise und mit gleicher Versuchseinrichtung getestet, die Ergebnisse konnten einander teilweise gegenübergestellt werden.

Das Ziel dieser Untersuchungen bestand wie bei den vorhergehenden darin, den Einfluß der Frequenz, des Wassergehalts, des Seitendrucks und der Lastwechselzahl auf das Verformungsverhalten von Bodenproben im dynamischen Triaxialversuch festzustellen.

Wie die Versuchsergebnisse zeigen, nimmt die dynamische Tragfähigkeit mit zunehmendem Wassergehalt erheblich ab. Dies gilt insbesondere für Wassergehalte über dem Proctorwassergehalt w_p . Ein Verformungsendwert wird nicht erreicht. Zwar wird die Verformungsrate pro Lastzyklus im Laufe der Zeit geringer, doch niemals Null. Dies gilt für alle untersuchten Wassergehalte.

Das bedeutet, daß in Abhängigkeit von der dynamischen Belastung und dem Wassergehalt die Festlegung eines zulässigen Verformungsmaßes für eine bestimmte Betriebszeit zweckmäßig ist.

2.2

In situ-Versuche zur Ermittlung der Unterbausteifigkeit an zwei Pfeilern der Sinntalbrücke Schaippach

Forschungsauftrag: Deutsche Bundesbahn

Forschungsnummer: Ing. Vertrag 4 1801 10047 / 4 1801 10019

Zeitraum: 1981 - 1990

Sachbearbeiter: Kempfert, H-G. ; Schwarz, P.

Die Trassenführung der im Bau befindlichen Neubaustrecke der Deutschen Bundesbahn von Hannover nach Würzburg bzw. von Mannheim nach Stuttgart erfordert zahlreiche Eisenbahn- und Straßenbrücken.

Die Wechselwirkung zwischen Gleis und Brückenbauwerk gewinnt bei einfeldrigen Systemen mit durchlaufend geschweißter Schiene besonderen Einfluß. Die auftretenden Schienenlängskräfte werden um so wirksamer in den Unterbau (Pfeiler, Gründung) abgeleitet, je steifer dieser reagiert. Die Unterbausteifigkeit ist somit ein wichtiger Faktor für die Realisierung des einfeldrigen Brückensystems mit durchgehend geschweißter Schiene. Sie darf bestimmte Grenzwerte nicht unterschreiten, damit die Schienenbeanspruchung nicht unzulässig groß wird.

Zur Untersuchung des Problems der Unterbausteifigkeit hat das Bundesbahnzentralamt München das Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München im Jahr 1981 mit Messungen an der ca. 23 m hohen Sinntalbrücke bei Schaippach beauftragt, die im Zuge der Neubaustrecke als eines der ersten Bauwerke mit einfeldrigem Tragwerkssystem ausgeführt worden ist (Länge ca. 442 m mit 10 Feldern). Der Brückenüberbau besteht aus einem einzelligen Spannbeton-Hohlkasten, hergestellt im Taktstiebetafelverfahren.

An den Pfeilern 7 und 8 wurden statische und dynamische Belastungsversuche vorgenommen, um die Systemsteifigkeit Unterbau - Baugrund zu ermitteln. Zu diesem Zweck erfolgte über ein Spannglied am Pfeilerkopf in ca. 18 m Höhe über Oberkante Fundament eine Horizontalbelastung. Die Messungen erfaßten die Kraftänderungs- und Verschiebungsgrößen, die Druckänderungen in der Sohlfuge mittels pneumatischer Druckkissen und DMS-Druckmeßdosen, die Bewegung der Fundamente mittels Feinnivellement und Stangenextensometern sowie die Dehnungen und Stauchungen im Beton des Pfeilerschaftes. Die Auslenkung des Pfeilerkopfes wurde mit mehreren Meßsystemen vergleichend untersucht. Zur Anwendung kamen Wegmeßuhren und geodätische Methoden, ein in zwei Achsen messendes Neigungsmeßgerät zur Ermittlung der räumlichen Biegelinie sowie ein Laser-Meßsystem.

Die aufgrund der Meßergebnisse ermittelten Unterbausteifigkeiten der unbelasteten Pfeiler lagen rd. 20% unter den ursprünglichen Berechnungsannahmen und werden bezüglich der zulässigen Schienenspannungen als ausreichend angesehen.

2.3	Dynamische Triaxialversuche
------------	------------------------------------

Forschungsauftrag: Deutsche Forschungsgesellschaft

Forschungsnummer: Fl 136/1

Zeitraum: 1981 - 1985

Literatur: 46

Sachbearbeiter: Schwarz, P.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde für einen leicht plastischen, schluffigen Ton der Einfluß dynamischer Belastungen auf die elastische und bleibende Dehnung einer zylindrischen Bodenprobe in einem dynamischen Triaxialgerät untersucht.

Ein neu entwickeltes opto - elektronisches Meßverfahren für die Messung der Radialquerdehnung erwies sich mit Einschränkungen als geeignet. Es ermöglichte eine direkte Bestimmung der Querdehnzahl.

Die Messung der axialen Dehnungen ergab etwa konstante Elastizitätsmoduln im untersuchten Spannungsbereich. Den größten Einfluß hatten unterschiedliche Wassergehalte. Hingegen zeigten verschiedenen Frequenzen zwischen 1,5 Hz und 18 Hz keinen nennenswerten Einfluß. Auch bei der Bestimmung der Querdehnzahl war der Wassergehalt der einflußreichste Parameter. Je größer die Sättigung, desto näher lagen die Werte bei der theoretischen Grenze von $\nu = 0,5$.

Es besteht auch eine Abhängigkeit vom Spannungszustand. Mit größer werdendem Spannungsverhältnis $\sigma_{1,dyn} / \sigma_3$ steigt die Querdehnzahl. Für den Zusammenhang zwischen elastischer und bleibender Verformung ergaben sich für Proben gleichen Wassergehaltes annähernd doppellogarithmisch lineare Funktionen.

Bei den Versuchen mit dynamischen Seitendruck zeigte sich, daß auch schon kleine Amplituden $\sigma_{3,dyn}$ einen deutlichen Anstieg des E - Moduls und eine Verringerung der Querdehnzahl bringt.

Obwohl die Anforderungen an die Versuchs- und Meßtechnik bei Aufbringen eines dynamischen Seitendruckes erheblich steigen, ist dies eine unerläßliche Voraussetzung für künftige Versuche, die eine realistische Kennwertermittlung zum Ziel haben.

2.4

Axial zyklisch belastete Pfähle

Forschungsauftrag: Institut für Bautechnik, Berlin
Forschungsnummer: IV / 1 - 5 - 360/83 IV / 5 - 436/85
Zeitraum: 1983 - 1990
Literatur: 5
Sachbearbeiter: Korek, H.W. ; Schwarz, P.

In der Praxis werden axial zyklisch belastete Pfähle bei Stützbauwerken in Tidegebieten, Dock-Sohlplatten, Klär-, Rückhalte- und Schwimmbecken sowie bei Schornsteinen, Türmen und Freileitungsmasten eingesetzt. Über das Tragverhalten von axial zyklisch beanspruchten Pfählen ist aufgrund von Literaturangaben bekannt, daß die Tragfähigkeit, besonders in Sand, gegenüber statischer Beanspruchung stark reduziert sein kann.

Ziel und Zweck des Forschungsvorhabens war es, durch Großversuche von Verpreßpfählen, welche in der Versuchsgrube des Prüfamts in Sand hergestellt wurden, das Tragverhalten von axial zyklisch beanspruchten Pfählen gegenüber statisch beanspruchten Pfählen quantitativ zu erfassen.

Als Versuchsboden diente ein kiesiger, schluffiger Fein- bis Mittelsand, der in feuchtem Zustand mit mitteldichter Lagerung eingebaut war. Die Löcher wurden mit Verrohrung und Innenschnacke gebohrt und der Beton mit Verpressung eingebracht. Als Bewehrung diente ein GeWi-Stahl 50mm.

Die Ergebnisse der statischen Versuche zeigen, daß die Last überwiegend über Mantelreibung in den Boden abgetragen wird, wobei die Grenz- und Bruchmantelreibung bei Druck- und Zugbeanspruchung etwa gleich groß ist. Mit zunehmenden Beanspruchungen in wechselnden Richtungen nehmen die Bruchmantelreibungswerte stark ab.

Bei Wechselbelastung hängt das Versagen des Pfahles sowohl von der Lastamplitude als auch von der Anzahl der Zyklen ab, d.h. je größer die Anzahl der Zyklen, desto geringer die Bruchlast. Der Bruchzustand tritt unvermittelt auf und läuft um so schneller ab, je höher die Lastamplitude ist. Bei Druckschwellbelastung treten dagegen selbst bei relativ hohen Lasten und einer großen Anzahl von Zyklen nur kleine Verschiebungen auf.

Aufgrund der vorliegenden Versuchsergebnisse läßt eine Probebelastung mit Simulierung der tatsächlichen zyklischen Belastung zwar ein sofortiges Versagen erkennen, sie läßt aber bei nicht sofortigem Versagen keinen eindeutigen Rückschluß auf das endgültige Verhalten zu, es sei denn, daß die Verschiebungsraten der einzelnen Lastwechsel sehr stark abnehmen oder aber Null sind, so daß Versagen ausgeschlossen werden könnte.

Für die Praxis wird daher vorgeschlagen, die zulässige Belastung bei zyklisch beanspruchten Reibungspfählen auf die statische Zuggrenzlast zu beziehen.

2.5	Materialverhalten bei zyklischer Drehung der Hauptspannungsrichtung im tordierenden Triaxialgerät
------------	--

Forschungsauftrag: Deutsche Forschungsgesellschaft

Forschungsnummer: Fl 136 / 4

Zeitraum: 1987 - 1991

Literatur: 52

Sachbearbeiter: Huber, H.

Die meisten der durch Sedimentation entstandenen natürlichen Böden weisen ein mehr oder wenig stark ausgeprägt anisotropes Verhalten auf. Ihre Reaktion auf Belastung wird deshalb weitgehend von der Richtung der Hauptspannungen im Verhältnis zu ihrer beim Sedimentationsvorgang entstandenen Ausrichtung bestimmt.

Viele Belastungs- und Entlastungsvorgänge des Untergrundes gehen mit einer Rotation der Hauptspannungsrichtungen im Boden einher. Beispielhaft seien das überrollende Rad eines Fahrzeuges, der Hanganschnitt beim Straßenbau oder der Aushubvorgang bei einer Baugrube erwähnt.

Der Erkenntnisstand über den Einfluß einer solchen Drehung der Hauptspannungsrichtung auf das Spannungs - Verformungsverhalten und die Scherfestigkeit der Bodenmaterialien ist derzeit noch nicht ausreichend. An seiner Erweiterung wird weltweit an verschiedenen Forschungseinrichtungen gearbeitet. Bisher wurde meist mit nichtbindigen Böden, im besonderen mit Mittelsanden und in einigen Fällen mit Tonen, gearbeitet.

Die oben beschriebenen Be- und Entlastungsvorgänge können in herkömmlichen Laborgeräten nur sehr schlecht kontrolliert und einigermaßen homogen erzeugt werden. Eine Ausnahme stellt dabei eine seltene Sonderform des sogenannten „True Triaxial - Apparatus“ dar, bei der auch Schubspannungen auf die Probe aufgebracht werden können. In einer hohlzylindrischen Probe hingegen können durch Aufbringen einer Kombination aus Zelldruck, axialer Druckkraft und einem Torsionsmoment weitgehend beliebige Spannungszustände realisiert werden. Durch entsprechende unabhängige Veränderungen dieser Belastungsgrößen ist es möglich, verschiedenste Belastungspfade nachzufahren.

Das Endziel dieses Forschungsvorhaben war ein Beitrag zur Erforschung des Stoffverhaltens von Bodenmaterial bei Belastungsvorgängen mit gezielter, gegebenenfalls zyklischer Rotation der in der Probe auftretenden Hauptspannungen. Desweiteren sollten Aussagen über den Einfluß der zweitgrößten Hauptspannung auf die ermittelten Scherparameter abgeleitet werden.

2.6

**Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der
Vibrationsverdichtung von Böden**

Dissertation: *Technische Universität München*
Jahr: *1988*
Literatur: *11*
Doktorand: *Kröber, W.*

In dieser Arbeit werden die bodenmechanischen und schwingungstechnischen Zusammenhänge bei der Vibrationsverdichtung im Erdbau untersucht. Dabei wird anhand einer detaillierten Beschreibung und Darstellung der Schwingungsvorgänge am Verdichtungswerkzeug und im zu verdichtenden Boden ein Einblick in die physikalischen Vorgänge gegeben.

Aufgrund der Analyse von Meßergebnissen konnten empirisch bereits bekannte Effekte im Betriebsverhalten des Verdichtungswerkzeuges und in der Verdichtungswirkung verifiziert werden. Das Zusammenwirken der maschinentechnischen Parameter, die für die Verdichtungswirkung eine entscheidende Rolle spielen, wurde aufgezeigt und der Einfluß der einzelnen Parameter diskutiert.

Durch die Darstellung der Bewegungsvorgänge des Verdichtungswerkzeuges in Abhängigkeit der Steifigkeit des zu verdichtenden Bodens werden die Grundlagen der dynamischen Verdichtungskontrolle erläutert und begründet. Dabei wird besonderer Wert auf die getrennte Erfassung der Meßgrößen an dem Verdichtungsgerät und in dem Boden gelegt. Anhand von Ähnlichkeitsbetrachtungen wird die Kopplung und Rückwirkung zwischen dem Verdichtungswerkzeug einerseits und dem Boden andererseits hergestellt.

Mit Hilfe von Meßdosen ist der Energieaustausch des Verdichtungswerkzeuges mit dem Boden, sowie der Energieverzehr in verschiedenen Bodenschichten untersucht worden. Dabei wurde der Schubanteil des Energietransports mit berücksichtigt. Durch die Messung von Druckspannungen und Verschiebungen konnte der dynamische Verformungsmodul im Boden bestimmt werden und ein Materialgesetz angegeben werden. Unter Anwendung einer schichtenweisen Betrachtung der Schwingungsvorgänge konnte eine Aussage über die Tiefenwirkung des Verdichtungsgerätes abgeleitet werden. Die Extrapolation der Meßwerte bis zur Oberfläche des Verdichtungsplanums lieferte eine Erklärung für auftretende Oberflächeneffekte.

Durch die Messung des gesamten Bewegungsprofils von Verdichtungswerkzeug und Boden wird die Grundlage für die Entwicklung eines schwingungstechnischen dynamischen Bodenmodells geschaffen. Die wesentlichen Randbedingungen dieses Modells werden in dieser Arbeit aufgezeigt.

2.7	Untersuchungen zur Materialdämpfung und Superposition in der Bodendynamik
------------	--

Forschungsauftrag: DFG
Forschungsnummer: Fl 136 / 10
Zeitraum: 1992 - 1993
Literatur: 23
Sachbearbeiter: Huber, H. (Diss.: 1996)

Mit den verbesserten Möglichkeiten der Berechnung bodendynamischer Probleme gewinnt die Frage nach der wirklichkeitsnahen Beschreibung des Materialverhaltens an Bedeutung.

In diesem Forschungsvorhaben wurde durch Versuche geprüft, inwieweit die Materialdämpfung für Kompressions- und Scherwellen unterschiedlich und frequenzabhängig ist. Durch Gegenrechnung wurde die Größenordnung der Abweichung zu Berechnungen mit bisherigen Annahmen (für beide Wellenarten gleiche Dämpfungsgrade) bestimmt. Die vorliegende Arbeit zielt dabei auf Schwingungen und Erschütterungen mit geringer Dehnungsamplitude ab, wie sie durch Straßen- oder Schienenverkehr und durch Maschinenfundamente erzeugt werden.

Die Arbeit schließt die Beschreibung der derzeit gebräuchlichsten mathematischen Modelle zur Berücksichtigung der Materialdämpfung bei Schwingungsproblemen und die Versuche und Versuchsgeräte zur Bestimmung von Materialdämpfungsgrößen für Bodenmaterialien mit ein. Außerdem werden die grundsätzlichen Möglichkeiten der Dämpfungsbestimmung mit den Resonant-Column-Gerät dargestellt.

Hinsichtlich der Frequenzabhängigkeit für die Dämpfung konnte ausgesagt werden, daß für Logitudinalschwingungen generell höhere Dämpfungen bei der zweiten Eigenfrequenz als bei der ersten auftreten. Bei der Torsionsschwingung läßt sich diese Aussage nur für den bindigen Boden aufrecht erhalten.

Prinzipiell ist für die Abnahme der Schwingungsamplituden bei dreidimensionalen Problemen im wesentlichen die sogenannte "geometrische Dämpfung", d.h. die Ausbreitung und Verteilung der Schwingungsenergie über einen größer werdenden Bereich maßgebend. Bei völliger Vernachlässigung der Materialdämpfung ergeben sich bei vielen Berechnungsmethoden gewisse numerische Probleme. Bei zweidimensionalen Problemen tritt die Materialdämpfung stärker in den Vordergrund. Aus Vergleichsrechnungen läßt sich die dominierende Bedeutung der Dämpfung von Scherschwingungen, bzw. Scherwellen ersehen.

Für diese Arbeit kann als Resümee festgehalten werden, daß die Dämpfungen von Längsschwingungen sehr wohl höher liegt als für Torsionsschwingungen, daß aber für die rechnerische Behandlung von Schwingungsproblemen im Baugrund eine möglichst gute Erfassung der "Scherdämpfung" ausreicht.

2.8

Aufstellung von Anforderungswerten an den dynamischen Verformungsmodul

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 05.114 / 1998 / CGB

Zeitraum: seit 1998

Sachbearbeiter: Hartmann, K.

Nach der ZTVE-StB 94 darf der dynamische Plattendruckversuch zur indirekten Kennzeichnung des Verdichtungsgrades oder als Ersatz zum statischen Plattendruckversuch für die Ermittlung des Verformungsmoduls auf dem Planum angewendet werden.

Aus Unkenntnis an allgemeingültigen Anforderungswerten für den dynamischen Verformungsmodul (E_{vd}), ist bis jetzt noch für jede Baumaßnahme und Bodenart eine Rückbindung an herkömmliche bodenmechanische Anforderungswerte (E_{v2} , E_{v1} , D_{p1} , n_k usw.) notwendig - "es sei denn", es liegen Erfahrungen über Anhaltswerte aus Baumaßnahmen mit vergleichbaren Randbedingungen vor. In vielen Fällen muß aber der dynamische Plattendruckversuch noch für die entsprechenden Bodenverhältnisse kalibriert werden.

Über eine Reihe von Vergleichsuntersuchungen wird mittels einer Regressionsrechnung der dynamische Plattendruckversuch auf die entsprechende Bezugsgröße kalibriert. Bei dieser Regressionsrechnung wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem dynamischen Verformungsmodul (E_{vd}) und dem Verdichtungsgrad D_{p1} bzw. dem statischen Verformungsmodul (E_{v2} , E_{v1}) aufgestellt. Aufgrund der gefundenen Beziehung kann mit Rückbindung an einen vorgegebenen herkömmlichen Anforderungswert, wie beispielsweise den E_{v2} -Wert, ein E_{vd} -Qualitätskriterium festgelegt werden.

Ergebnisse aus bereits durchgeführten Vergleichsuntersuchungen haben gezeigt, daß sich in Abhängigkeit von Bodenart und Einbaubedingungen zum Teil gute Korrelationen zwischen diesen Bodenkenngößen ergeben.

Resultierend aus den vorstehenden Darlegungen ergibt sich als Ziel dieses Forschungsvorhabens, bodenartabhängige Anforderungswerte für den dynamischen Verformungsmodul (E_{vd}) zu ermitteln. Dadurch soll die Notwendigkeit einer Kalibrierung des dynamischen Plattendruckgerätes bei Regelanwendungen minimiert und ein zielsicherer verbreiteter Einsatz dieses Prüfverfahrens erreicht werden.

