

Geogitterbewehrte Dämme auf pfahlähnlichen Elementen: Grundlagen und Projekte

Geogrid-reinforced Embankments: Methods and Case Studies

Dr.-Ing. Dimitar Alexiew

1. Zusammenfassung

Deutsch:

Dämme auf weichem Untergrund, die durch vertikale pfahlähnliche Elemente und hochfeste horizontale geosynthetische Bewehrungen getragen werden, haben einige Vorteile gegenüber direkt (flach) gegründeten Dämmen: es ist keine Konsolidierungszeit erforderlich, die Dammsetzungen sind äußerst gering, man braucht keinen zusätzlichen Import oder Export von Dammboden zur vorläufigen Überlastung oder zur Setzungskompensation, unter Betrieb sind die Dämme praktisch setzungsfrei etc. Während der letzten Jahre nimmt die Anwendung solcher Systeme weltweit rapide zu.

Erste Berechnungsverfahren gibt es seit Ende der 80er Jahr. Sie haben inzwischen eine signifikante Entwicklung durchgemacht. Die wichtigeren davon werden kurz dargestellt mit Hinweisen auf deren Spezifikation, Grenzen, Vor- und Nachteilen. Es werden weiterhin einige ausgeführte Projekte aus den letzten 10 Jahren und aus verschiedenen Ländern beschrieben, die spezifische und innovative Lösungen beinhalten, um das heute Machbare, die Erfahrungen und den praktischen Stand der Technik darzustellen.

Englisch:

Embankments on soft subsoil supported by piles or similar elements and high-strength geosynthetic reinforcement on top of them have important advantages compared to "conventional" embankment foundation: no consolidation time is required, there is no import/export of additional embankment soil to accelerate consolidation or to compensate the settlement, practically no additional settlement occurs under traffic etc.. The application of such solutions is growing recently worldwide.

Corresponding design procedures meantime have more than 10 years of history going through significant development, scientific and verification efforts across Europe.

A critical overview of these procedures is presented pointing out the increasing precision and reliability.

Some typical interesting projects during the last about 10 years are shortly described and discussed including both railroad and road applications, different concepts and geosynthetic reinforcements, measurement programs and experience.

2. Grundidee, Prinzipien und einige Grundsätze der geosynthetischen Bewehrung

Die Grundidee ist in Bild 1 gezeigt (modifiziert von [5]). Die Lasten vom Damm werden über die vertikalen pfahlähnlichen Elemente durch die weiche Bodenschicht hindurch zu einer tieferen tragfähigen Bodenschicht übertragen. Der Dammboden kann nur einen Anteil der Spannungen durch „Bogenbildung“ direkt in die „Pfähle“ einleiten. Der Rest wird zunächst von einer horizontalen geosynthetischen Bewehrung aufgefangen, die den Weichboden zwischen den „Pfählen“ überbrückt (Bild 1) und dann in die „Pfähle“ eingeleitet.

Es gibt heute geosynthetische Bewehrungen mit Zugfestigkeiten von 1600 kN/m und mehr. Deshalb ist praktisch die Überbrückung eines beliebigen lichten Abstands zwischen den Pfählen ohne Weiteres möglich, wobei sowohl die Erfüllung der Tragfähigkeitsbedingungen wie auch der Verformungsbedingungen kein Problem darstellt.

Bild 1: Prinzip und Wirkungsweise eines Dammes mit geosynthetischer Bewehrung auf pfahlähnlichen Elementen

Heutzutage kann man geosynthetische Bewehrungen, zum Beispiel Geogitter, aus unterschiedlichen Polymeren produzieren und dadurch präzise das Verformungsverhalten des Systems steuern. Ein typisches Beispiel sind die Geogitterfamilien auf Bild 2, die zwar in Produktion und Technologie ähnlich sind, aber aus unterschiedlichen Polymeren bestehen. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Arbeitslinien bzw. unterschiedliche Dehnsteifigkeiten.

Bild 2: Einfluss des Polymers auf das Zugkraft-Dehnungsverhalten einer Geogitterfamilie (dargestellt nur das Kurzzeitverhalten; PET = Polyester, PVA = Polyvinylalkohol, AR = Aramid)

Aus Platzgründen wird hier auf weitere Details verzichtet. Es ist grundsätzlich darauf zu achten, dass insbesondere die Kriechdehnungszunahme der Bewehrung nach Ende der Bauphase strikt zu limitieren ist, weil daraus resultierende Verformungen der Bewehrung und des Dammes in der Betriebsphase kaum kompensierbar sind. Für diese Berechnungen und Nachweise bedient man sich der sogenannten Isochronenkurven der Geogitterbewehrungen. Von den Isochronenkurven kann man für beliebige Zugkräfte und beliebige Zeiten die Dehnungen und die Dehnungszunahmen der Bewehrung ablesen. Es sei – last but not least - vermerkt, dass die geosynthetische Bewehrung nicht nur die Pfahlabstände unter dem Damm überbrückt, sondern auch quer zur Dammachse die zum Teil beträchtlichen horizontalen, nach außen gerichteten „Spreizkräfte“ auch noch auffängt, um die pfahlähnlichen Elemente nicht auf Biegung zu belasten.