Die in dieser Forschungsarbeit festgestellten Grenzwerte sollen u.a. dazu dienen, daß die Anforderung nach der ZTVE-StB 94 bezüglich des Verdichtungsgrades und des Verformungsmoduls auf dem Planum erfüllt werden.

3.1	Grundlagenuntersuchung über Gestaltung und Sicherung von großen Felshohlraumbauten (Kavernen) in Abhängigkeit von Umfang und Güte der felsmechanischen Vorinformationen
-----	--

Forschungsgeber: Deutsche Forschungsgesellschaft

Forschungsnummer: Fl 136/7

Zeitraum: 1987 - 1993

Literatur: 59

Sachbearbeiter: Hönisch, K. ; Trunk, U.

Im Zuge der Bearbeitung des Forschungsvorhabens erwies sich eine Aufteilung der Untersuchungen in zwei Hauptthemen als sinnvoll und nützlich.

Zum einen wurden die Anwendbarkeit probabilistischer Methoden und die daraus ableitbaren Ergebnisse eingehend untersucht. Der Schwerpunkt lag hierbei in der statistischen Analyse maßgebender Parameter sowie der Quantifizierung des Einflusses einzelner Parameter auf Grenzzustände.

Zum anderen wurden Strategien für die Gestaltung großer Felshohlraumbauten entwickelt, die trotz begrenzten Informationsniveaus - vor allem in frühen Projektphasen - zu realistischeren Schätzungen der Gebirgsparameter führen als z.B. Felsklassifizierungssysteme.

Die statistischen und probabilistischen Untersuchungen führen zu einer verbesserten Bewertung vorhandener Informationen und deren Streuung. Für die einzelnen Projektphasen kann daraus der notwendige Untersuchungsumfang abgeleitet werden.

Aus den Ergebnissen der beiden Teilprojekte ergibt sich eine Änderung der Strategie der Erkundungsmaßnahmen. Die Bedeutung geometrischer Faktoren führt zu einer verbesserten Nutzung der Kartierungen. Zunächst mechanisch nicht wirksam scheinende Trennflächenkennwerte werden miteinfaßt, um Parameter zutreffender abschätzen zu können. Aufwendige felsmechanische Versuche können bei detaillierterer Kartierung in frühen Projektphasen eingeschränkt werden.

Die Anwendung statistischer und probabilistischer Methoden bei der Auswertung von Projektdaten zeigt, welche Bestimmungsgenauigkeit der Parameter aufgrund der Abmessungen, der Aufschlüsse und der Versuche erwartet werden können und in probabilistischen Modellen beachtet werden müssen.

3.2	Ein Beitrag zur Vorhersage von Verformungen und Spannungen des Baugrundes und des Ausbaues bei Hohlraumbauten
------------	--

Dissertation: *Technische Universität München*
Jahr: *1989*
Literatur: *14*
Doktorand: *Vega Mayer, S.*

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine Untersuchung über das Verhalten des natürlichen Materials Boden beim Ausbruch eines Hohlraumes im Untergrund. Dafür wurden die theoretischen Betrachtungen mit praktischen Messungen in situ bestätigt.

Es wird eine Methode für die Bestimmung von Materialparametern vorgeschlagen und anhand eines Beispiels bei der Berechnung eines Tunnelquerschnitts der Münchner U-Bahn die Anwendbarkeit gezeigt. Als Vergleich wurde auch das übliche elasto-plastische Modell mit Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb und die assoziierte Fließregel angewandt. Beide Modelle wurden dann den Meßwerten, die während des Baus der U-Bahn aufgezeichnet wurden, gegenübergestellt.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Gewinnung von Stoffparametern mittels Feldversuchen mit einer Aufweitungssonde und üblichen Laborversuchen. Die so gewonnenen Materialparameter beschreiben ein nicht linear elastisches Stoffgesetz, das sich für den Einsatz bei Problemen mit relativ kleinen plastifizierten Zonen sehr gut eignet.

Zuerst wurden Feldversuche mit Hilfe einer Dilatometersonde durchgeführt. Um aus den Versuchsergebnissen Stoffparameter, die einen nichtlinear-elastischen Boden beschreiben, zu gewinnen, wurde eine entsprechende Theorie entwickelt. Diese Theorie wurde in einen Rechenalgorithmus umgesetzt, mit dessen Hilfe die Auswertung zweier Versuche in verschiedenen Bodenarten erfolgte.

Dissertation: Technische Universität München
Jahr: 1993
Literatur: 20
Doktorand: Hönisch, K.

Ein Vergleich ausgeführter Kavernen unterschiedlicher Nutzung zeigt, daß eine Entwurfsstrategie nur bei Beschränkung auf eine Nutzung wie z.B. Wasserkraftzentralen sinnvoll ist. Es werden Hilfsmittel für frühe Phasen der Kavernengestaltung erläutert. Hierzu werden fremde und eigene Erfahrungen verglichen und insbesondere Korrelationen zwischen Kavernengeometrie und felsmechanischen Kennwerten untersucht.

Unvollständige Kenntnis der mechanischen und insbesondere der geometrischen Felsparameter erfordert grundsätzlich übervorsichtige Parameterschätzungen vom Entwerfer. In zehn Untersuchungsstollen wurden deshalb die Verteilungen von Kluftabständen und -ausblüngen eingehend bestimmt. Sie wurden zusammen mit Laborversuchsergebnissen gesammelt, um Anhaltswerte für die Spitzenscherfestigkeit von teilweise durchtrennten Klüften zu finden. Es wird vorgeschlagen, die Gebirgsfestigkeit durch Reduktion der intakten Gesteinsfestigkeit entsprechend drei Faktoren zu bestimmen, die proportional zum ebenen Durchtrennungsgrad, zum Kluftabstand und zum Differenzwinkel zwischen Haupttrennflächen und Kavernenachse sind. Dies setzt jedoch die Verwendung von Rechenverfahren voraus, die nach einer Spannungsüberschreitung nur noch Restscherfestigkeiten verwenden.

Der Gebirgsdeformationsmodul kann in größerer Weise geschätzt werden. Hierfür werden ebenfalls Abminderungen des intakten Gesteinsdeformationsmoduls vorgeschlagen und mit den bisher vorhandenen Daten bestätigt.

Für überwiegend homogenes Gebirge werden empirische Diagramme als Hilfsmittel für den Entwurf der sofortigen Kavernensicherung angegeben. In solchen logarithmischen Diagrammen von Felsqualitätsindex und Kavernenabmessung werden z.B. Spritzbetondicken, Ankerlängen und Ausbauwiderstände dargestellt. Die Darstellung der Ankerrasterflächen gelingt nur teilweise.

Auf diese Weise können zulässige Kavernenabmessungen als Funktion des Felsqualitätsindex ermittelt werden. In ähnlicher Weise können zulässige in situ-Spannungen mit dem Felsqualitätsindex verknüpft werden.

Aus der Interpretation von Messungen an ca. 50 Kavernen-Bauwerken werden Schätzformeln für die Randverformungen bei typischen Seitenverhältnissen von Krafthäusern angegeben. Der Nachweis der Begrenzung der Verformungen ist in frühen Entwurfsphasen nötig und so auch möglich. Die erforderliche Meßinstrumentendichte, die für flexible Sofortsicherung und höhere Ausnutzung der Gebirgsfestigkeit noch an Bedeutung gewinnt, wird mit der Felsqualität verknüpft.

Dissertation: Technische Universität München
Jahr: 1993
Literatur: 18
Doktorand: Trunk, U.

Die Streuung felsmechanischer Parameter wird beim Entwurf von Hohlraumbauten und Böschungen dadurch berücksichtigt, daß vorsichtig abgeschätzte bzw. abgeminderte Parameterwerte verwendet werden. Dieses Vorgehen kann jedoch zu einem sehr konservativen und somit unwirtschaftlichen Entwurf führen, wenn gleichzeitig für alle Parameter ungünstige Werte angesetzt werden. Bei den Trennflächenrichtungen kann aufgrund der räumlichen Streuung ein von der jeweiligen Keilgeometrie unabhängiger Sicherheitsfaktor nicht angegeben werden, da je nach Geometrie flachere bzw. steilere Trennflächen ungünstiger für die Standsicherheit sind.

Mit Hilfe der probabilistischen Analyse der Standsicherheit tetraedrischer Gleitkeile soll untersucht werden, welchen Einfluß die einzelnen Parameter und ihre Streuungen auf das Sicherheitsniveau und somit den Entwurf besitzen. Daraus sollen Hinweise abgeleitet werden, wie bei vergleichbarem Aufwand bessere Erkundungsergebnisse zu erzielen sind. Hierzu wird die Zuverlässigkeitstheorie erster und zweiter Ordnung verwendet. Dies erfordert die Formulierung einer stetigen Grenzzustandsfunktion für den Gleitkeil, die auf der Basis deterministischer Verfahren entwickelt wird.

In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich tetraedrische Gleitkeile behandelt.

Zur Bestimmung der Verteilungsparameter werden Projektunterlagen von ausgeführten bzw. in Planung befindlichen Krafthauskavernen ausgewertet. Die ermittelten Verteilungen und Streuungen der einzelnen Parameter werden mit veröffentlichten Ergebnissen verglichen.

Mit Hilfe von Parametervariationen und der Berechnung ausgeführter Böschungen wird der Einfluß der deterministischen Parameter und der Verteilungsparameter der Basisvariablen auf die Versagenswahrscheinlichkeit analysiert. Der Einfluß von Ausbauwiderstand, Wasserdruck und Erdbebenlasten auf den Sicherheitsindex β wird quantifiziert. Ferner wird geprüft, ob für ein jeweils festes Sicherheitsniveau konstante Partialsicherheitsfaktoren angegeben werden können.

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 5.068 G 80 E / 5.076 G 83 E

Zeitraum: 1980 - 1991

Literatur: 51

Sachbearbeiter: Bräu, G. ; Gahbauer, M. ; Gruber, N. ; Obermayer, J.

Ziel dieser Forschungsarbeit war die arbeitsintegrierte Verdichtungsmessung, d.h., daß durch Abwalzen einer Unterlage mit einer Meßwalze unmittelbar eine qualitative Aussage über den Verdichtungs- bzw. Tragfähigkeitszustand dieser Unterlage möglich wird. Darüber hinaus wurde untersucht, ob sich eine quantitative Zuordnung des dynamischen Meßwertes zu bodenmechanischen Standardgrößen wie Elastizitätsmodul, Dichte (Verdichtungsgrad), Rammwiderstand herleiten läßt.

Im Hinblick auf die richtige Beurteilung des dynamischen Meßwertes und dessen Bewertung aus bodenmechanischer und maschinentechnischer Sicht waren vertiefte Untersuchungen des Systems Walze-Untergrund erforderlich. Um diese Untersuchungen durchführen zu können, wurde ein Verdichtungsmeßgerät entwickelt, dessen meßtechnische Konzeption über die Möglichkeiten der zum Untersuchungszeitpunkt von den Firmen angebotenen Verdichtungsmeßgeräte hinausreichte. Für die Meßwertregistrierung und deren Darstellung mußten z.T. bestehende Meßgeräte bzw. Software angepaßt aber auch neu entwickelt werden.

Durch Vergleichsfahrten, die auf das Untersuchungsziel abgestimmt waren, galt es Parameter der Walze und des Bodens herauszufinden, die den dynamischen Meßwert beeinflussen. Die Untersuchungen wurden mit Hilfe des Forschungskompaktometers durchgeführt. Wenn möglich sollte auch die Art und Größe der Beeinflussung bestimmt werden, um bei einem späteren Meßeinsatz gewisse Randbedingungen so zu wählen, daß Einflüsse auf die Meßwertbildung eliminiert oder durch Korrekturfaktoren ausgeglichen werden können.

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt ist die Frage nach der Meßtiefe. Hierzu wurden u.a. gezielt Fehlstellen in eine Unterlage eingebaut. Um die Möglichkeit einer Zuordnung zwischen herkömmlichen Dichte- und Tragfähigkeitswerten und dynamischen Meßwert untersuchen zu können, wurden entsprechende Versuchsserien auf Kies, Sand, gemischt- und feinkörnigen Böden durchgeführt.

Seitens des Prüfamtes ist neben der Forschungstätigkeit diese Verdichtungsmeßmethode für Kontrollprüfungen auf verschiedenen Baustellen eingesetzt worden. Dazu mußte das Prüfamt spezielle, für den Prüfbetrieb ausgelegte Meßwerverfassungsgeräte und Software für die Meßwertdarstellung entwickeln bzw. entwickeln lassen. Diese neu entwickelten Geräte und Möglichkeiten der Meßwertdarstellung sind für spätere Anwender der dynamischen Verdichtungsmeßmethode sicherlich interessant und werden kurz vorgestellt. Weiterhin werden Erfahrungen aus den Baustelleneinsätzen sowie die Einsatzmöglichkeiten der dynamischen Verdichtungsmessung bei verschiedenen Gründungsmaßnahmen aber auch Anwendungsgrenzen mitgeteilt.

4.2

Erprobung des dynamischen Fallplattenversuchs als Schnellprüfverfahren für die Qualitätssicherung im Erdbau und für ungebundene Tragschichten

Forschungsgeber: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 5.087 G 87 C

Zeitraum: 1987 - 1990

Literatur: 53

Sachbearbeiter: Kudla, W.

Der hohe technische Stand der Erdbaugeräte (Transport-, Einbau-, Verdichtungsgeräte) erlaubt sehr große Schüttleistungen. Die Verfahren für die Verdichtungsprüfung müssen mit diesen Schüttleistungen Schritt halten können. Deswegen ist es erforderlich, daß die Handhabung, die Zeitdauer und die Wirtschaftlichkeit der Prüfverfahren den Schüttleistungen angepaßt sein muß, damit keine unnötigen und unwirtschaftlichen Verzögerungen im Bauablauf auftreten. Das Ergebnis eines Versuches sollte nach Versuchsende sofort vorliegen, damit über eine ausreichende oder nicht ausreichende Verdichtung entschieden werden kann und die Parameter des Verdichtungsprozesses rechtzeitig gesteuert werden können.

Die Bestimmung des Verdichtungsgrades (Dichtemessung durch Volumenersatzverfahren und Proctorversuch) erfordert in der Regel einen Zeitaufwand von mehreren Stunden und das Ergebnis liegt meist erst am nächsten Tag vor. Für die Ausführung des statischen Plattendruckversuches werden 1,5 bis 3 Stunden benötigt. Zudem ist für den Versuch ein schweres Widerlager (LKW) notwendig. Der Versuch kann deshalb bei beengten Platzverhältnissen, wie z.B. in Bauwerkshinterfüllungen und Leitungsgräben nicht eingesetzt werden. Unter diesen Gesichtspunkten erhält die Entwicklung von handlichen Schnellprüfverfahren eine hohe Priorität.

Von der Bundesanstalt für Straßenwesen wurde in Anlehnung an den statischen Plattendruckversuch ein dynamisches Plattendruckgerät entwickelt. Dieses Gerät wurde am Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TU München nachgebaut und die Mechanik und Meßtechnik wesentlich weiterentwickelt. Es ist als Schnellprüfverfahren für die Tragfähigkeitsprüfung ungebundener Schichten einsetzbar.

Ziel der Untersuchungen war es, das dynamische Plattendruckgerät mechanisch und meßtechnisch weiterzuentwickeln, die Randbedingungen für dessen Einsatz festzustellen und Untersuchungen zur Tiefenwirkung des Gerätes vorzunehmen. Des weiteren sollten Korrelationen zu anderen Bodenkennwerten aufgestellt werden. Dazu wurde das Gerät als Zweimassenschwinger modelliert und das erhaltene Modell theoretisch berechnet. Aus den Ergebnissen lassen sich wichtige Schlußfolgerungen in Bezug auf die notwendige Meßtechnik ziehen.

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 5.090 G 88 H

Zeitraum: 1989 - 1993

Literatur: 54

Sachbearbeiter: Stiegeler, R.

Bei dem Forschungsvorhaben wurden neue Schnellprüfverfahren hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeit und Aussagefähigkeit im Leitungsgrabenbau untersucht und den herkömmlichen, in den Vorschriften und Richtlinien verankerten Verfahren vergleichend gegenübergestellt.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden neben den herkömmlichen punktuellen Verfahren (Dichtemessung nach DIN 18125, radiometrische Dichtemessung, statischer Plattendruckversuch nach DIN 18134, Sondierungen nach DIN 4094) die neuen, punktuellen Schnellprüfverfahren (Dynamischer Plattendruckversuch, Sondierung mit der Leitungsgrabensonde) eingesetzt. Desweiteren wurde die Einsatzmöglichkeit von flächendeckenden dynamischen Prüfverfahren mit Vibrationswalze und Plattenrüttler untersucht.

Die Schnellprüfverfahren, besonders die dynamische Lastplatte und die flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle unterliegen neben Einflüssen aus der zu prüfenden Bodenart (Kornverteilung, Kornbeschaffenheit, Wassergehalt, etc.) auch Einflüssen aus der Grabengeometrie. Ebenso wirken sich unterschiedliche Steifigkeiten im Bereich der Meßstelle und die Abstände zu Grabeneinbauten (Leitungen, Schächte, Grabenverbau) aus.

Unter Berücksichtigung einiger Randbedingungen können die Leitungsgrabensonde sowie das dynamische Plattendruckgerät zur Verdichtungskontrolle auch in engen Leitungsgräben eingesetzt werden. Darüber hinaus ist die dynamische Lastplatte auch zur Steifigkeitsprüfung einsetzbar. Auf den untersuchten Bodenarten ergaben sich zum Teil gute Zusammenhänge zwischen den herkömmlichen und den neuen Versuchsergebnissen.

Die Anwendung der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) in Leitungsgräben ist zum gegenwärtigen Stand mit Vibrationswalzen nur unter Einhaltung größerer Abstände zwischen Beschleunigungsaufnehmer und Störstellen (Grabenverbau, Grabenböschungen, Schächte, Leitungen, etc.) möglich. Mit Plattenrüttlern ergaben sich meßtechnische Probleme, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht gelöst werden konnten.

4.4

Anpassung der flächendeckenden dynamischen Prüfung der Verdichtung an die baustellenspezifischen Anforderungen

Forschungsgeber: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 05.104 G 95 C

Zeitraum: seit 1995

Sachbearbeiter: Hartmann, K.

Mit dem Inkrafttreten der neuen ZTVE-Stb 94 und den begleitenden Prüfvorschriften sind verschiedene Wege zur Qualitätskontrolle aufgezeigt worden. Insbesondere die Methode M2 "Flächendeckende Verdichtungskontrolle" (FDVK) stellt hier ein Hauptverfahren dar, welches in starkem Maße Eingang in die Praxis des Erdbaues und des Straßenbaues fand. Der Vorteil der FDVK gegenüber punktuellen Prüfmethode liegt darin, daß die arbeitsintegrierte flächendeckende Prüfung eine Aussage über die Verdichtungsqualität der Grundgesamtheit des Prüfloses ermöglicht. Ergebnisse von umfangreichen Forschungsvorhaben und Baustelleneinsätzen haben die Aussagekraft, die Anwendbarkeit und die Zuverlässigkeit dieses Prüfverfahrens abgesichert. Nach dem derzeitigen Entwicklungsstand ist für die jeweilige Baumaßnahme eine Kalibrierung der dynamischen Meßwerte an herkömmlichen bodenmechanischen Versuchsergebnissen vor Ort durchzuführen, was nach den spezifischen Verhältnissen vor Ort einen unterschiedlichen Aufwand darstellt. Aus dieser Kalibrierung sind dann Grenzwerte als Kriterium für eine ausreichende Verdichtungsqualität abzuleiten.

Das hier vorgestellte Forschungsvorhaben, welches vom Bundesminister für Verkehr (BMV) in Auftrag gegeben wurde, behandelt die "Anpassung der flächendeckenden dynamischen Prüfung der Verdichtung an baustellenspezifische Anforderungen".

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist eine Datensammlung erstellt worden, welche Kalibrierdaten von bundesweit durchgeführten Baumaßnahmen enthält. Auf dieser Basis sollen letztlich allgemeingültige Grenzwerte für bestimmte Regelanwendungen abgeleitet werden. Diese Grenzwerte sollen eine Abnahme der Bauleistung erlauben, ohne jeweils eine Kalibrierung der dynamischen Meßwerte vor Ort durchführen zu müssen.

Ein weiterer Aspekt der in Verbindung mit diesem Forschungsvorhaben betrachtet wurde, behandelt die Positionierung von Meßwalzen der FDVK. Bei den derzeit auf dem Markt erhältlichen Meß- und Dokumentationssystemen müssen die Meßwerte manuell den jeweiligen Baustellenkoordinaten zugeordnet werden. Deshalb wurde innerhalb dieses Teils des Forschungsvorhabens die Möglichkeit der Positionierung mittels GPS und hierzu alternativen Systemen untersucht. Dies geschah im Hinblick auf die erzielbare Genauigkeit der verschiedenen Systeme und der damit verbundenen Kosten.

Durch die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens soll eine einfachere Handhabung der FDVK im Baustelleneinsatz unter wirtschaftlichen Aspekten und die daraus folgenden Vorteile der kontinuierlichen und arbeitsintegrierten Qualitätssicherung ermöglicht werden.

5.1	Wirkungsweise von Geotextilien als Trennlage unter Tragschichten bei intensiver Verkehrsbeanspruchung
-----	--

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr
Forschungsnummer: 5.078 G 84 A
Zeitraum: 1984 - 1987
Literatur: 48
Sachbearbeiter: Bräu, G. ; Laier, H.

Bei dem Forschungsauftrag FE 05.078 G 84 A „Wirkungsweise von Geotextilien als Trennlage unter Tragschichten bei intensiver Verkehrsbelastung“ wurde die Trenn- und Filterfunktion von verschiedenen Geotextilien untersucht. Diese Fragestellung tritt vor allem bei unbefestigten Straßen und Fahrwegen, Baustraßen und ungebundenen Frost- und Tragschichten auf. Durch die intensive dynamische Beanspruchung in Form von Walkarbeit und „Pumpwirkung“ auf dem weichen Untergrund vor allem bei minimierten Oberbaustärken wurden sehr unterschiedliche Verhaltensweisen der verschiedenen Geotextilarten beobachtet.

Die Versuche wurden mit einer fahrbaren Belastungseinrichtung (LKW-Simulation) in einer speziell angelegten Versuchsgrube durchgeführt. Als Untergrund wurde Löß (TL) in verschiedenen Konsistenzen (breiig - weich), als Oberbau Dolomitschotter ($d = 20 - 50$ cm) verwendet.

Durch die intensiven dynamischen Beanspruchungen wurden neue Erkenntnisse über das Filterverhalten (bestehende Kriterien nicht ausreichend) und die Widerstandsfähigkeit der Geotextilien beim Einbauzustand gewonnen. Hier zeigten sich bei kinematisch nicht stabilen Oberbauten deutliche Vorteile einzelner Geotextilarten.

Die Beurteilung des Verhaltens eines Geotextils unter Einbau- und Betriebsbedingungen kann nach den vorliegenden Ergebnissen nur bedingt durch die herkömmlichen textilen Laborversuche erfolgen - die Rückbindung über weitere „in-soil“-Versuche ist erforderlich, wengleich gute Ansatzpunkte bereits in das Merkblatt der FGSV „Anwendung von Geotextilien im Erdbau“ eingeflossen sind.

5.2

Einfluß einer Bewehrung auf das Verformungs- und Tragverhalten des Zweischichtensystems

Forschungsauftrag: Deutsche Forschungsgesellschaft
Forschungsnummer: FI 136/2
Zeitraum: 1984 - 1988
Literatur: 15
Sachbearbeiter: Bauer, A. (Diss.: 1989)

Geotextilien (flächige in Boden eingelegte Gewebe, Vliese, Gitter etc.) finden seit Mitte der 70iger Jahre verstärkten Einsatz im Erdbau. Neben der Funktion der Trennung unterschiedlich gekörnter Boden, der Schaffung hydraulisch und mechanisch wirksamer Zwischenfilter kommt diesen Einlagen im Boden auch statische Bedeutung hinsichtlich der Festigkeitserhöhung bzw. Tragfähigkeitsverbesserung des Bodenmediums zu. Die Beschreibung der tragfähigkeitsverbessernden Wirkung von geotextilen Flächenbewehrungen im bodenmechanischen Zweischichtensystem mit versuchstechnischen und theoretischen Ansätzen war Ziel der hier dokumentierten Arbeit.

Die Gesamtragfähigkeit des bewehrten Zweischichtensystems kann als Summe der Tragfähigkeit des vertikal unverformten Systems und der zusätzlichen Tragfähigkeit infolge von Membrankräften bei großen vertikalen Verformungen verstanden werden. Die Untersuchung der Tragfähigkeit von bewehrten unverformten Zweischichtensystemen wurde unter Verwendung von starr plastischen kinematischen Verschiebungsmodellen rechnerisch mit der Kinematischen Elemente Methode durchgeführt. Die Systemmodellierung erfordert die Einführung des plastischen Durchstanzelementes, dessen Randkraftverteilung über die Plastizitätsbedingung im Elementinneren festgelegt wird.

Die Tragfähigkeitserhöhung durch Membrankräfte bei großen Verformungen kann in Abhängigkeit von den vorgegebenen Größen der Vertikalverformung, der Bewehrungssteifigkeit und der Untergrundtragfähigkeit (bzw. Bettungswirkung) bei Variation der Form der Verformungsmulde so ermittelt werden, daß die Gesamtragkraft des Systems ein Minimum wird. Zur Ermöglichung einer anwendungsgerechten ingenieurmäßigen Tragfähigkeitsberechnung wurde der Spreizkrafteffekt über eine multiplikative Erhöhung der Traglastfaktoren und der Membraneffekt über ein additives Glied in die bekannte Grundbruchgleichung (vgl. DIN 4017) integriert.

Im „Schneebeil“-Versuch (starr plastisches ebenes Modell) ließ sich mit einfachen Mitteln das Tragverhalten des ebenen Systems prüfen. Trotz der Einfachheit des Versuches und der versuchsbedingten Streuungen ergaben sich brauchbare Übereinstimmungen des Bruchverhaltens mit der Berechnung unter Verwendung von kinematischen Elementen. Im kleinmaßstäblichen Zweischichtenbodenmodell können die Bodenspannungen, die Systemverformungen und die Geotextildehnungen gemessen werden. Die Spannungsverteilung in der einfach bewehrten Tragschicht erwies sich bei den untersuchten weichen Systemen infolge von Plastifizierungen in der Tragschicht als geringer, als bei einem Einschichtensystem im elastischen Zustand. Eine Anwendbarkeit der Elastizitätstheorie für das einfach bewehrte Zweischichtensystem ist demnach nicht gegeben.

5.3	Untersuchungen zur Wirksamkeit einer Bewehrung im Zweischichtensystem
-----	--

Dissertation: Technische Universität München
Jahr: 1993
Literatur: 19
Doktorand: Gold, G.

Durch Einlage einer Schichtgrenzbewehrung verbessert sich das Trag- und Verformungsverhalten von Zweischichtensystemen. Trotz des häufigen Einsatzes von Schichtgrenzbewehrungen im Zweischichtensystem sind die für die Traglaststeigerung und Verformungsreduzierung ursächlichen Mechanismen nicht in ausreichendem Maße bekannt. Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war es, die maßgebenden Ursachen für das durch Einlage einer Schichtgrenzbewehrung veränderte Trag- und Verformungsverhalten von lotrecht mittig belasteten Zweischichtensystemen versuchstechnisch und numerisch zu untersuchen.

Um eine möglichst realistische Datenbasis zu erhalten, wurden großmaßstäbliche Feldversuche ausgeführt. Im Anschluß an die Feldversuche erfolgten Berechnungen mittels der Methode der Finiten Elemente (FEM). Hinsichtlich der Traglastvoraussage ergab sich durch den Vergleich mit den Feldversuchen die Notwendigkeit, die Spannungsabhängigkeit der Materialparameter im Rahmen der numerischen Analyse möglichst exakt abzubilden. Zur korrekten Berücksichtigung der Materialparameter wurde eine Erweiterung des verwendeten Stoffgesetzes sowie des Iterationsalgorithmus zur Gleichgewichtsfindung unter Einhaltung des Bruchkriteriums erforderlich.

Mit den bodenmechanischen Erweiterungen des Programmsystems konnte eine gute Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse mit den Feldversuchsergebnissen und eine gute Prognose für die Traglast bewehrter Systeme, die Maximalverformungen in der Symmetrieachse und für die Maximaldehnungen und Zugkräfte der Bewehrung erzielt werden.

Durchstanzvorgänge, die in der Regel bei unbewehrten Systemen den Bruchvorgang einleiten, konnten mit der FEM nur angenähert nachvollzogen werden. Die Systemtraglasten der unbewehrten Systeme wurden um 12 % bis 22 % überschätzt.

Im Rahmen der kinematischen Analyse (KEM) war wiederum die Berücksichtigung der Nichtlinearität der Materialparameter erforderlich. Die Notwendigkeit zur Entwicklung eines Vorstufenoptimierungsverfahrens wurde deutlich. Die KEM stellt hinsichtlich der Traglastermittlung für unbewehrte Systeme eine sehr gute Ergänzung zur FEM dar, da der beim unbewehrten System häufig maßgebende Bruchmechanismus (Durchstanzen der Tragschicht) mit der KEM nachvollzogen werden kann. Eine entsprechend gute Traglastprognose konnte deshalb für unbewehrte Systeme erzielt werden, nachdem die Spannungsabhängigkeit der Materialparameter numerisch berücksichtigt wurde.

Es wurden die maßgeblichen Ursachen für die Verbesserung des Trag- und Verformungsverhaltens des Zweischichtensystems durch Einlage einer Schichtgrenzbewehrung zusammenfaßt.

5.4	Aufstellung eines Bemessungsverfahrens für die Bodenbewehrung mit Vliesstoffen auf der Grundlage der bei Zug- und Zugkriechversuchen mit Bodenkontakt gewonnenen Parameter
-----	---

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr
Forschungsnummer: 05.111 G 97 I
Zeitraum: seit 1997
Sachbearbeiter: Bauer A.

Dieses Forschungsvorhaben baut auf die Ergebnisse der 1994 abgeschlossenen Forschungsarbeit "Untersuchungen zum Kraft-Dehnungsverhalten von Geotextilien unter Bodeneinbaubedingungen" und der 1997 abgeschlossenen Dissertation "Der Einfluß der Verbundwirkung zwischen Boden und Geotextil auf das Verformungsverhalten von bewehrten Steilböschungen" auf und gliedert sich in zwei Schwerpunkte. Ein Schwerpunkt liegt auf der experimentellen Untersuchung des Kraft-Dehnungsverhaltens von Vliesstoffen im Kurz- und Langzeitverhalten und die Herleitung von Materialgesetzen, die dieses Verhalten beschreiben. Der andere Schwerpunkt ist die Ableitung eines Berechnungsmodells zur Beschreibung der Verformungen und damit der Gebrauchstauglichkeit von vliesstoffbewehrten Steilböschungen im Gebrauchszustand.

Die Untersuchungen zum Kraft-Dehnungsverhalten der Geotextilien wurden im sogenannten "Seitendruckgerät" durchgeführt, das einen Zugversuch im Boden unter Auflast ermöglicht. Als Bodenmaterial wurden nichtbindige und bindige Böden verwendet. Die Bodenauflast wurde zwischen 5kPa und 200kPa variiert. Die Versuche zeigten, daß der Bodenkontakt das Kraft-Dehnungsverhalten und auch das Kriechverhalten von Vliesstoffen entscheidend beeinflusst und sich die Dehnsteifigkeiten der Vliesstoffe fast proportional zur Bodenauflast vergrößern. Bei den untersuchten Geweben war dieser Einfluß des Bodens und der Bodenauflast gering. Diese Versuchsergebnisse bestätigten die Erfahrung aus Großversuchen, daß auch Vliesstoffe als Bewehrungselemente eingesetzt werden können.

Zur Berechnung der Verformungen von geotextilbewehrten Steilböschungen und damit zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit stehen derzeit nur vergleichsweise aufwendige numerische Berechnungsverfahren wie die Methode der Finiten Elemente FEM zur Verfügung. Großversuche und Messungen an bestehenden Steilböschungen sowie deren Nachrechnung mit der FEM zeigten, daß im Gebrauchslastbereich infolge des guten Verbundes kaum Gleitungen zwischen Boden und Geotextil auftreten. Auf der Grundlage dieser Erfahrung konnte ein Berechnungsmodell abgeleitet werden, mit dem die Wandverformungen von bewehrten Steilböschungen näherungsweise berechnet werden können. Das Berechnungsmodell basiert auf klassischen Lamellenverfahren und berechnet Geotextilzugkräfte und die zugehörigen Dehnungen in den Bewehrungslagen. Durch Integration der Dehnungen wird die Verformung an der Front der Steilböschung ermittelt. Anhand des Berechnungsmodelles läßt sich auch ohne aufwendige numerische Rechenverfahren der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von bewehrten Steilböschungen führen.

5.5	Der Einfluß der Verbundwirkung zwischen Boden und Geotextil auf das Verformungsverhalten von bewehrten Steilböschungen
------------	---

Dissertation: Technische Universität München

Jahr: 1997

Literatur: 26

Doktorand: Bauer, A.

In bewehrten Steilböschungen treten Beanspruchungen des Verbundmaterials aus Boden und Geotextil durch Schubkräfte, Zugkräfte und durch Querkkräfte auf. Besonders wichtig und nur teilweise untersucht ist das Verhalten unter der Zug- und der Querkraftbeanspruchung. Diese beiden Beanspruchungsarten wurden experimentell und analytisch genauer untersucht.

Für die Zugversuche wurde ein Versuchsaufbau benutzt, der eine Untersuchung des Kraft-Dehnungsverhaltens von Vliesstoffen und Geweben im Kontakt mit Boden unter Auflast ermöglicht. Dabei wurden im Kurzzeitversuch das Verhalten bis zum Bruch, im Langzeitversuch das Kriechverhalten unter konstanter Last untersucht. Variiert wurden Bodenarten und Bodenauflast. Aus den Versuchsergebnissen wurden für beide Beanspruchungsfälle Beziehungen abgeleitet, die das jeweilige Verhalten beschreiben. Diese Beziehungen konnten bei Starrkörperuntersuchungen als auch bei numerischen Verfahren wie der Finiten Elemente Methode FEM angewendet werden.

Zur Untersuchung der Querkraftbeanspruchung wurde ein Versuchsaufbau benutzt, der eine Beanspruchung auf das Geotextil- Bodensystem aufbringt, die der im Übergangsbereich zwischen dem abgleitenden und dem rückhaltenden Teil der Steilböschung entspricht. Bei den umfangreich meßtechnisch bestückten Versuchen mit Gewebe- und mit Vliesstoffbewehrungen wurden gegenüber unbewehrten Versuchen große Steigerungen des Scherwiderstandes und damit deutliche Traglasterhöhungen festgestellt. Durch die sehr gute Übereinstimmung der Meßwerte mit Rechenergebnissen aus FEM-Berechnungen konnte sowohl die FEM-Modellierung als auch die aus den Zugversuchen gewonnenen Materialbeziehungen überprüft und bestätigt werden.

In einem weiteren Schritt wurde ein Großversuch mit einer vliesstoffbewehrten Steilböschung nachgerechnet. Anhand von FEM-Berechnungen wurde der Einfluß von Auflasten, Bodensteifigkeit, Geotextilsteifigkeit und Scherparameter des Bodens abgeleitet und damit das Tragverhalten der bewehrten Steilböschung untersucht.

Neben den aufwendigen numerischen Berechnungen wurde ein Berechnungsmodell vorgeschlagen, mit dem man die Verformungen und Frontverschiebungen einer Steilböschung näherungsweise ermitteln kann. Anhand von Beispielen wurden die einzelnen Rechenschritte des Modells dargestellt und die Frontverschiebungen von unterschiedlich bewehrten Steilböschungen verglichen.

5.6

Untersuchungen über das Spannungs - Verformungs - Verhalten von mehrlagigen Kunststoffbewehrungen in Sand

Dissertation: Technische Universität München
Jahr: 1998
Literatur: 27
Doktorand: Nimmesgern, M.

In den letzten Jahren wurde es zum einen durch die Verknappung von Baugrund und zum anderen durch gestiegene Erwartungen an die Mobilität zunehmend erforderlich, steile Geländesprünge auszubilden. Hierzu können neben klassischen Bauverfahren auch die in der Textilindustrie neuerdings entwickelten hochzugfesten Geotextilien eingesetzt werden.

Parallel zu dieser Entwicklung in der Bautechnik wurden in der Textiltechnik hochzugfeste synthetische Kunststoffe entwickelt, die zunehmend in der Technik eingesetzt werden konnten. Diese flächenhaften Werkstoffe wurden auch erfolgreich alternativ für die korrosionsanfälligen Stahlbänder in Schüttungen eingelegt. Die Werkstoffe werden als "Geokunststoffe", die Bauweise als "Kunststoff-Erde-Stützbauweise" bezeichnet.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zunächst die Ergebnisse von ausgesuchten Großversuchen an geokunststoffbewehrten Stützkonstruktionen bewertet. Entgegen den derzeit gebräuchlichen Bemessungsverfahren wurde bei diesen Versuchen festgestellt, daß erst bei extrem großen Auflasten größere Dehnungen in den Bewehrungsmaterialien initiiert werden konnten. Dies läßt darauf schließen, daß bereits mit relativ geringen Bewehrungsdeformationen und damit Bewehrungskräften ein Verspannungszustand erreicht werden kann. Zur Überprüfung wurde ein großmaßstäbliches Biaxialversuchsgerät entwickelt, um das Spannungs- und Verformungsverhalten von mehrlagig bewehrtem Erdstoff unter mechanisch nachvollziehbaren Randbedingungen zu untersuchen.

Es wurde ein kontinuumsmechanischer Ansatz zur Beschreibung des Spannungs- und Verformungszustandes erarbeitet, wobei der bewehrte Erdkörper als quasi-monolithischer Körper betrachtet wurde. Zusätzlich wurde der jeweilige Schubspannungszustand durch Ermittlung der Schubspannungsintensität ermittelt.

Mit dem gewählten Ansatz wurde das produkttypische mechanische Verhalten der eingesetzten Bewehrungsprodukte beschrieben und den Ergebnissen des unbewehrten Erdstoffes gegenübergestellt. Durch eine Vlieseinlage änderte sich das nichtlineare Spannungs- und Verformungsverhalten des Sandes nur geringfügig. Über den gesamten untersuchten Verformungsbereich konnte eine Bewehrungswirkung nachgewiesen werden. Das Gewebe und das Geogitter zeigten ein generell anderes mechanisches Verhalten im Vergleich zum unbewehrten Sand. Bei diesen Produkten wurde eine fast lineare Spannungs-Verformungs-Beziehung festgestellt. Während das Geogitter bereits unmittelbar nach Belastungsbeginn eine bewehrende Wirkung erzeugte, konnte dieser Effekt bei dem Gewebe erst nach einer Anfangsverformung beobachtet werden. Danach konnte das Gewebe entsprechend seiner extrem hohen Zugfestigkeit große Normalspannungen mit relativ geringen Zusatzverformungen aufnehmen.

6.1

Festigkeitsprüfungen an Geotextilien

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 5.075 G 83 C

Zeitraum: 1982 - 1985

Literatur: 47

Sachbearbeiter: Laier, H. ; Lang, K.

An verschiedenen Industrieprodukten von Vliesen bis zu Geweben, waren Streifenzugversuche in Anlehnung an die DIN 53 857, Teil 1 und 2 und Stempeldurchdruckversuche nach DIN 54307 durchzuführen. Es sollte überprüft werden, ob und in welcher Weise Korrelationen zwischen den Ergebnissen dieser beiden Prüfmethoden bestehen. Dabei galt es vor allem, den vom Geräteaufwand her einfacher durchzuführenden Stempeldurchdruckversuch zu werten und seine Bedeutung im Rahmen der Güteüberwachung zu beurteilen. Außerdem wurden Homogenitätsprüfungen (Dicke und Flächengewicht) in großem Ausmaße durchgeführt.

Es wurde festgestellt, daß deutlich ausgeprägte Korrelationen zwischen den Ergebnissen der Stempeldurchdruckversuche und der Streifenzugversuche bestehen. Insbesondere innerhalb von Produktreihen können aus den Ergebnissen des einen Versuches mit im allgemeinen ausreichender Genauigkeit Rückschlüsse auf die Größenordnung der beim anderen Versuch zu bestimmenden Kenngrößen gezogen werden. Bei der Klassifizierung von Geotextilien sowie bei Eignungs- und Kontrollprüfungen kann deshalb davon abgesehen werden, Stempeldurchdruckversuche und Streifenzugversuche nebeneinander durchzuführen.

Im Hinblick auf den technischen Aufwand (bezüglich der Einspannung der Proben) läßt sich der Stempeldurchdruckversuch einfacher und auch in einem Baustellenlabor durchführen. Im Gegensatz dazu erfordert der Streifenzugversuch besondere Prüfmaschinen und -einrichtungen, die nur an speziell ausgerüsteten Materialprüfungsstellen vorhanden sind. Außerdem ist die unterschiedliche Beanspruchung der Proben in beiden Versuchen zu berücksichtigen. Beim Stempeldurchdruckversuch werden die zu untersuchenden Proben zentralsymmetrisch beansprucht und verformt, wobei sich anisotrope Eigenschaften nur wenig auswirken. Im Streifenzugversuch werden dagegen jeweils richtungsmäßig ausgewählte Proben auf Zug beansprucht, so daß ein anisotropes Verhalten gezielt untersucht werden kann.

Im Hinblick auf die allgemeine anwendungsbezogene Beanspruchung von Geotextilien empfiehlt es sich aus den genannten Gründen, den Stempeldurchdruckversuch für die Klassifizierung von Geotextilien bzw. für Eignungs- und Kontrollprüfungen vorzuziehen. Der allgemein mehr „textilprüfungsmäßige“ Streifenzugversuch ist aber eine wertvolle Ergänzung zur Untersuchung anisotroper Eigenschaften von Geotextilien, besonders wenn diese in der Praxis einseitigen richtungsabhängigen Beanspruchungen ausgesetzt sind.

Bei beiden Versuchen bleibt aus bodenmechanischer Sicht zu beachten, daß es sich lediglich um reine Materialprüfungen handelt, jedoch keine Aufschlüsse über das Verbundverhalten Boden-Geotextil gewonnen werden können.

6.2	Entwicklung von Laborprüfmethode n zur Bestimmung der Wirkungsweise von Geotextilien im Boden unter dynamischen Beanspruchungen
-----	--

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 5.086 G 86 C

Zeitraum: 1986 - 1990

Literatur: 48

Sachbearbeiter: Bräu, G. ; Laier, H.

Bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens „Wirkungsweise von Geotextilien unter intensiver dynamischer Beanspruchung 5,078 G 84 A“ wurden in einem Versuchsstand die Einwirkungen eines überrollenden Rades auf das System Geotextil / Boden untersucht.

Es zeigten sich eine Vielzahl von Phänomenen, die die Unterschiede in der Wirkungsweise der verschiedenen geotextilen Produkte unterstreichen. Insbesondere waren es Fragestellungen bezüglich der Trennfunktion, die bei bestimmten Geotextilien nur sehr unzureichend war, und der Filterwirkung, die mit bekannten Berechnungsansätzen infolge der dynamischen Beanspruchung nicht zu erfassen war.

Deshalb ist für das Forschungsvorhaben zur Entwicklung von Laborprüfmethode n ein Laborgerät zur Bestimmung der Wirkungsweise von Geotextilien im Boden unter dynamischen Beanspruchungen entwickelt werden, das es erlauben sollte, die bei den Fahrversuchen beobachteten Phänomene im kleineren Maßstab abzubilden, einer Quantifizierung zugänglich zu machen und für die praktische Anwendung Auswahlhilfen zur Verfügung zu stellen.

Insgesamt ist festzustellen, daß sich die vorgestellte labormäßige Versuchseinrichtung für die Eintragung von dynamischen Lasten in Geotextil/Boden-Systeme bewährt und kongruente Ergebnisse zu den großmaßstäblichen Fahrversuchen geliefert hat. Sie erlaubt eine Vielzahl von Variationen in Belastung und Systemaufbau, die dem großen Spektrum von Fragestellungen sowohl aus Fahrbeanspruchungen unbefestigter Fahrstraßen als auch dem Verhalten während des Einbaues von Geotextilien bei beliebigen Erdbauwerken gerecht wird.

Die mit großem Einsatz und Aufwand erstellte Versuchsapparatur ist- soweit bekannt -auch als einzige in der Lage, die komplexen Zusammenhänge zwischen Materialwanderungen, Filterwirkungen und Beschädigungseffekten global und signifikant entsprechend den Beanspruchungen unter Verkehrsbelastungen maßstäblich nachzuzeichnen. Allerdings bedarf es weiterer Untersuchungsreihen um die Bandbreite der diversen Einflüsse abzudecken.

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 5,094 G 90 C

Zeitraum: 1991 - 1994

Literatur: 58

Sachbearbeiter: Bauer, A. ; Bräu, G.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, das Kraftdehnungsverhalten von Geotextilien zu untersuchen, da sich das Verformungsverhalten durch den Bodenkontakt grundlegend verändert. Diese Veränderung im Verhalten ist bisher nur unzureichend quantifizierbar und kann so in den derzeit gebräuchlichen Bemessungsverfahren nicht angesetzt werden. Diese Unsicherheit führt in den Bemessungsverfahren zu geringen Ausnutzungsgraden der Geotextilien und damit zu sicherheitsmäßig nicht bewertbaren und häufig nicht wirtschaftlichen Ausführungen.

Das Kraft-Dehnungsverhalten von Geotextilien unter einer Zugbeanspruchung im Boden wurde im Seitendruckversuch bei unterschiedlichen Seitendrücken und verschiedenen Bodenarten ermittelt. Durch den Vergleich des Verhaltens an Luft, in einem Kies-Sandgemenge und in einem Schluff konnte der Einfluß des Bodens und der Bodenart bestimmt werden. Der Einfluß der Auflast konnte durch unterschiedlich hohe Drücke in den seitlich angeordneten Luftkissen simuliert werden. Untersucht wurden drei Vliesstoffe, die sich in Rohstoff und Verfestigungsart unterschieden. Bei den Versuchen wurde die Zugkraft über die Versuchsdauer konstant gehalten und sowohl die Kurzzeit- als auch die Kriechverformungen der Geotextil-Bodenverbundsysteme ermittelt.

Die Versuche zeigten, daß das Verhalten entscheidend vom Boden geprägt wird. Der Verformungsmodul der Geotextilproben ist im Verbund mit dem Boden höher als bei den freigehaltenen Versuchen. Verursacht wird dies durch die Schubspannungsübertragung zwischen Boden und Geotextil und durch die Einlagerung von Bodenteilchen in die Struktur der Geotextilien. Diese Einlagerung und somit auch der innere Verbund ist umso größer, je leichter sich Bodenteilchen in die Struktur einlagern können.

Insgesamt lieferten die Ergebnisse der Versuche und Berechnungen Ansätze für die genauere Erfassung des Verhaltens von Bewehrungen aus Geotextilien im Boden. Erste vergleichende FE-Nachrechnungen von in der Literatur berichteten Großversuchen bestätigen dies. Aus diesen Ergebnissen sollte in einem späteren Entwicklungsschritt ein einfaches Bemessungsverfahren entwickelt werden, das einerseits die Verformungen berücksichtigt und so den Gebrauchszustand besser beschreibt, andererseits aber durch die bessere Ausnutzbarkeit der Materialien zu wirtschaftlichen Lösungen führt.

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 5.069 G 80 G

Zeitraum: 1981 - 1990

Literatur: 50

Sachbearbeiter: Ostermayer, H. ; Wälzel, E.

Um die Langzeitstandsicherheit und die Langzeitverformungen von Hängen und Böschungen beurteilen zu können, müssen mögliche Kriechvorgänge und die dabei zu erwartenden Festigkeitsverluste des anstehenden Bodens bekannt sein. Zur Ermittlung des Kriechverhaltens bindiger Böden existieren jedoch keine allgemein anerkannten Versuchstechniken und Auswertungsmethoden. Es sollte deshalb untersucht werden, inwieweit die vom Zeitbedarf und von der Versuchstechnik her aufwendigen spannungs-gesteuerten Kriechversuche zur Ermittlung der wichtigsten Parameter geeignet sind und inwieweit diese für die Anwendung in der Praxis durch verformungsgesteuerte Versuche in herkömmlichen Triaxialzellen, d.h. durch Standard-Prüfverfahren nach DIN 18137 ersetzt oder ergänzt werden können. Im Vordergrund stand dabei die Frage, wie die Kriechempfindlichkeit (das Kriechpotential) eines Bodens durch Laborversuche zu erkennen ist und wie gegebenenfalls die Abnahme der Festigkeit mit der Zeit bis zum Grenzwert der Langzeitfestigkeit (= Dauerfestigkeit) ermittelt werden kann. Außerdem sollte auf die Bestimmung der Kriechbruchdauer und der Bruchverformungen eingegangen werden.

Die im Rahmen der Forschungsarbeit durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, daß die aufwendigen Kriechversuche nur zur Ermittlung des zeitlichen Verformungsverhaltens und der Kriechbruchdauer erforderlich sind. Zur Abschätzung der Langzeitfestigkeit und der möglichen Kriechvorgänge bei Hängen und Böschungen sind in der Regel verformungsgesteuerte D-Versuche oder bevorzugt CU-Versuche nach DIN 18137 an ca. 6 Proben mit Variation der Vorschubgeschwindigkeiten in Grenzen von 1:50 ausreichend.

Es wurde festgestellt, daß unter Berücksichtigung der Streuung der Versuchswerte der Einfluß der Schergeschwindigkeit auf die Bruchfestigkeit durch verformungsgesteuerte D- und CU-Versuche ermittelt und daraus die Langzeitfestigkeit extrapoliert werden kann. Eine Abnahme der Scherfestigkeit mit abnehmender Vorschubgeschwindigkeit ergab sich jedoch nur bei den ungestörten Proben und nicht bei den aufbereiteten und vorkonsolidierten Proben. Mit dem empfohlenen verformungsgesteuerten Prüfverfahren mit Standardgeräten nach DIN 18137 sollte deshalb noch an ungestörten Proben von kriechempfindlichen Tonen, z.B. aus bekannten Rutschzonen, zusätzliche Erfahrungen gesammelt werden.

Im Hinblick auf die Frage, ob Kriechbrüche unabhängig vom Spannungszustand nach Erreichen eines kritischen Verformungsmaßes auftreten, sind in der Regel keine Kriechversuche erforderlich, da auch die mit den einfacheren verformungsgesteuerten Triaxialversuchen ermittelten Bruchverformungen zugrunde gelegt werden können.

7.2	Einfluß des Spannungszustandes auf die Festigkeits- und Verformungseigenschaften silikatgelinjizierter Sande
-----	---

Forschungsauftrag: Institut für Bautechnik
Forschungsnummer: IV 1-5-420/84
Zeitraum: 1984 - 1987
Literatur: 4
Sachbearbeiter: Schubert, A. (Diss.: 1985)

Einpreßarbeiten zur Abdichtung und Verfestigung des Baugrundes sind heute ein im Grundbau vielfach angewendetes Spezialverfahren mit einer breiten Anwendungspalette. Sie finden im Talsperrenbau (Injektionsschleier), U-Bahnbau (Gewölbeinjektion) und als Unterfangungsmaßnahme (Giebelunterfangung) ihre Hauptanwendung.

Aus der Praxis ist bekannt, daß silikatgel-verfestigte Böden unter Dauerbeanspruchung z.T. erhebliche Kriechverformungen erleiden können. Bisher wurde diesen Tatbeständen vor allem durch die Einführung erhöhter Sicherheitsfaktoren Rechnung getragen, ohne daß sich daraus näherungsweise abzuschätzende oder sogar quantifizierbare Sicherheiten hätten ableiten lassen. Moderne Anforderungen an Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von Bauelementen setzen in Bezug auf die Dimensionierung injizierter Erdkörper sowohl die Kenntnis als auch die Prüfbarkeit des zeitabhängigen Spannungs-Verformungsverhaltens silikatgel-verfestigter Böden voraus.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Versuch unternommen, für chemisch verfestigte Böden ein Verfahren zu entwickeln, mit dessen Hilfe sich vergleichsweise einfache Stabilitätskriterien festlegen lassen. Aufbauend auf der von Singh und Mitchell für Kriechvorgänge von Böden allgemeingültig formulierten Kriechfunktion, wurden die materialspezifischen Eigenschaften silikatgel-injizierter Korngerüste in einaxialen Retardationsversuchen von max. 40 Tagen Versuchsdauer untersucht und ausgewertet. Dabei zeigte sich, daß das Kriechen silikatgel-injizierter Sande unter Dauerbeanspruchung bei stabilem Verhalten schon nach ca. 1 Tag durch die einfache Funktion $\epsilon'(1) = \epsilon' \cdot t$ hinreichend genau beschrieben werden kann. Diese Funktion sagt aus, daß das Produkt aus Stauchungsrate ϵ' und Zeit t während eines Zeitraums zwischen ca. 25 und 30 und 300 bis 600 Stunden zu jedem beliebigem Zeitraum konstant ist. Da diese Konstante $\epsilon'(1)$ unmittelbar als Stabilitätskriterium zu werten ist, wurde sie als "Kriechmaß" bezeichnet.

Auf der Basis aller in dieser Arbeit ausgewerteten Versuche könnten silikatgel-injizierte Sande, die im einaxialen Retardationsversuch ein Kriechmaß^{ca} von $\epsilon'(1) < 0,12$ aufweisen als stabil eingestuft werden, d.h. für diese Proben ist auf Dauer von einem Abklingen der Kriechverformungen auszugehen.

Zunächst sollte die Zulässigkeit dieses Stabilitätskriteriums eingehend an Proben, die mit einem Einpreßmittel unter Verwendung anderer organischer Reaktive injiziert wurden, überprüft werden. Vorläufig dürfte dieses Stabilitätskriterium in Anbetracht der vorhandenen Sicherheiten, die in Bezug auf labormäßig und "in-situ" hergestellten Injektionskörpern nachgewiesen wurden, eine wertvolle Hilfe für erste Bemessungsgrundlagen liefern.

7.3	Einarbeitung der "Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen" in DIN 4017 - Grundbruchberechnungen
-----	--

Forschungsauftrag: Institut für Bautechnik, Berlin

Forschungsnummer: IV 1-5-435 / 85

Zeitraum: 1985 - 1987

Sachbearbeiter: Peintinger, B.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens war die Anwendung der „Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen“ auf Grundbruchberechnungen für schräg- und außermittig belastete Fundamente zu untersuchen. Hierbei war zum einen der gemeinsame Einfluß von Horizontalkraft H und Vertikalkraft V als voneinander unabhängige Basisvariable zu erarbeiten. Zum anderen war für das spezielle Beispiel einer Stauwand mit im wesentlichen streuenden Horizontalkraftanteil die Allgemeingültigkeit der getroffenen Festlegungen zu überprüfen.

Es wurde unter Berücksichtigung verschiedener Annahmen ein stochastisches Bodenmodell erstellt und Vergleichsberechnungen damit ausgeführt.

Durchgehend hat sich bei allen Berechnungen gezeigt, daß es bei schräg und außermittig belasteten Fundamenten grundsätzlich erforderlich ist zu unterscheiden, ob die Vertikallast haltend oder abtreibend wirkt. Die quantitativen Ergebnisse beruhen natürlich auf den dem Vergleich zugrunde gelegten vereinbarten Annahmen über die Rechenwerte bzw. charakteristischen Werte der Scherparameter wie Verteilungstyp und Verteilungsparameter. Dadurch sind bei Bewertung der Zahlenergebnisse auch stets diese Rechenannahmen kritisch zu beurteilen.

Es wäre zu überprüfen, ob ein weiterer Ausbau des stochastischen Bodenmodells in Bezug auf eine Autokorrelationsstruktur realistischere Ergebnisse liefern würde.

Mit den getroffenen Annahmen für das stochastische Modell konnte aber die grundsätzliche Anwendbarkeit des neuen Sicherheitskonzeptes auf das Problem der Grundbruchberechnung und zur Herleitung von Teilsicherheitsbeiwerten auch für schrägen und außermittigen Lastangriff gezeigt werden.

Forschungsauftrag: Deutsche Forschungsgesellschaft
Forschungsnummer: FI 136/5/9
Zeitraum: 1986 - 1993
Literatur: 61
Sachbearbeiter: Schulze, A.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Beurteilung und die Ermittlung des Materialverhaltens des Asphaltbetons für Kerndichtungen in Schüttdämmen. Es sollten konstruktive Folgerungen für Geometrie und Wahl der Materialien für Stützkörper, Übergangszone und Dichtungskern getroffen werden.

Zur Ableitung charakteristischer Belastungspfade im Asphaltbetonkern wurden Messungen an Dämmen ausgewertet. Herangezogen wurden die gut instrumentierten, mit einer Asphaltbetonkerndichtung ausgestatteten Staudämme Finstertal, Große Dhünn und Kleine Kinzig. Bemerkenswert beim Staudamm Kleine Kinzig sind die 3 Spannungsgeber in der Kernaufstandsfläche, die die Messung der Vertikalspannungen im untersten Teil des Asphaltbetonkerns ermöglichen. Die Staudämme Finstertal und Große Dhünn zeichnen sich dagegen durch die Besonderheit aus, daß sie Meßsysteme besitzen, die eine Bestimmung der Dickenänderung des Asphaltbetonkerns erlauben. In diesem Zusammenhang wurde im vorliegenden Forschungsbericht die Funktionsweise des durchdringungsfreien Dickenmeßgeräts, das beim Staudamm Finstertal zur Anwendung gekommen ist, detailliert dargestellt und auf mögliche Fehlerquellen in den Meßergebnissen untersucht.

Weiterhin wurden geeignete Stoffansätze zu Finite-Element-Berechnungen für Dämme zusammenfassend dargestellt. Ergänzend hierzu wurden häufig angewendete rheologische Modelle, die zur Beschreibung des Stoffverhaltens von Bitumen und Asphaltbeton herangezogen werden können, bewertet und einander gegenübergestellt.

Ein wichtiger Schwerpunkt der Untersuchungen bestand in der Auswertung der bisherigen veröffentlichten Laborversuche an Asphaltbetonproben für den Wasserbau. Es wurde auf den großen Einfluß des Belastungspfades auf das Spannungs-Verzerrungsverhalten - insbesondere beim Asphaltbeton - hingewiesen. Desweiteren wurde die Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Laborversuchen an Asphaltbeton für straßenbauliche Zwecke untersucht.

Es hat sich die Notwendigkeit weiterführender Laborversuche, die den Randbedingungen einer Asphaltbetonkerndichtung sehr nahe kommen, gezeigt. Hierzu wurde eine Konzeption für entsprechende Laborversuche erarbeitet. Vorgeschlagen wurden Biaxialversuche, die den ebenen Verzerrungszustand, wie er in Dämmen vorherrscht, im Probekörper gewährleisten. Die Versuchsparameter Temperatur, Bindemittelgehalt, Art der Belastungspfade sollten entsprechend variiert werden, um deren Einfluß auf das Materialverhalten zu erfassen.

7.5

Bruchvorgänge infolge der Isareintiefung südlich Münchens und die kritischen Höhen der Talhänge

Dissertation: Technische Universität München
Jahr: 1988
Literatur: 12
Doktorand: Baumann, H.J.

Im bayerischen Alpenvorland sind die tiefreichenden Tertiärsedimente gebietsweise von Moränen, Schottern und Seetonen des Quartärs bedeckt. Die vom nördlichen Alpenrand der Donau zustrebenden Gebirgsflüsse haben sich stellenweise tief in die Quartärablagerungen und auch in das darunter liegende Tertiär eingegraben. Dabei haben sich an übersteilten Talhängen immer wieder Abbrüche ereignet. Ausgedehnte Rutschmassen entlang der Flußläufe geben Zeugnis von diesen Vorgängen, die auch heute noch beobachtet werden, obwohl die Flußsohlen im allgemeinen durch flußbauliche Maßnahmen in ihrer Höhe weitgehend fixiert sind.

Bei Rutschereignissen überwiegen tiefreichende, grundbruchartige Vorgänge, die zunächst zu großscholligen Bruchkörpern führen und erst im weiteren Verlauf eine stärker zerlegte Rutschmasse bilden können. Auch bei unterbundener Tiefenerosion können diese Bruchvorgänge in Gang gehalten werden, indem am Fuß des noch ungebrochenen Hanges lagernde Rutschmassen durch einen Neuanbruch in der Nachbarschaft so weit verschoben werden, bis auch hier eine kritische Höhe erreicht wird. Derartige Vorgänge werden im Isartal seit Herbst 1970 genauer verfolgt. Davon betroffen sind Verkehrswege und Rohrleitungen, die das Isartal queren, Wasserkraftanlagen sowie die Bebauung auf den Hochufern. Diese Einrichtungen werden von wiederauflebenden Bewegungen in bereits vorhandenen Rutschmassen und auch von unvermutet auftretenden Neuanbrüchen gefährdet. Letztere waren Gegenstand der Untersuchungen. Diese beschränkten sich auf Talabschnitte, in welchen die weitgehend horizontale Schichtfolge des ungefalteten Tertiärs mit dicht gelagerten Sanden und Sandmergeln, festen und auch mineralisch verfestigten Mergeln sowie halbfesten und häufig durch Trennflächen zerlegten Tonmergeln von dicht gelagerten Schottern bedeckt werden. Letztere sind teilweise zu Nagelfluh verfestigt. Das Ergebnis der Untersuchungen ist aber auf ähnliche Situationen übertragbar, in welchen Schichten geringer Festigkeit und Steifigkeit von solchen höherer Festigkeit und Steifigkeit überlagert werden. Diese Bedingungen werden auch von homogenen, aber hoch vorbelasteten Böden erfüllt, wenn mit zunehmender Tiefe das Überkonsolidierungsverhältnis abnimmt.

Ein Vergleich von drei sehr unterschiedlichen Berechnungsverfahren (FE-Berechnung sowie Grenzgleichgewicht in schichtigem Zonenbruch bzw. kinematisch möglichem Starrkörpersystem) zeigt die Grenzen der rechnerischen Ermittlung kritischer Hanghöhen auf. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Berechnungsergebnisse auf die in der Natur sich einstellenden kritischen Hanghöhen abzustimmen. Diese können aus Bruchbeobachtungen abgelesen werden oder sie sind aus Form und Aufbau bereits vorhandener Bruchschollen zu rekonstruieren. Das zuletzt genannte Verfahren führt im Isartal häufig zum Erfolg. Berechnungen werden dadurch allerdings nicht überflüssig. Sie ermöglichen es, die Einflüsse von Laständerungen zuverlässig abzuschätzen und helfen, das Bruchgeschehen zu deuten.

7.6	Beitrag zum zeit- und temperaturabhängigen Materialverhalten von Asphaltbeton für Kerndichtungen in Schüttdämmen unter besonderer Berücksichtigung des ebenen Verzerrungszustandes
-----	---

Dissertation: Technische Universität München
Jahr: 1996
Literatur: 24
Doktorand: Schulze, A.

Auf der Grundlage der Auswertungen von Meßergebnissen an bestehenden Dämmen mit Asphaltbetonkerndichtung (Forschungsauftrag Fl 136/5/9 der Deutschen Forschungsgesellschaft) wurden charakteristische Belastungspfade für den Asphaltbeton abgeleitet. Es wurde nachgewiesen, welchen großen Einfluß die Art des Belastungspfades auf das Verzerrungsverhalten hat. Vor diesem Hintergrund wurden die bisher veröffentlichten Versuche an Asphaltbetonproben aus dem Anwendungsbereich des Wasserbaus kritisch gegenübergestellt und bewertet. In diesem Zusammenhang hat sich gezeigt, daß trotz der großen Vielzahl der Veröffentlichungen aus dem Anwendungsbereich des Straßenbaus nur ein geringfügiger Teil der Laborversuche sinnvoll auf die im Zusammenhang mit einer Asphaltbetonkerndichtung auftretenden Fragestellungen Anwendung finden kann.

Bei Dämmen kann in der Regel von einem ebenen Verzerrungszustand ausgegangen werden. Da die Versuchsbedingungen den Randbedingungen einer Innendichtung möglichst nahe kommen sollten, wurden als weiterführende Laborversuche Biaxialversuche gewählt. Es wurde ein völlig neuartiges Biaxialgerät konzipiert. Das Gerät zeichnet sich durch sehr reibungsarm geführte Lastplatten aus, die die Asphaltbetonprobe zu jedem Zeitpunkt des Versuchs allseitig umschließen. Da je Lastaufbringungsrichtung zwei Kraftaufnehmer installiert sind, können die Reibungseinflüsse - insbesondere zwischen Lastplatten und Probekörper - quantitativ erfaßt werden. Aufgrund der langen Versuchszeiten wurden drei baugleiche Versuchsgeräte parallel eingesetzt.

Das gewählte Versuchsprogramm umfaßte Untersuchung über den Einfluß der Mischgutzusammensetzung, der Temperatur und der Belastungspfade auf das Spannungs-Verzerrungsverhalten. Die Versuche wurden in einem Klimaraum durchgeführt, da die Temperatur sich wesentlich auf das Stoffverhalten auswirkt. Im Rahmen der Versuchsauswertungen wurden zur Beschreibung der Spannungs- und Verzerrungszustände Oktaederspannungen bzw. -verzerrungen herangezogen.

Aufbauend auf die Versuchsergebnisse wurde ein Stoffmodell zur Beschreibung des zeitabhängigen Spannungs-Verzerrungsverhaltens des Asphaltbetons vorgeschlagen. Abschließend wurde das vorgeschlagene Stoffmodell angewendet und der Einfluß unterschiedlicher Spannungspfade auf das Verzerrungsverhalten untersucht. Es konnte gezeigt werden, daß das Modell eine wirklichkeitsnahe Beschreibung auch des Volumenverhaltens infolge Schubbeanspruchung gestattet. Desweiteren wurde die Übertragbarkeit des vorgeschlagenen Stoffmodells auf Triaxialversuche mit ihren Möglichkeiten und Grenzen dargestellt.

7.7

Beitrag zum Verhalten mehrschichtiger Dichtungssysteme mit Kunststoffdichtungsbahnen unter Scherbeanspruchung

Dissertation: Technische Universität München
Jahr: 1999
Literatur: 28
Doktorand: Fillibeck, J.

Der Einsatz mehrschichtiger Dichtungssysteme in der Böschung bedingt den Nachweis, daß die kontaktfächenparallelen Scherspannungen aufgenommen werden können. Hierfür sind die in den Kontaktfächen übertragbaren Scherspannungen durch Versuche zu ermitteln. In vorliegender Arbeit wurde die Scherfestigkeit bindiger Böden und der Kontaktfächen zwischen Kunststoffdichtungsbahn (KDB) und bindigem Boden sowie zwischen KDB und Geotextil unter praxisrelevanten Versuchsrandbedingungen untersucht.

Als Dichtungsmaterialien eingesetzte bindige Böden werden teilgesättigt mit hoher Verdichtungsarbeit eingebaut. Im teilgesättigten verdichteten Zustand wirkt die Matrixspannung ($u_s - u_w$) erhöhend auf die Scherfestigkeit, was anhand von Triaxialversuchen mit Messung der Matrixspannung quantifiziert werden konnte. Mit steigendem Einbauwassergehalt und steigender mittlerer Hauptspannung nimmt die Matrixspannung und somit auch der durch sie induzierte Anteil an der Scherfestigkeit ab.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen zur Scherfestigkeit zwischen KDB und bindigem Boden stand die Frage, welche Unterschiede zwischen dränierten und undrännierten Versuchen sowie zwischen Versuchen mit gesättigtem und teilgesättigtem bindigem Boden bestehen. Die Versuche mit teilgesättigtem Boden zeigten eine deutlich nichtlineare Abhängigkeit zwischen Normalspannung σ und Scherspannung τ . Es ließen sich drei Normalspannungsbereiche mit weitgehend konstantem σ/τ -Verlauf differenzieren. Im unteren Normalspannungsbereich ist noch kein inniger Verbund zwischen KDB und bindigem Boden vorhanden und es bestehen keine Unterschiede zwischen dränierten und undrännierten Versuchen. Im mittleren Normalspannungsbereich ist ein inniger Verbund in der Kontaktfäche erreicht und mit steigender Normalspannung treten hier immer höhere Scherfestigkeitsunterschiede zwischen dränierten und undrännierten Versuchen auf. Eine weitere Erhöhung der Normalspannung (3. Bereich) führt schließlich zu einer Sättigung und somit zu einem gänzlichen Abbau der Matrixspannung. Undrännierte Versuche weisen hier einen durch die Adhäsion a_d charakterisierten, horizontalen σ/τ -Verlauf auf.

Weiterhin wurde das Langzeitscherverhalten zwischen Geotextil und KDB unter konstanter Scherspannung untersucht. Die Ergebnisse zeigten, daß selbst unter hoher Scherspannung die Kriechverformungen mit der Zeit stark abklingen und die Scherfestigkeiten nach Beendigung der Kriechversuche im Vergleich zu den weggesteuerten Kurzzeitversuchen noch zunehmen, was durch Spannungumlagerungen im Geotextil zu erklären ist. Somit kann der in der Praxis zumeist angewandte, weggesteuerte Kurzzeitversuch als auf der sicheren Seite liegend betrachtet werden. Die sich aus den Versuchen ergebenden Scherparameter bilden die Eingangswerte für die abschließend behandelten Standsicherheitsnachweise für mehrschichtige Dichtungssysteme.

8.1	Eignung natürlicher Böden als Dichtungsstoffe zum Grundwasserschutz im Bereich von Verkehrsflächen
-----	---

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 5.083 G 85 M

Zeitraum: 1985 - 1988

Literatur: 57

Sachbearbeiter: Heyer, D.

Für die Eignung von bindigen Erdstoffen als Abdichtungsmaterial zum Grundwasserschutz an Verkehrsflächen werden von den derzeit gültigen „Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten“ maßgebliche Anforderungen lediglich an die Korngrößenverteilung dieser Erdstoffe vorgegeben. Im Rahmen der Forschungsarbeit war zu untersuchen, inwieweit weitere Parameter und Bedingungen, wie Sättigungsgrad des Bodens, hydraulischer Gradient, Art der eindringenden Flüssigkeit, Versuchstechnik zur Bestimmung der Durchlässigkeit, Einbaukennwerte des Bodens, für die Eignung eines Erdstoffs, gekennzeichnet durch dessen Durchlässigkeitsbeiwert k , bestimmend sind.

In den Vorversuchsreihen sowie in den Versuchen mit Salzlösungen konnte festgestellt werden, daß die Versuchstechnik zur Bestimmung der Durchlässigkeit im Bereich kleiner hydraulischer Gradienten mit dem KD-Gerät (Kompressions-Durchlässigkeitsgerät) unzureichend ist, so daß für die Hauptversuche ein neues Versuchsgerät entwickelt wurde. Die Versuchsreihen mit diesem Gerät an fünf Böden, in denen die Einbaukennwerte der Böden sowie der hydraulische Gradient variiert wurden, ergaben, daß bevorzugt bei den Probekörpern, die auf der trockenen Seite ($w < w_{cl}$) verdichtet wurden, und bei höheren hydraulischen Gradienten ($i \geq 10$) Feinstteilchenablösungen in der Probe auftraten, die zu einer Kolmation an der Grenzfläche zum Filterstein führten, so daß ein zu kleiner Durchlässigkeitsbeiwert vorgetäuscht wurde. Ein strömungsloser Bereich bei kleinen hydraulischen Gradienten konnte in keinem Fall festgestellt werden. Versuche an Probekörpern, die geringste Durchlässigkeiten aufwiesen ($k < 1 \cdot 10^{-10}$ m/s), zeigten sogar nahezu lineare v - i -Beziehungen, gekennzeichnet durch einen konstanten Durchlässigkeitsbeiwert über einen Gradientenbereich von $i=5$ bis $i=30$.

Im Hinblick auf die Art eindringender Flüssigkeiten (Salzlösungen, Mineralöle) konnte aufgezeigt werden, daß der vorhandene Sättigungsgrad des Porenraums der Bodenprobe mit Wasser maßgebend für die Durchlässigkeit und Eindringung solcher Flüssigkeiten in einen Boden ist. So weist ein bindiger Boden im wassergesättigten Zustand eine gute Sperrwirkung gegenüber Mineralölen auf, wogegen die Durchlässigkeit für Mineralöle bei Abnahme des Sättigungsgrades die Durchlässigkeit des Bodens für Wasser erreichen kann. Infolge der Beaufschlagung der Probekörper mit Salzlösungen konnte ein Einfluß auf die Durchlässigkeit nur bei höheren Konzentrationen und im teilgesättigten Zustand des Bodens in Form einer Verringerung des Durchlässigkeitsbeiwertes festgestellt werden.

Die erzielten Erkenntnisse und Untersuchungsergebnisse führen zu Folgerungen, die die zu verwendende Versuchstechnik, die Eignungsprüfung und den Einbau von natürlichen Böden als Dichtungsstoffe zum Grundwasserschutz im Bereich von Verkehrsflächen betreffen.

8.2

**Auswertung und Beurteilung bisher in der Praxis angewandter
bautechnischer Maßnahmen an Straßen in
Wassergewinnungsgebieten**

Forschungsauftrag: Umweltbundesamt
Forschungsnummer: 102 02 207
Zeitraum: 1986 - 1989
Literatur: 49
Sachbearbeiter: Heyer, D. ; Scheufele, G.

Straßen in Wassergewinnungsgebieten sind mit den Nutzungsansprüchen in den Wassergewinnungsgebieten unverträglich, da von der Straße schon während der Baumaßnahme und später durch den Straßenverkehr ein Belastungs- und Gefährdungspotential für das Wasser ausgeht. Da jedoch auf den Straßenbau in Wassergewinnungsgebieten häufig nicht verzichtet werden kann, werden in diesen Fällen besondere Schutzmaßnahmen gefordert.

Die „Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten“ (RiStWag) regeln Anforderungen an den Straßenbau zum Schutz des Wasservorkommens. Sie bilden ein Instrumentarium für den Straßenplaner, die Genehmigungsbehörden und für die ausführenden Baufirmen. Die Bedeutung dieser Richtlinien für die Baupraxis und die dringende Notwendigkeit des effektiven Grundwasserschutzes haben zu dem oben genannten Forschungsvorhaben mit der Veranlassung geführt, die bisher für einen Schutz in Wassergewinnungsgebieten angewandten bautechnischen Maßnahmen zu vergleichen und einer kritischen Wertung zu unterziehen.

Anhand eines Fragebogens wurde bei den Straßenbaudienststellen der Bundesländer eine umfassende Erhebung über ausgeführte und geplante Straßenbaumaßnahmen in Wassergewinnungsgebieten und die dort angewandten bautechnischen Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers durchgeführt. Tabellarische Auswertungen der Fragebögen von insgesamt 324 erfaßten Straßenbaumaßnahmen geben einen Überblick über Häufigkeit und Umfang sowie Zeitpunkt von Straßenbauten in Wassergewinnungsgebieten. Im weiteren kann diesen Auswertungen die Art der bautechnischen Maßnahmen, wie z. B. Abdichtungen, und die dabei verwendeten Materialien entnommen werden.

Die mit den Erhebungsbögen vorgenommene Befragung nach Bau- und Betriebserfahrungen hatte nur wenige, diesbetreffende Auskünfte ergeben, die dann jedoch als Ansatzpunkt genauerer Befragungen im Zuge von Fachgesprächen bei den Straßendienststellen und auf den Baustellen dienten. Über die bei diesen Gesprächen gesammelten Erkenntnisse und Erfahrungen wird detailliert berichtet.

Aus den vorliegenden Erkenntnissen werden Hinweise zu den „Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten“, RiStWag, Ausgabe 1982, und weiteren Technischen Vorschriften, Richtlinien und Merkblättern abgeleitet sowie Vorschläge für notwendige Forschungen und Untersuchungen erläutert.

8.3

Untersuchungen zur Eignung von Kunststoffdichtungsbahnen für die Anwendung als Abdichtungsmaterial bei Straßen in Wassergewinnungsgebieten

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 5.095 G 89 G

Zeitraum: 1991 - 1994

Literatur: 56

Sachbearbeiter: Fillibeck, J.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde untersucht, welche Anforderungen an ein Dichtungssystem mit einer Kunststoffdichtungsbahn bei Straßen in Wassergewinnungsgebieten zu stellen sind. Es wurde auf chemische und mechanische Beanspruchungen sowie den Standsicherheitsnachweis beim Einsatz in der Böschung eingegangen.

Die chemische Beanspruchung von Kunststoffdichtungsbahnen für diesen Anwendungsfall sind weitaus geringer als im Deponiebau. Die langzeitige Beständigkeit wird in der Regel nur gegenüber Ölen, Kraftstoffen und Salzlösungen in geringer Konzentration nachzuweisen sein, da die Kunststoffdichtungsbahn gegenüber bei einem Unfall austretenden hochkonzentrierten Flüssigkeiten aufgrund den dann erforderlichen Sanierungsmaßnahmen lediglich kurzfristig belastet wird. Somit erscheinen neben dem im Deponiebau für Dichtungsbahnen ausschließlich eingesetzten Rohstoff HDPE für die Anwendung bei Straßen in Wassergewinnungsgebieten weitere Rohstoffe mit verletechnisch günstigeren Eigenschaften geeignet.

Zum Schutz der Kunststoffdichtungsbahn gegen mechanische Beschädigung können mechanisch verfestigte Vliesstoffe verwendet werden. In Labor- und Feldversuchen wurde untersucht, welchen Anforderungen diese Schutzschichten in Abhängigkeit von den auftretenden Belastungen genügen müssen.

Beim Einbau des Dichtungssystems in der Böschung muß nachgewiesen werden, daß die Überschüttung nicht auf dem Dichtungssystem abgleiten kann. Es wurden Diagramme für drei hier maßgebende Böschungsgeometrien erstellt, mit denen dieser Nachweis bei bekanntem Reibungswinkel des Überschüttmaterials und maßgebendem Oberflächenreibungswinkel des Dichtungssystems erbracht werden kann. Weiterhin wurde dargestellt, wie ein Bewehrungselement zur Erhöhung der Standsicherheit eingesetzt werden kann und wie es zu bemessen ist.

Zur Ermittlung der Standsicherheit müssen die maßgeblichen Scherparameter in den Kontaktflächen des Dichtungssystems bekannt sein. Hierzu wurden Versuche in einem Schergerät mit den Abmessungen 30 cm x 30 cm durchgeführt. Es wurde folgender maximaler Schichtaufbau nachvollzogen: Überschüttung / Bewehrungselement / geotextile Stützschicht / Kunststoffdichtungsbahn / geotextile Schutzschicht. Es wurden Versuche mit 3 Böden, 2 Bewehrungselementen sowie 3 Kunststoffdichtungsbahnen mit verschiedenen Oberflächenstrukturierungen durchgeführt. Anhand der Ergebnisse konnten prinzipielle Aussagen über die Eignung verschiedener Oberflächenstrukturierungen getroffen werden.

8.4	Sicherheitsbewertung bautechnischer Maßnahmen zum Grundwasserschutz an Straßen in Wassergewinnungsgebieten auf probabilistischer Grundlage
------------	---

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 5.101 G 92 G

Zeitraum: 1993 - 1996

Literatur: 25

Sachbearbeiter: Ascherl, R. (Diss.: 1997)

Im Rahmen von Literatur- und Datenauswertungen wurden mögliche Gefährdungen des Grundwassers im Einflußbereich von Straßen erfaßt und hinsichtlich der Kriterien stoffliche Beschaffenheit, Menge, zeitliches Auftreten, oberirdische und unterirdische Verlagerung untersucht. Gemäß dem zeitlichen Auftreten wurde in ständige, vorübergehende und außergewöhnliche Einwirkungen unterteilt.

Die vor allem aus Verbrennungsabgasen, Abrieb von Brems- und Fahrbelägen und Tropfverlusten stammenden ständigen Einwirkungen können durch die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke DTV näherungsweise indirekt quantifiziert werden. Die Immissionen der straßenspezifischen wassergefährdenden Stoffe nehmen mit zunehmendem Abstand vom Fahrbahnrand stark ab. Als hydrogeologische Schutzwirkung ist bei ungebündelter breitflächiger Entwässerung und Versickerung über den Fahrbahnrand eine bewachsene belebte Bodenzone und die verbleibende Grundwasserüberdeckung anzusehen.

Die Tausalzstreuung wird als vorübergehende Einwirkung definiert. Die tausalzspezifischen Stoffe werden nahezu vollständig mit dem Fahrbahnabfluß verlagert. Da die aus dem Tausalz stammenden Chloride im Untergrund sehr mobil sind, kann allenfalls die hydrodynamische Dispersion im strömenden Grundwasser (Verdünnung) als hydrogeologische Schutzwirkung angesehen werden.

Die Emission wassergefährdender Stoffe durch Straßenverkehrsunfälle wird als außergewöhnliche Einwirkung definiert. Mit größter Häufigkeit wurde dabei in durchschnittlich 60% der Unfälle leichtes Heizöl/Diesel emittiert. Als maßgebende hydrogeologische Schutzwirkung ist die Durchlässigkeit der oberflächennahen Grundwasserüberdeckung für Mineralölprodukte anzusehen.

Im Rahmen von Risikobetrachtungen ist im Einzelfall zu ermitteln, ob das vorhandene Risiko aus ständigen, vorübergehenden und außergewöhnlichen Einwirkungen akzeptiert werden kann, durch Schutzmaßnahmen zu mindern ist oder ausgeschlossen werden muß. Zur Risikominderung stehen vielfältige betriebliche, verkehrstechnische und bautechnische Schutzmaßnahmen zur Verfügung, die hinsichtlich der Wirksamkeit, der Zuverlässigkeit und der gemeinsamen Wirkungsweise untersucht wurden. Die Art und der Umfang der zu ergreifenden Schutzmaßnahmen sind im Einzelfall neben den Erfordernissen des Grundwasserschutzes auch von den standortspezifischen Randbedingungen abhängig. Im Hinblick auf die vielfältigen Variationen der im Einzelfall zu berücksichtigenden Randbedingungen sollten einschlägige Regelwerke bezüglich der Art und dem Umfang der zu ergreifenden Maßnahmen zum Grundwasserschutz ausreichend flexibel gestaltet werden.

8.5

Anwendung von Bentonitdichtungsmatten zum Grundwasserschutz an Verkehrswegen und -flächen

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 05.103 G 94 L

Zeitraum: 1994 - 1997

Literatur: 63

Sachbearbeiter: Heyer, D.

Bentonitdichtungsmatten werden seit 1987 als Abdichtungselemente im Erdbau angeboten. Sie stellen ein Verbunddichtungselement aus Bentonit und Geotextilien dar. Die Dichtungswirkung beruht darauf, daß Bentonit bei Wasserzutritt unter Volumenzunahme quillt und in diesem Zustand nur noch sehr gering wasserdurchlässig ist.

In der Forschungsarbeit sollten für den Einsatz von Bentonitmatten zum Grundwasserschutz an Straßen in Wassergewinnungsgebieten alternativ zu mineralischen Abdichtungen und Kunststoffdichtungsbahnen gemäß RiStWag Anforderungen an ein Abdichtungssystem mit diesen Bentonitmatten entwickelt werden. Für diese Anforderungen waren Prüftechniken vorzuschlagen, mit denen sich die Eignung verschiedener Produkttypen für diesen Anwendungsfall nachweisen läßt.

Als Kennwert zur Beschreibung der Permittivität ψ wurde auf der Grundlage einer Durchströmungszeit von 48 Stunden ein zu fördernder Höchstwert von $\psi = 1 \cdot 10^7$ l/s abgeleitet. Die Mächtigkeit der Überschüttung soll mindestens 60 cm betragen. Die erforderliche innere Scherfestigkeit der Bentonitmatte und der Scherfestigkeit in den Kontaktflächen zu den angrenzenden Schichten richten sich nach Böschungsneigung und Auflast.

Um die Wirksamkeit des Abdichtungssystems während der gesamten Nutzungsdauer sicherzustellen, wurden die Einflüsse verschiedener Einwirkungen auf das Durchlässigkeitsverhalten der Bentonitmatte untersucht. Hierzu gehörten die Beanspruchungsfälle Trocken-Naß-Wechsel, Frost-Tau-Wechsel, Beaufschlagung mit Salzlösungen und Mineralöl-Kohlenwasserstoffe wie auch statische und dynamische Beanspruchungen. Zur Untersuchung dieser Beanspruchungsfälle wurden Prüfverfahren entwickelt oder modifiziert. Dabei konnte die Eignung der letztendlich angewandten Prüfverfahren mit der Erprobung in entsprechenden Versuchsreihen belegt werden.

9.1	Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel
-----	---

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr
Forschungsmummer: 5.085 R 86 C
Zeitraum: 1986 - 1989
Literatur: 55
Sachbearbeiter: Berner, U.

Durch den Einsatz von wasserdurchlässigen Deckschichten im kommunalen Verkehrsflächenbau und zur Sicherung einer ausreichenden Frostbeständigkeit unter undurchlässigen Straßendecken müssen an ungebundene Tragschichten bestimmte Mindestanforderungen bezüglich der Wasserdurchlässigkeit gestellt werden. Die Tragschichten müssen durch ihr Wasseraufnahme- und Entwässerungsvermögen in der Lage sein, anfallendes Niederschlagswasser ohne oberflächigen Aufstau bzw. zur Verhinderung von Eislinsenebildung schadlos abführen zu können.

Das Ziel des FE-Vorhabens war es, Verfahren zu entwickeln, die die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von ungebundenen Tragschichten gestatten. Dabei war sowohl ein Verfahren für eine Kontrollprüfung der eingebauten Tragschichten in situ, als auch eine Eignungsprüfung im Labor von dem zum Einbau vorgesehenen Material zu entwickeln.

Es wurden je zwei Labor- und Feldversuche vorgeschlagen, mit denen die Bestimmung des horizontalen und des vertikalen Durchlässigkeitsbeiwertes nach Darcy möglich ist. Bei den Laborversuchen werden die in zwei verschiedene Versuchsgeräte eingebauten Bodenproben mit konstanter Druckhöhe parallel und normal zur Einbaurichtung durchströmt. Bei den Feldversuchen handelt es sich um Infiltrationsversuche, bei denen Wasser aus zwei verschiedenen Quellformen in die Tragschicht einströmt.

Die durchgeführten Versuche an verschiedenen Kornmischungen zeigten eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse aus Feld- und Laborversuchen.

Da sich die Anforderungen an die hydraulischen und kapillaren Eigenschaften von ungebundenen Tragschichten aus den Infiltrationsvorgängen und dem Drainageverhalten bei nichtbindigen Böden ableiten lassen und dies bereits im vorliegenden Forschungs- und Entwicklungsvorhaben behandelt wurde, beinhalten die geleisteten Arbeiten bereits Vorarbeiten zur Definition der Anforderungen.

9.2	Die Bestimmung des Sättigungsverlaufes mineralischer Abdichtungsmaterialien als Grundlage für die Beurteilung der Infiltrationsmöglichkeit von grundwassergefährdenden Substanzen
-----	--

Forschungsauftrag: Deutsche Forschungsgesellschaft

Forschungsnummer: Fl 136/8

Zeitraum: 1988 - 1990

Literatur: 62

Sachbearbeiter: Heyer, D.

Zu den verschiedensten Zwecken des Grundwasserschutzes werden heute mineralische Dichtungsstoffe eingesetzt. Dies betrifft zum einen die Deponien, zum anderen aber auch den präventiven Grundwasserschutz im Zusammenhang mit Industrieanlagen, Betriebsstandorten, Lagern und Verkehrsflächen, wo es zu verhindern gilt, daß infolge von Betriebsunfällen oder Leckagen das Grundwasser verschmutzt wird und damit für eine derzeitige oder zukünftige Nutzung als Trinkwasser unbrauchbar oder zumindest beeinträchtigt wird.

Die Durchlässigkeit einer mineralischen Abdichtung wird versuchstechnisch im Labor unter annähernd vollständiger oder vollständiger Sättigung bei stationären Strömungsbedingungen ermittelt. Diese Verhältnisse sind jedoch nicht repräsentativ für die Bodeneinbaubedingungen in der Praxis, da hier in jedem Fall Teilsättigungsverhältnisse vorliegen. Dies bedeutet, daß infolge eines Wasserdargebots hierbei ein Infiltrationsprozess stattfindet, bei dem sich Sättigungserscheinungen und die Durchströmung überlagern und gegenseitig beeinflussen. Dies erkennt man bei üblichen Durchlässigkeitsversuchen bei der Messung der einströmenden Wassermenge, in dem unmittelbar nach Einbau eine hohe Einströmrate festgestellt wird, die dann allmählich abnimmt und schließlich annähernd konstant bleibt. Vielfach wird dabei von einem abnehmenden Durchlässigkeitsbeiwert gesprochen, was technisch unrichtig ist, da mit den zunächst festgestellten hohen Einströmraten die Probensättigung einhergeht, so daß in diesen Fällen nicht von einer Durchlässigkeit gesprochen werden kann.

Inwieweit sich nun Sättigung und Durchlässigkeit im Verlauf eines Infiltrationsprozesses überlagern, ist versuchstechnisch nur durch die Erstellung einer Wasserbilanz, d. h. die Ermittlung der ein- und der ausströmenden Wassermengen möglich. Der zeitliche Verlauf solcher Infiltrationsprozesse ist für die technische Beurteilung der Ausbreitung möglicher Schadstofffronten in Dichtungsmaterialien von maßgeblicher Bedeutung, da es wiederum aus den vorgenannten Prozessen nicht schlüssig ist, für eine solche Ausbreitung allein den Durchlässigkeitsbeiwert k zugrunde zu legen.

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden nun solche Sättigungsprozesse mit Wasser versuchstechnisch nachvollzogen um festzustellen, welchen Einfluß bestimmte versuchstechnische Randbedingungen, wie Sättigungsdruck (back pressure), hydraulischer Gradient, Anfangssättigungsgrad, Durchlässigkeitsbeiwert, hierauf haben. Es konnte gezeigt werden, daß es bei Kenntnis des Sättigungs- und Durchlässigkeitsverhaltens eines mineralischen Dichtungsstoffes möglich ist, im Rahmen von Überwachungsprüfungen aus dem Sättigungsverlauf bereits nach ca. zwei bis drei Tagen eine Aussage über die Einhaltung eines geforderten maximal zulässigen Durchlässigkeitsbeiwerts zu treffen.

9.3

Anforderungen an die Durchlässigkeit von ungebundenen Tragschichten

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr
Forschungsnummer: 5.089 G 88 L
Zeitraum: 1989 - 1993
Literatur: 55
Sachbearbeiter: Berner, U.

Basierend auf den Forschungsauftrag 5.085 R 86 C des Bundesministeriums für Verkehr wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die Grundlagen für die Formulierung von Anforderungen an die Durchlässigkeit von ungebundenen Tragschichten geschaffen. Hierzu wurden Versuche zur Bestimmung der Infiltrationskapazität und zur Untersuchung des Drainageverfahrens an fünf nichtbindigen Böden durchgeführt sowie die horizontale und vertikale Durchlässigkeit der Böden mit Laborverfahren analog DIN 18130 bei verschiedenen Einbaudichten bestimmt. Mit Finite-Element-Berechnungen wurden die Einflüsse von verschiedenen Parametern auf das Strömungsgeschehen in Tragschichten untersucht.

Die Versuche zeigten eine starke Abhängigkeit der Durchlässigkeit k der nichtbindigen Versuchsböden vom Verdichtungsgrad, der Art des Einbaus und der Geometrie des Versuchsgerätes. Von der lockersten zur dichtesten untersuchten Lagerung waren Durchlässigkeitsunterschiede zwischen ca. einer und zwei Zehnerpotenzen zu beobachten. Auch bei Feldversuchen zeigte sich eine große Schwankungsbreite der Durchlässigkeit, deren Ursache in Dichteschwankungen, Entmischungen und Kornzertrümmerungen liegt.

Bei der Wasseraufnahmefähigkeit und der Durchflußkapazität von Tragschichten haben die Durchlässigkeiten den größten Einfluß, Planungsneigung und Dicke spielen nur eine untergeordnete Rolle. Die erforderlichen Durchlässigkeiten lassen sich nach Festlegung der Bemessungswassermenge mit im Vergleich zu FE-Berechnungen einfachen Näherungsverfahren hinreichend genau ermitteln.

Die letztendliche Festlegung einer Anforderung an die Durchlässigkeit sollte auch in Abwägung der wirtschaftlichen Aspekte geschehen. Die sich ergebenden Mindestwerte der Durchlässigkeit werden nämlich von vielen bisher zum Tragschichtbau verwendeten Materialien insbesondere bei hohen Verdichtungsgraden nicht erreicht werden. Die erhöhten Baukosten zur Erfüllung der Durchlässigkeitsanforderung müssen dann dem Risiko eines Schadens oder vermehrter Unterhaltsaufwendungen infolge einer eventuell zu geringen Durchlässigkeit gegenübergestellt werden.

9.4

Untersuchungen zur Filterwirksamkeit von Geotextilien bei geringen hydraulischen Gradienten im Straßenbau

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 05.102 G 94 L

Zeitraum: 1994 - 1997

Literatur: 64

Sachbearbeiter: Krug, M.

Die bisher bekannten Dimensionierungsverfahren für geotextile Filter basieren auf Filterregeln, die auf der Auswertung von Aufgrabungen langjährig eingebauter Geotextilien in wasserbaulichen Anwendungen beruhen. Hierbei liegen im Vergleich zur Anwendung geotextiler Filter im Deponiebau hohe hydraulische und teilweise auch hydrodynamische Belastungen vor. Darüber hinaus werden im Deponiebau als Rekultivierungsmaterialien eine Vielzahl an verschiedenen, meist heterogenen Bodenarten verwendet, die ohne Anforderungen an die Einbaubedingungen eingebaut werden. Im Rahmen dieses FE-Vorhabens sollten Versuchstechniken entwickelt und erprobt werden, mit denen die Filterwirksamkeit von Geotextilien im Anwendungsfall Deponiebau beurteilt werden kann.

Es wurden insgesamt vier labortechnische Prüfverfahren entwickelt, die unterschiedliche Zielsetzungen verfolgten. Der modifizierte LTF-Test, der modifizierte Pinhole-Test und der Suspensionstest, simulieren im Deponiebau vorkommende Gegebenheiten unter Berücksichtigung der in der Praxis auftretenden Randbedingungen. Ein wesentliches Ergebnis der mit diesen Versuchstechniken durchgeführten Reihenuntersuchungen war, daß das Durchlässigkeitsverhalten des Boden-Geotextil-Systems aber auch der Bodendurchgang durch das Geotextil vom Entlüftungsgrad des Wassers abhängig ist. Die Verwendung von gut entlüftetem Wasser bildet die ungünstigste und somit auch die maßgebliche Randbedingung.

Weiterhin wurde mit dem modifizierten GR-Test eine Versuchstechnik entwickelt, mit der sich grundlagenorientierte Untersuchungen über das Filterverhalten zwischen Boden und Geotextil durchführen lassen. Es kann neben der Veränderung der Durchlässigkeit sowie der Bodendurchgangsmenge auch die Wasserdruckverteilung im zu filternden Boden bestimmt werden. Die Funktionstüchtigkeit wurde zunächst an Kombinationen aus geotextilen Filtern und filterstabilem Versuchsboden überprüft. Hier erfolgte ein linearer Abbau des Wasserdruckes über die gesamte Bodenprobe. Bei Kombinationen aus geotextilen Filtern und filtertechnisch schwierigen Böden konnte eine vom Herstellungsverfahren des Filters abhängige Wasserdruckverteilung gemessen werden. Gegenüber mechanisch verfestigten Geotextilien zeigte sich bei thermisch verfestigten Geotextilien ein Wasserdruckaufbau direkt an der Grenzschicht und somit nur mehr eine eingeschränkte hydraulische Filterwirksamkeit.

Anhand der im Rahmen dieses FE-Vorhabens entwickelten Versuchstechniken ist eine Beurteilung der Filterwirksamkeit eines Geotextils in Kombination mit einem vorgegebenen Rekultivierungsboden möglich. Besonders geeignet ist hierfür der modifizierte GR-Test, da mit diesem am eindeutigsten die hydraulische Filterwirksamkeit, die in Bezug auf die Standfestigkeit und die langfristige Funktionsfähigkeit der Dichtung des Oberflächenabdichtungssystems maßgebend ist, überprüft werden kann.

9.5

Ein Verfahren zur Bestimmung der Durchlässigkeit mit Infiltrationsversuchen

Dissertation: Technische Universität München
Jahr: 1994
Literatur: 22
Doktorand: Berner, U.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem über die Durchführung von zwei Infiltrationsversuchen der horizontale und der vertikale Durchlässigkeitsbeiwert von nichtbindigen Schichten in situ bestimmt werden kann. Bei dem einen Versuch erfolgt die Infiltration aus einer Kreisquelle an der Schichtoberfläche, bei dem anderen Versuch aus einer Stabquelle in der Schicht. Das Auswerteverfahren nutzt die entstehenden unterschiedlichen Strömungsbilder zur Durchlässigkeitsbestimmung aus. Zunächst wird über Formfaktoren die Durchlässigkeit unter Annahme isotroper Verhältnisse ermittelt. Die Schichtdicke wird dann gedanklich so verzerrt, daß sich unter Zugrundelegung der verzerrten Schichtdicke aus beiden Versuchen der gleiche Durchlässigkeitsbeiwert ergibt. Über das Verhältnis der verzerrten zur tatsächlichen Schichtdicke lassen sich dann der horizontale und der vertikale Durchlässigkeitsbeiwert bestimmen.

Zur Überprüfung des Verfahrens wurden mit einer großmaßstäblichen Versuchseinrichtung Feldversuche an zwei nichtbindigen Korngemischen durchgeführt. Der Vergleich der Feldversuche mit den Laborversuchsergebnissen zeigt, daß sich aus den Feldversuchen etwa halb so große Durchlässigkeiten ergeben wie aus den Laborversuchen. Dieses Resultat kann auf die unterschiedlichen Einbauvorgänge und Sättigungen während der Versuche zurückgeführt werden.

In Abhängigkeit von der Lagerungsdichte wurden die kapillaren Eigenschaften der Versuchsböden mit einem Laborverfahren mit Tensiometermessungen an Bodenproben bestimmt. Unter Ansatz dieser Ergebnisse wurden die Feldversuche mit einem für die Anwendung bei Infiltrationsströmungen entwickelten Finite-Element-Programm nachgerechnet und die Berechnungsergebnisse mit den während der Feldversuche durchgeführten Messungen der einströmenden Wassermengen und der Saugspannungen bzw. Wasserdrücke im Boden verglichen. Auf dieser Grundlage wurden weitere Feldversuche rechnerisch simuliert und dabei die kapillaren Eigenschaften, Durchlässigkeit und Versuchsdauer variiert, um die Einflüsse dieser Parameter auf das Auswertungsergebnis zu studieren.

Die durchgeführten Feldversuche wie auch die rechnerischen Versuchssimulationen zeigen, daß der Fehler des auf Vereinfachungen und Vernachlässigungen beruhenden Auswertungsverfahrens bei nichtbindigen Böden im Durchlässigkeitsbereich $k=1 \cdot 10^{-3}$ bis $1 \cdot 10^{-7}$ m/s unter einer Zehnerpotenz liegt. Bei geringerer Durchlässigkeit und für bindige Böden typischer kapillarer Charakteristik steigt der Fehler jedoch deutlich an.

9.6	Untersuchung der Empfindlichkeit von Geotextilien und Geokunststoffen im Boden gegenüber dynamischer Beanspruchung
-----	---

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 05.106 G 95 C

Zeitraum: seit 1995

Sachbearbeiter: Bräu, G.

Bei der Bearbeitung des Forschungsauftrags FE 05.086 G86C des Bundesministeriums für Verkehr wurde die grundsätzliche Eignung eines großmaßstäblichen Laborprüfgerätes zur Untersuchung der Empfindlichkeit von Geotextilien im Boden unter dynamischen Belastungen festgestellt. Die Erfahrungen und Einstufungen von Produkten im Freifeldversuch konnten hiermit im Labor simuliert werden. Aufgrund der Aufgabenstellung konnten nur wenige Produkte und grundsätzliche Parameterkombinationen untersucht werden. Diese Untersuchungen werden in dem Folgeauftrag FE 05.106 auf eine Palette von am Markt befindlichen Produkten ausgedehnt.

Da die bisherigen Versuchsdurchführungen sehr aufwendig und für rasche Kontrollprüfungen nicht gedacht sind, wird überprüft, inwieweit die hierbei festgestellte Reihung auch durch bestehende kleinmaßstäbliche Laborprüfmethode ev. nach Modifikationen nachvollzogen werden können. Hierzu wurde in erster Linie die Entwicklung und Modifikation des zwischenzeitlich in der prENV 10722 "Geotextiles and geotextile-related products - Procedure for simulating damage during installation" vorgestellten Belastungsversuches mit erarbeitet, bei dem ein zwischen zwei Bodenschichten eingelegtes Geotextil über eine Lastplatte (max. Auflast $\sigma = 900 \text{ kN/m}^2$) mit bis zu 20000 Lastzyklen belastet wird. Es wurden für den Untergrund und die Tragschicht die Bodenarten in weiten Bereichen variiert, sowie verschiedene Geometrien für das Versuchsgerät untersucht. Daneben wurden auch Versuchsgeräte in Anlehnung an die Geometrie des Stempeldruckversuches, jedoch mit Bodenunterlage und Schwelllastbeanspruchung entwickelt und untersucht.

Neben der Simulation der auf Baustellen und bei Freifeldversuchen festgestellten Festigkeitsveränderungen und Schadensbilder durch die dynamische Belastung der Geotextilien werden auch zusätzliche Vorgänge berücksichtigt, die Änderungen an den Eigenschaften der Geotextilien bewirken können, wie z.B. die Bodeneinlagerung in Geotextilien und deren Auswirkung bei Zugversuchen.

Die Ergebnisse der Forschungsarbeit wurden stets an Baustellenuntersuchungen rückgebunden und sollen die Basis für eine Erweiterung des Klassifizierungssystems der TL Geotex, erarbeitet vom AA 5.15 der FGSV, bilden.

9.7	Aufstellen eines Systems für die Anforderung an Geotextilien und Geokunststoffen hinsichtlich ihrer Beanspruchung beim Einbau
-----	--

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 05.110 G 96 C

Zeitraum: seit 1996

Sachbearbeiter: Bräu, G.

Das Forschungsprojekt gliedert sich in zwei Untersuchungsschwerpunkte, der Beschädigung von Trenn- und Bewehrungslagen auf wenig tragfähigem Untergrund und der Beschädigung beim Einbau von Boden auf Bewehrungsmaterialien (vor allem Geogitter).

Zum ersten Untersuchungsschwerpunkt wurde bereits eine Reihe von großmaßstäblichen Freifeldversuchen durchgeführt, die hier zusammenfassend ausgewertet und dargestellt werden. Diese Ergebnisse dienen dann als Grundlage für die Festlegung von Laborversuchsparametern für Simulationsversuche. Die Hauptbeanspruchungen hierbei sind das Beschütten (Großmaßstäbliche Versuche in der Versuchshalle und Simulation mit z.B. dem Pyramidenfallversuch), das Verdichten (großmaßstäbliche Versuche u.a. auf Baustellen in Regensburg, Windach bzw. Straubing und Simulation durch z.B. den CEN-Schwellastversuch 30x30 cm²) und das Befahren gering mächtiger Schichten (großmaßstäbliche Versuche u.a. auf Baustellen in Regensburg bzw. Straubing und Simulation durch z.B. den Großpulsationsversuch, den Groß-CBR-Versuch oder den modifizierten CEN-Schwellastversuch 30x30 cm²).

Der Hintergrund zur Fragestellung des zweiten Untersuchungsschwerpunkts sind durchgeführte Freifeldversuche mit z.T. erheblichen Beschädigungen, deren Bewertung hinsichtlich der Auswirkungen auf das Tragverhalten noch ungeklärt ist. In Laborversuchen (In-Soil-Tests) wird vor allem die Kraftübertragung zwischen einzelnen Bewehrungssträngen bei definiert aufgebracht Beschädigungen unter Einbeziehung des umgebenden Bodens untersucht. Hierzu wird vorrangig ein 5050 cm²-Scherkasten in Anlehnung an die Versuche aus dem Forschungsauftrag FE 05.094 G90C des Bundesministeriums für Verkehr verwendet. Es werden Zugversuche im Boden durchgeführt, bei denen die Einzelstränge der Bewehrungsmaterialien im Kasteninneren enden und eine Kraftweiterleitung bis zur gegenüberliegenden Klemme nur über die Querstreben und/oder den umgebenden Boden erfolgen kann.

Aus beiden Untersuchungsschwerpunkten soll ein System zur Beurteilung der Empfindlichkeit gegenüber Einbaubeanspruchungen abgeleitet werden und ein entsprechendes Anforderungsprofil erstellt werden.

9.8	Auswirkungen von Kationenaustauschvorgängen auf die Dichtungswirksamkeit von geosynthetischen Tondichtungsbahnen
------------	---

Forschungsauftrag: Bundesministerium für Verkehr

Forschungsnummer: 05.113-1997-LRB

Zeitraum: seit 1998

Sachbearbeiter: Ranis, D.

In diesem Forschungsvorhaben wird im Zuge der Überarbeitung der Richtlinien für die Abdichtung von Straßen in Wassergewinnungsgebieten (RiStWag) die Eignung von geosynthetischen Tondichtungsbahnen zum Grundwasserschutz in Wassergewinnungsgebieten untersucht. Im Mittelpunkt steht hierbei die Frage, ob sich die geotechnischen Eigenschaften von in geosynthetischen Tondichtungsbahnen vornehmlich verwendetem Natrium-Bentonit durch Kationenaustausch des Natriums gegen Kalzium oder auch andere Ionen nachteilig verändern können. Es soll durch Laborversuche an fabrikneuen wie auch an langjährig eingebauten Tondichtungsbahnen überprüft werden, ob sich durch den Ionenaustausch Veränderungen im Quell- und Austrocknungsverhalten und somit der Fähigkeit, Trockenrisse bei Wasserzufuhr zu schließen, ergeben.

Zur Klärung dieser Fragestellungen wurden Versuchstechniken entwickelt, mit denen ein Kationenaustausch an Na-Bentonit durch Behandlung mit CaCl_2 -Lösungen im Labor zeitgerafft durchgeführt werden kann. Als Nachweis der Umwandlung diente das Quellvermögen im Enslin-Neff-Versuch. An fabrikneuen und derart im Labor umgewandelten Tondichtungsbahnen wurden Trocken-Naß-Wechsel-Versuche zur Rißausbildung entwickelt und ausgeführt. Die Durchlässigkeit umgewandelter Tondichtungsbahnen wurde mit und ohne Trockenrißeinfluß bestimmt. Parallel hierzu wurden mehrjährig eingebaute, an Straßen oder Regenrückhaltebecken verlegte Tondichtungsbahnen mit Na-Bentonit freigelegt und untersucht. Daraus ließen sich Erkenntnisse hinsichtlich ihrer Langzeitbeständigkeit unter Berücksichtigung des Kationenaustausches gewinnen.

Allgemein läßt sich zu den noch nicht abgeschlossenen Untersuchungen feststellen, daß sich mit dem Kationenaustausch das Quellvermögen verringert und die Permittivität erhöht. Die Permittivität feldentnommener Tondichtungsbahnen schwankt stark, wobei die Mittelwerte je Aufgrabung um bis zu drei Zehnerpotenzen höhere Werte als fabrikneue Dichtungsbahnen mit Na-Bentonit aufweisen. Die höchsten Permittivitäten wurden bei den gering überdeckten, ältesten Tondichtungsbahnen ermittelt, die auch das geringste Quellvermögen besitzen.

Bezüglich der Anwendung von geosynthetischen Tondichtungsbahnen als Abdichtungsmaterial bei Straßen in Wassergewinnungsgebieten ist zu berücksichtigen, daß die Verringerung des Quellvermögens durch die Umwandlung von Na-Bentonit in Ca-Bentonit infolge Kationenaustausch unter Einbaubedingungen nicht verhindert werden kann. Bei den zur Zeit eingesetzten Tondichtungsbahntypen muß vorrangig die Austrocknung und Rißbildung des Bentonits unterbunden werden, was durch eine Mindestüberdeckung von ca. 0,8 m in der Regel erreicht wird. Die Durchwurzelung kann auch bei Verlegetiefen größer 0,8 m nicht vollständig verhindert aber reduziert werden.

10.1

**Optimierung des Auflagermaterials von Dränrohren in
Deponie-Basisabdichtungssystemen**

Forschungsauftrag: Bay. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen

Forschungsnummer: E 12

Zeitraum: 1993 - 1996

Literatur: 65

Sachbearbeiter: Stiegeler, R. ; Heyer, D.

Für die Entwässerung von Abfalldeponien werden im Bereich der Deponiebasis überwiegend flexible Dränrohre aus Kunststoff, bevorzugt PE-HD, verlegt. Als Einbettungsmaterialien dienen Dränkiesmaterial der Körnung 18/32 mm und ein spezielles Rohrauflagermaterial.

Eine günstige Beanspruchung von erdüberdeckten flexiblen Rohrleitungen ist in starkem Maße von der Steifigkeit und der Scherfestigkeit des Rohrauflagermaterials abhängig. Scherfeste grobkörnige Rohrauflagermaterialien weisen im Vergleich zum Abdichtungsmaterial in der Deponiebasis jedoch eine um Größenordnungen höhere Durchlässigkeit auf. Dies bedingt, daß im Laufe der Zeit unterhalb des Rohres und damit gleichzeitig im Tiefpunkt des Entwässerungssystems ein Sickerwassereinstau und somit eine höhere hydraulische Beanspruchung des Dichtungsmaterials entsteht. Durch die Zugabe von Feinkornanteilen (z.B. Bentonit) läßt sich zwar die Durchlässigkeit des Rohrauflagermaterials minimieren, allerdings verringert sich hierdurch auch die Steifigkeit und die Scherfestigkeit der Auflagermischung. Die beschriebene Problematik stellt somit ein Optimierungsproblem dar.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist es gelungen, ein Rohrauflagermaterial zu entwickeln, das bei möglichst geringer Durchlässigkeit eine hohe Festigkeit und eine geeignete Steifigkeit aufweist. Das Rohrauflagermaterial ist leicht einbaubar und reagiert in seinen mechanischen Eigenschaften gegenüber Wassergehaltsänderungen beim Einbau wenig empfindlich.

10.2

**Untersuchungen zur Beurteilung der Filterwirksamkeit von
Geotextilien bei geringer hydraulischer Belastung im Deponiebau**

Forschungsauftrag: Bay. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen

Forschungsnummer: F 58

Zeitraum: 1994 - 1997

Literatur: 64

Sachbearbeiter: Krug, M.

Im Rahmen dieses FE-Vorhabens wurde untersucht, inwieweit die Filterkriterien des Merkblattes FGSV (1994) eine hinreichende und wirtschaftliche Bemessung eines geotextilen Filters im Erdbau des Straßenbaus gewährleisten. Die bestehenden Filterregeln dieses Merkblattes beruhen auf Untersuchungen an ausgegrabenen Geotextilien aus dem Deckwerksbau im Wasserbau, wo geotextile Filter gegenüber der Anwendung im Straßenbau unterschiedlichen Beanspruchungen ausgesetzt sind.

Zunächst wurden Anforderungen an die Versuchstechnik zur labortechnischen Simulation des bei Entwässerungsaufgaben im Straßenbau vorkommenden Systems erarbeitet. Verschiedene Versuchstechniken, die ein solches System idealisieren, wurden bereits für das Forschungsvorhaben 05.102 G 94 L des Bundesministeriums für Verkehr entwickelt und konnten hier eingesetzt werden.

Es wurden Versuche mit 3 unterschiedlichen Versuchstechniken an insgesamt 14 Geotextilien ausgeführt, um das Filterverhalten bei inhomogenen und anisotropen Bodenverhältnissen zu untersuchen. Kennzeichnend für diese häufig vorkommenden Bodenverhältnisse sind unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten in den verschiedenen Schichten, was zu Erosionserscheinungen an den Schichtgrenzen führen kann. Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, daß hinsichtlich der Filterwirksamkeit die Geotextilien am positivsten zu bewerten waren, die am ehesten mit den Anforderungen einer Bemessung gemäß dem Merkblatt FGSV (1994) übereinstimmen. Hierbei wurde neben den Filtereigenschaften auch eine ausreichende Robustheit des Geotextils gegenüber den Beanspruchungen beim Einbau berücksichtigt.

Um geeignete Standorte für die Aufgrabung langjährig eingebauter geotextiler Filter zu erhalten, erfolgte eine Umfrage bei allen bayerischen Straßenbauämtern. Im Rücklauf der Befragung wurde von keinem Versagen eines geotextilen Filters berichtet. Bei allen Aufgrabungsstandorten war die hydraulische und mechanische Filterwirksamkeit gewährleistet. Die labortechnischen Untersuchungen der ausgegrabenen geotextilen Filter bestätigen ebenso eine hinreichende Dimensionierung nach den Filterkriterien des Merkblattes FGSV (1994).

Insgesamt zeigen sowohl die labortechnischen Untersuchungen als auch die Ergebnisse der Untersuchungen an aufgegebenen Geotextilien, daß die im Merkblatt FGSV (1994) enthaltenen Kriterien zur Dimensionierung eines geotextilen Filters hinreichend genau sind und eine wirtschaftliche Bemessung erlauben.

10.3

Filter- und Dränwirksamkeit von Abdecksystemen von Deponien mit oder ohne Geotextilien

Forschungsauftrag: Bay. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen

Forschungsnummer: F 58 F

Zeitraum: seit 1998

Sachbearbeiter: Heyer, D.; Krug, M.; Rödl, P.

Die Hauptaufgabe von Deponieoberflächenabdichtungssystemen ist die Vermeidung eines Eintrags von versickerndem Niederschlagswasser in den Deponiekörper und die damit verbundene Auslaugung des Deponats. Der Aufbau derartiger Abdichtungs- oder Abdecksysteme ist in den Technischen Anleitungen Abfall (1991) und Siedlungsabfall (1993) geregelt. In der Fachwelt wird mittlerweile der Standpunkt vertreten, daß in diesen Regelwerken zum Aufbau der Oberflächenabdichtungssysteme detaillierte Festlegungen getroffen wurden, ohne daß hierfür ausreichende Erfahrungen vorgelegen hätten. So werden die sogenannten Regelaufbauten zumindest in Teilbereichen in ihrer Wirksamkeit und Notwendigkeit in Zweifel gezogen, wobei zudem der technische Aufwand bei der Herstellung in Frage gestellt wird.

Im Rahmen o.g. Forschungsvorhabens wird auf die Ausbildung der Grenzschicht zwischen Entwässerungs- und Rekultivierungsmaterial eingegangen. Aufgrund der derzeitigen Anforderungen an die Entwässerungsschicht und der damit in Betracht kommenden Materialien ist zum nicht weiter definierten Rekultivierungsmaterial ein Filterelement erforderlich. Im Rahmen des bereits abgeschlossenen Forschungsvorhabens F 58 des Bay. Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen konnte dazu u.a. festgestellt werden, daß bei den in Oberflächenabdichtungssystemen gegebenen geringen hydraulischen Beanspruchungen nur bei wenigen Böden die Notwendigkeit besteht, die unterschiedliche Filterwirksamkeit der zwischen der Rekultivierungsschicht und der Entwässerungsschicht anzuordnenden Geotextilien zu berücksichtigen. In Erweiterung dieser Aussage wird nunmehr untersucht, ob Rekultivierungs- und Entwässerungsschichten ohne Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit so ausgebildet werden können, daß sich zwischenliegende Filter erübrigen und damit Kosten gespart werden können.

Zur Erzielung diesbezüglicher Ergebnisse und Aussagen werden neben den im Labor üblichen Durchlässigkeits- und Filterversuchen auch großmaßstäbliche Laborversuche (Lysimeter in Klimakammern) eingesetzt. Zusätzlich werden Deponieaufgrabungen sowie die Anlage und Beobachtung von Versuchsfeldern ausgeführt. Im Rahmen aller Versuchsreihen steht besonders der Wasserhaushalt in den einzelnen Schichten und deren gegenseitige Beeinflussung im Mittelpunkt.

Alle Labor- und Feldversuche werden durch rechnerische Betrachtungen und Modellierungen ergänzt. Hierfür werden neben den im Rahmen des Forschungsvorhabens zu entwickelnden Rechenmodellen das Programmsystem HELP und die Finite Elemente Methode eingesetzt.

3. Anhang

ANHANG A1

Übersicht der Forschungs- und Entwicklungsprojekte in den Jahren 1960 - 1980 aus der Tätigkeit des Autors an der Bundesanstalt für Straßenwesen

Mit den nachfolgend als Übersicht zusammengestellten Titeln werden Forschungs- und Entwicklungsprojekte dokumentiert, an denen der Autor während seiner früheren Tätigkeit an der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) in den Jahren 1960 bis 1980 eigenverantwortlich bzw. mitwirkend beteiligt war.

Die Titel mit Dok.- Nr. FA bezeichnen Forschungsarbeiten im Auftrag des Bundesverkehrsministeriums (BVM), die Titel mit Dok.- Nr. BA Projekte im Rahmen von Sonderaufgaben der Bundesanstalt. Die Jahreszahlen hinter den Dok.-Nr. BA bezeichnen Quellenhinweise aus den Tätigkeitsberichten der Bundesanstalt, die Angaben über die Projekte beinhalten.

Soweit Veröffentlichungen in Fachzeitschriften, Monografien und Kongreßberichten erschienen sind, wird auf diese Quellen unter Lit. [Nr.] mit Bezug auf Anhang A2 hingewiesen.

Vergleich der Verdichtungs- und Verformungseigenschaften unstetiger und stetiger Kiessande	Lit. 35
Frostbeständige Bodenverfestigung als Ersatz für Frostschuttschichten	FA. 5.19 Lit. 37, 40
Prüfung radiometrischer Verfahren zur Dichte und Wassergehaltsmessung und Kalibrierung von Strahlensonden	FA. 5.68 Lit. 33
Erfahrungssammlung über die auf Großbaustellen erreichbare Bodenverdichtung	FA. 5.45 BA. 1962
Untersuchungen zur Verbesserung und Stabilisierung bindiger Böden mit Kalk im Erdbau	FA. 5.51 BA. 1962
Zusammenstellung meteorologischer und klimatischer Unterlagen und ihre Auswertung zur Frostschadenverhütung an Straßen	FA. 5.75 a BA. 1962, 1963-65
Untersuchungen des Wasserhaushaltes im Untergrund und Unterbau von Straßen	FA. 5.67 BA. 1962
Dynamische Untersuchungen an Straßen	FA. 6.23 BA. 1962

Verdichtbarkeit und Tragfähigkeit steiniger, bindiger Mischböden	FA. 5.45 BA. 1963-65 Lit. 30, 32
Dichte und Tragfähigkeit bindiger Böden in Abhängigkeit vom Wassergehalt	FA. 5.45 BA. 1963-67 Lit. 36
Volumetrische Untersuchung des Schlämmkornanteils von Kiessanden	FA. 5.45 c BA. 1963-65 Lit. 31
Messung kapillarer Steighöhen von Sanden und Kiessanden	FA. 5.45 c BA. 1963-65 Lit. 33
Einbaufähigkeit organisch verunreinigter Böden	FA. 5.104 BA. 1963-65
Porenwasser- und Bodendruckmessungen an der Fehmarnsundbrücke	BA. 1963-65, 1966-67
Untersuchungen an Sonnenbrenner-Basalten	BA. 1966-67
Vergleichsuntersuchungen mit dem Plattendruck- und CBR-Versuch auf bindigen Böden	FA. 5.32 BA. 1966-67, 1968-69 Lit. 34
Erddruck- und Verformungsmessungen an einem Brückenwiderlager der Rahmedetalbrücke	BA. 1966-67 Lit. 45
Ersatzbauweisen für Frostschuttschichten	BA. 1966-67 Lit. 37
Verhinderung bzw. Verringerung von Schäden durch Auftausalze an den Straßen- und Autobahnbeplantungen	FA. 3.201 BA. 1966-67, 1968-69, 1970-71, 1972-73
Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Absterbeerscheinungen in Waldbeständen und dem Zufluß salzhaltigen Schmelzwassers von der Straße	FA. 3.207 BA. 1966-67, 1968-69, 1970-71, 1972-73
Einsatz von Chemikalien bei den Unterhaltungsarbeiten von Grünflächen an Straßen	BA. 1963-65, 1966-67, 1968-69
Rationalisierung der Arbeiten zur Begrünung an Straßen	BA. 1963-65, 1966-67, 1968-69, 1970-71
Beeinflussung der Mutterbodengüte durch Art der Gewinnung, Lagerung und Andeckung	FA. 3.206 BA. 1963-65, 1966-67, 1968-69
Neigungsmessungen an den Pfeilern der Rheinbrücke Bonn-Nord	BA. 1966-67

Untersuchungen an Lavaschlacken	FA. 5.33 BA. 1966-67
Untersuchungen von Gesteinen mit zweifelhafter Frostbeständigkeit	FA. 9.203 BA. 1968-69, 1970-71
Entwicklung und Erprobung von Meßverfahren zur Unterscheidung der Bodenklassen 2.27 (leichter Fels) und 2.28 (schwerer Fels)	FA. 5.24 BA. 1968-69, 1970-71, 1972-73
Untersuchungen zum Vergleich des Plattendruck- und des CBR-Versuchs auf bindigen Böden	FA. 5.32 BA. 1968-69 Lit. 34
Vergleichsuntersuchungen mit verschiedenen Plattdruckgeräten	BA. 1968-69 Lit. 29
Untersuchung über die Verwendbarkeit des Nebelgesteins der Steinkohle als Dammschüttmaterial Straßen	BA. 1968-69, 1970-71
Ausführung von Plattendruckversuchen mit dem Benkelmanbalken bei der Erdbaukontrolle	Ba. 1968-69 Lit. 38
Verwendbarkeit von Müllverbrennungsrückständen	BA. 1970-71
Frostbeständige Bodenverfestigung als Ersatz für Frostschuttschichten	FA. 5.19 BA. 1970-71
Pflegearme Rasenflächen	FA. 3.210 BA. 1970-71, 1972-73
Rationalisierung der Rasenansaat an Straßen	FA. 3.205 BA. 1970-71
Mechanische Festigkeit von Lavaschlacke	FA. 5.33 BA. 1966-67, 1972-73, 1974
Untersuchungen über Asphaltoberbau	FA. 7.703 BA. 1972-73, 1974, 1975-77, 1978-80
Untersuchungen über Wärmedämmschichten	FA. 6.204 BA. 1972-73
Filterstabilität von Kiesen unter statischer und dynamischer Belastung	FA. 5.703 BA. 1974
Untersuchung der Durchlässigkeit von Frostschutzkiessanden	FA. 5.007
Untersuchungen über den Erddruck und die Verformungen des Spundwandwiderlagers eines Brückenbauwerks	Lit. 30, 45
Untersuchungen über den Erd- und Sohldruck hinter Brückenwiderlagern mit festen Auflagern	Lit. 30

Technische Überprüfung von Gewölbebauwerken aus Stahlbetonfertigteilen (System Bebo)	BA. 1972-73, 1974
Technische Überprüfung des Bauverfahrens "Bewehrte Erde" und Aufstellung von Richtlinien	BA. 1975-77, 1978-80, Lit. 38, 43
Erprobung von Verfahren des Dammbaues auf wenig tragfähigem Untergrund	BA. 1975-77, 1978-80 Lit. 42, 39, 41, 44
Erprobung eines neuen Verdichtungsverfahrens für die Verbesserung wenig tragfähiger Böden und Müllablagerungen	BA. 1975-77
Verwendung von Abfallstoffen und industriellen Nebenprodukten im Erd- u. Straßenbau	BA. 1975-77

A2.2 Literaturhinweise auf Sonderveröffentlichungen

ANHANG A2

Literaturhinweise

A2.1 Schriftenreihe des Prüfamtes für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München (Hefte 1 - 28)

- 1 Tragfähigkeit von Verpreßankern in nichtbindigem Boden. Scheele, F., Heft 1, 1982
- 2 Beiträge zur Anwendung der Stochastik und Zuverlässigkeitstheorie in der Bodenmechanik. Heft 2, 1983
- 3 In-situ Versuche zur Ermittlung der Unterbausteifigkeit an zwei Pfeilern der Sinnalbrücke Schaippach. Kempfert, H.-G., Schwarz, P., Heft 3, 1984
- 4 Ein Beitrag zum Spannungs-Verformungsverhalten silikatgelinjizierter Sande. Schubert, A., Heft 4, 1985
- 5 Beiträge zum Tragverhalten axial zyklisch belasteter Pfähle. Gruber, N., Koreck, H.-W., Schwarz, P., Heft 5, 1985
- 6 Forschungsbeiträge zum mechanischen Verhalten von Geotextilien. Heft 6, 1986
- 7 Beschreibung der räumlichen Streuungen von Bodenkennwerten mit Hilfe der Zeitreihenanalyse. Alber, D., Reitmeier, W., Heft 7, 1986
- 8 Ein stochastisches Bodenmodell für geotechnische Aufgaben. Alber, D., Heft 8, 1986
- 9 Testing of bentonit suspensions. Maini, K. S., Heft 9, 1987
- 10 Beiträge zur Felsmechanik. Heft 10, 1987
- 11 Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von Böden. Heft 11, Kröber, W., 1988
- 12 Bruchvorgänge infolge der Isareintiefung südlich Münchens und die kritischen Höhen der Talhänge. Baumann, H.-J., Heft 12, 1988
- 13 Quantifizierung von Setzungsdifferenzen mit Hilfe einer stochastischen Betrachtungsweise. Reitmeier, W., Heft 13, 1989

- 14 Ein Beitrag zur Vorhersage von Verformungen und Spannungen des Baugrundes und des Ausbaues bei Hohlraumbauten. Vega Mayer, S., Heft 14, 1989
- 15 Beitrag zur Analyse des Tragverhaltens von einfach bewehrten Zweischichtensystemen. Bauer, A., Heft 15, 1989
- 16 Beitrag zur statistischen Qualitätskontrolle im Erdbau. Kudla, W., Heft 16, 1990
- 17 Vergleichsuntersuchungen über die Wirkung von vibrierend und oszillierend arbeitender Verdichtungswalze. Floss, R., Reuther, A., Heft 17, 1990
- 18 Probabilistische Standsicherheitsanalyse für tetraedrische Felskeile. Trunk, U., Heft 18, 1993
- 19 Untersuchungen zur Wirksamkeit einer Bewehrung im Zweischichtensystem. Gold, G., Heft 19, 1993
- 20 Zur Strategie der Gestaltung großer Kraftwerkskavernen. Hönlisch, K., Heft 20, 1994
- 21 Beiträge aus der Geotechnik. Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Floss. Heft 21, 1995
- 22 Ein Verfahren zur Bestimmung der Durchlässigkeit mit Infiltrationsversuchen. Berner, U., Heft 22, 1995
- 23 Untersuchungen zur Materialdämpfung in der Bodendynamik. Huber, H., Heft 23, 1996
- 24 Beitrag zum zeit- und temperaturabhängigen Materialverhalten von Asphaltbeton für Kerndichtungen in Schüttdämmen unter besonderer Berücksichtigung des ebenen Verzerrungszustandes. Schulze, A., Heft 24, 1996
- 25 Risikobetrachtungen zur Planung von Maßnahmen zum Grundwasserschutz im Einflußbereich von Straßen. Ascherl, R., Heft 25, 1997
- 26 Der Einfluß der Verbundwirkung zwischen Boden und Geotextil auf das Verformungsverhalten von bewehrten Steilböschungen. Bauer, A., Heft 26, 1997
- 27 Untersuchungen über das Spannungs-Verformungs-Verhalten von mehrlagigen Kunststoffbewehrungen in Sand. Nimmegern, M., Heft 27, 1998
- 28 Beitrag zum Verhalten mehrschichtiger Dichtungssysteme mit Kunststoffdichtungsbahnen unter Scherbeanspruchung. Fillibeck, J., Heft 28, 1999

- 29 FLOSS, R.: Plattendruck- und Proctorversuche bei der Baukontrolle im Straßenbau. In: Straße und Autobahn, Heft 5, 1963.
- 30 FLOSS, R.; SIEDEK, P.; VOSS, R.: Verdichtungs- und Verformungseigenschaften grobkörniger, bindiger Mischböden, 1968
- 31 FLOSS, R.: Beurteilung des Feinkornes von sandig-kiesigen Böden und Zuschlagstoffen mit Hilfe des Sandäquivalentes. In: Mitteilungen BAST, Heft 1, 1968
- 32 FLOSS, R.: Verdichtungs- und Verformungseigenschaften grobkörniger bindiger Mischböden. In: Mitteilungen BAST, Heft 1, 1968
- 33 FLOSS, R.: Anwendung eines Isotopenmeßverfahrens zur Untersuchung der kapillaren Wasserbewegung in sandig-kiesigen Böden. In: Mitteilungen BAST, Heft 2, 1969
- 34 FLOSS, R.: Erdbautechnische Voraussetzungen für standardisierte Straßenbefestigungen. In: Mitteilungen BAST, Heft 2, 1969
- 35 FLOSS, R.: Vergleich der Verdichtungs- und Verformungseigenschaften unsteiger und stetiger Kiessande hinsichtlich ihrer Eignung als ungebundenes Schüttmaterial im Straßenbau. In: Wissenschaftliche Berichte BAST, 1970
- 36 FLOSS, R.: Über den Zusammenhang zwischen der Verdichtung und dem Verformungsmodul von Böden. In: Mitteilungen BAST, Heft 5, 1972
- 37 FLOSS, R.: Betrachtungen zur Frostsicherung und Standardisierung von Fahrbahnbefestigungen. In: Straße und Autobahn, (26) Heft 3, S. 85 - 93, 1975
- 38 FLOSS, R.; THAMM, B.R.: "Bewehrte Erde" Ein neues Bauverfahren im Erd- und Grundbau. In: Die Bautechnik, 1976
- 39 FLOSS, R.: Consolidation dynamique de terrains compressibles pour fondations de remblais autoroutiers et ferroviaires. In: Colloq. Int. sur le Compactage, Paris, Avr. 1980. Paris: Ecole Nat. et Lab. Cent. des Ponts et Chaussées 1980. Vol. 1, S. 325 - 330
- 40 FLOSS, R.: Einbeziehung von Frostschuttschichten bei der Dimensionierung des Straßenoberbaues mit standardisierten Fahrbahnbefestigungen. In: Straße und Autobahn 30, 1979
- 41 FLOSS, R.; HEINISCH, H.: Design parameters for artificially improved soils. In: Proc. VII Eur. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Brighton, 1979. Panelist rep. Vol. 4, S. 277 - 283
- 42 FLOSS, R.; HEINISCH, H.: Dynamische und statische Vorkonsolidierung organischer Schluffe und Tone im Untergrund einer Dammschüttung. In: Proc. 6. Donau-Eur. Konf. f. Bodenmech. u. Grundbau, Sekt. 1a - Bauen auf schwachem Boden, Varna, 1980, S. 97 - 108

- 43 FLOSS, R.; THAMM, B.: Field measurements of a reinforced earth retaining wall under static and dynamic loading. In: Colloq. Int. sur le Renf. des Sols, Paris, Mars 1979, Vol. 3, S. 183 - 188
- 44 FLOSS, R.; BRÜGGEMANN, K.; HEINISCH, H.: Porenwasserdruck- und Setzungsmessungen in normal konsolidiertem, geschichtetem Untergrund. In: Vortr. d. Baugrundtag. 1980 in Mainz. Berlin: Ernst, 1981, S. 281 - 302
- 45 FLOSS, R.; THAMM, B.: Erddruck bei Brücken mit Spundwandwiderlagern und gelenkig gelagertem Überbau. In: Vortr. d. Baugrundtag. 1980 in Mainz. Berlin: Ernst 1981, S. 487 - 522
- 46 HODJERA, B.: Das Verhalten von Böden unter dynamischer Dauerbelastung. In: Geotechnik 1979, Heft 2, S. 84 - 97. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V.
- 47 FLOSS, R.; LAJER, H.; LANG, K.: Prüfung von Geotextilien. In: Bauingenieur 61, 1986, H. 3, S. 101 - 105
- 48 LAJER, H.; BRÄU, G.; FLOSS, R.: Wirkungsweise von Geotextilien unter intensiver dynamischer Beanspruchung. In: Forschungsberichte des Bundesministers für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. März 1990. Hrsg.: Bundesminister für Verkehr Abt. Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg. Heft 595, Juni 1990.
- 49 HEYER, D.; SCHEUFELE, G.: Auswertung und Beurteilung bisher in der Praxis angewandter bautechnischer Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten. In: Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen. Hrsg.: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.. Heft 104, April 1990.
- 50 OSTERMAYER, H.; WÄLZEL, E.: Bestimmung der Langzeitfestigkeit von Böschungen. In: Schlußbericht zum Forschungsvorhaben 5.069 G 80 G i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Hrsg.: Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TUM, 1990
- 51 FLOSS, R.; BRÄU, G.; GAHBAUER, M.; GRUBER, N.; OBERMAYER, J.: Dynamische Verdichtungsprüfung bei Erd- und Straßenbauten. -In: Forschungsberichte des Bundesministers für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. März 1990. Hrsg.: Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg. Heft 612, 1991.
- 52 HUBER, H.: Materialverhalten bei zyklischer Drehung der Hauptspannungsrichtung im tordierenden Triaxialgerät - In: Schlußbericht zum Forschungsvorhaben FI 136/4-2 der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Hrsg.: Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TUM, November 1991.
- 53 KUDLA, W.; FLOSS, R.; TRAUTMANN, C.: Dynamischer Plattendruckversuch. Schnellprüfverfahren für die Qualitätssicherung von ungebundenen Schichten. In: Straße + Autobahn 42 (1991), S. 66-71

- 54 FLOSS, R.; STIEGELER, R.: Qualitätssicherung beim Verfüllen von Leitungsgräben
In: Forschungsberichte des Bundesministers für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. März 1992. Hrsg.: Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg. Heft 627, 1992.
- 55 BERNER, U.; FLOSS, R.: Anforderungen an die Durchlässigkeit von ungebundenen Tragschichten. -In: Forschungsbericht des Bundesministers für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. September 1991. Hrsg.: Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg, Heft 619, 1992.
- 56 FILLIBECK, J.; FLOSS, R.: Untersuchungen zur Eignung von Kunststoffdichtungsbahnen für die Anwendung als Abdichtungsmaterial bei Straßen in Wassergewinnungsgebieten. In: Forschungsberichte des Bundesministers für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. März 1994. Hrsg.: Bundesminister für Verkehr Abt. Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg. Heft 682, 1994.
- 57 FLOSS, R.; HEYER, D.: Eignung natürlicher Böden als Dichtungsstoffe zum Grundwasserschutz im Bereich von Verkehrsflächen. In: Forschungsberichte des Bundesministers für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. März 1989. Hrsg.: Bundesminister für Verkehr Abt. Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg. Heft 585, 1994.
- 58 BAUER, A.; BRÄU, G.: Untersuchungen zum Kraftdehnungsverhalten von Geotextilien unter Bodeneinbaubedingungen. In: Forschungsberichte des Bundesministers für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. März 1994. Hrsg.: Bundesminister für Verkehr Abt. Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg. Heft 678, 1994.
- 59 TRUNK, U.; HÖNISCH, K.: Grundlagenuntersuchungen über Gestaltung und Sicherung von großen Felshohlraumbauten in Abhängigkeit von Umfang und Güte der felsmechanischen Vorinformationen. - In: Schlußbericht zum Forschungsvorhaben Fl 136/7-2 i. A. der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Hrsg: Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TUM, September 1995
- 60 TRUNK, U.; HÖNISCH, K.: Grundlagenuntersuchungen über Gestaltung und Sicherung von großen Felshohlraumbauten in Abhängigkeit von Umfang und Güte der felsmechanischen Vorinformationen. - In: Schlußbericht zum Forschungsvorhaben Fl 136/7-2 i. A. der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Hrsg: Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TUM, September 1995
- 61 SCHULZE, A.; SCHMID, R.: Senkrechte und schwach geneigte bituminöse Kerndichtungen in hohen Schüttdämmen. - In: Forschungsvorhaben, Forschungsauftrag FL 136/5 und FL 136/9 der Deutschen Forschungsgemeinschaft Endberichte. Hrsg. Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TUM und Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft der TUM, München, September 1995

- 62 HEYER, D.: Die Bestimmung des Sättigungsablaufs mineralischer Abdichtungsmaterialien als Grundlage für die Beurteilung der Infiltrationsmöglichkeit von grundwassergefährdenden Substanzen. - In: Schlußbericht zum Forschungsvorhaben FL 136/8-1 i A. der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Hrsg.: Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik TUM, August, 1995.
- 63 HEYER, D.; ASCHERL, R.: Design and construction of sealing systems with geosynthetic clay liners (GCL). -In: Geosynthetics: Applications, Design and Construction. Proceedings of the first european geosynthetics conference Eurogeo 1, Maastricht, Netherlands, 30 September - 2 October 1996. Eds.: De Groot et al.. Rotterdam: A. A. Balkema, 1996. S. 771 - 777.
- 64 KRUG, M.; HEYER, D.: Geotextile Filter im Erd-, Straßen- und Deponiebau. In: Geotechnik 1998, Heft 21, S. 314 - 326. Hrsg: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V.
- 65 STIEGELER, R.; HEYER, D.; FLOSS, R.: Optimization of Bedding Material for Drainage Pipes upon Base Sealings in Landfills. In: 7th International Waste Management and Landfill Symposium, October 1999, Vol. III, S.223-232