3. Kurzer Überblick über die Berechnungsverfahren

Seit etwa 1985 wurden unterschiedliche analytische Lösungen zur Bemessung der Systeme und insbesondere der Bewehrung entwickelt. Die älteren sind relativ einfach, die neueren ein bisschen komplizierter und präziser. Es gibt daneben auch die Möglichkeit, numerische Analysen zweidimensional und dreidimensional durchzuführen.

Numerische Lösungen bergen die im geotechnischen Bereich bekannte Gefahren; um korrekte Ergebnisse zu erzielen, braucht man eine große bodenmechanische und rechentechnische Erfahrung. Numerische Lösungen tendieren erfahrungsgemäß auch dazu, die Zugkräfte und Dehnungen in den Bewehrungen zu unterschätzen.

Es gibt zwei Schwerpunkte in jedem analytischen Berechnungsverfahren:

- die Umverteilung der Spannungen / Verformungen im punktuell gestützten Dammkörper (d.h. welcher Anteil der Lasten bzw. Spannungen landet direkt auf

den pfahlähnlichen Elementen und welcher Rest muss von der geosynthetischen Bewehrung aufgefangen werden?);

- die Berechnung und Bemessung der geosynthetischen Bewehrung an sich.

Folgende generelle Zusammenhänge sind immer gültig:

- je höher die Scherfestigkeit des Dammkörpers
- je höher das Verhältnis $H/(s-a)$ in Bild 1
- je größer die Abmessungen der Aufstandfläche des pfahlähnlichen Elementes bzw. der Pfahlkappe
- je höher die nach oben gerichtete Gegenpressung vom weichen Untergrund zwischen den Pfählen

desto geringer sind die Anforderungen an die überbrückenden geosynthetischen Bewehrungen, sowohl bei der Dehnsteifigkeit als auch bei der Festigkeit.

Es folgt ein kurzer Überblick über die bis zum heutigen Zeitpunkt gängigen analytischen Bemessungsverfahren:

Bild 3: Das sogenannte „Guido-Verfahren“

Sehr stark vereinfachtes Modell. Die Bewehrungen sollen nur die kleinen Pyramidalkörper zwischen den Pfählen tragen. Obwohl oft als Guido-Verfahren zitiert, hat das Verfahren mit der eigentlichen Arbeit von Guido [8] nichts zu tun. Das Verfahren ist durch wissenschaftliche Untersuchungen nicht belegt. Die Pyramiden haben unabhängig von den (Festigkeits)Kennwerten des Dammbodens immer die Winkelneigung von 45° , was bodenmechanisch nicht korrekt ist. Es gibt weltweit keine Norm, die auf diesem Verfahren beruht. Das Verfahren scheint riskant zu sein [15, 20]. Es sind Projekte mit Gebrauchstauglichkeitsproblemen bekannt.

Bild 4: Das „Schwedische Verfahren“

Erste Vorschläge in [6] neue Modifikationen in [18, 19]. Stark vereinfachtes Modell; Pyramidenstumpfansatz mit Wandneigung von 75° unabhängig vom Dammbodenmaterial, was bodenmechanisch nicht korrekt ist. Das Verfahren ist sicherer als das sogenannte „Guido Verfahren“. Die Pyramidenstumpfe können die Dammoberfläche erreichen und

erfassen somit korrekterweise einen Teil der Verkehrslast. Die Bewehrung ist ein- bis zweilagig und wird nach der Membrantheorie (Bild 1) berechnet. Das Verfahren liefert um das mehrfache stärkere Bewehrungen als das sogenannte „Guido Verfahren“ und ist insoweit realistischer.

Bild 5: Das Verfahren nach dem „British Standard 8006“

Erste Konzepte dargestellt bei [10], weitere Entwicklungen gezeigt z.B. in [11], existiert als Norm seit 1995. Vereinfachte 3-D-Bodenbogenausbildung im Dammkörper. Es ist immer eine Halbsphäre, unabhängig vom Dammbodenmaterial. Das ist bodenmechanisch bedenklich, weil das Verfahren die selben Ergebnisse liefert z.B. für einen Feinsand und für einen Sprengfels! Je nach Dammhöhe gibt es gewisse Inkonsistenzen in den Rechenergebnissen. Die Bewehrung ist ein- bis zweilagig und wird nach der Membrantheorie berechnet (Bild 1). Es wird immer Freiraum („Luft“) zwischen den pfahlähnlichen Traggliedern vorausgesetzt, das bedeutet, das System ist immer a priori freihängend. Die Prozedur ist weltweit sehr populär trotz einiger Schwachpunkte. Weitere Informationen finden sich in [16].

Bild 6: Das „ältere deutsche Verfahren“ (etabliert)

Die Entwicklung begann 1992 – 1993, der Entwurf von BS 8006 war zu dieser Zeit in Deutschland bekannt. Deutsche Geotechnikingenieure (darunter der Verfasser) wollten es nicht akzeptieren, dass alle bis dato vorhandenen Verfahren Bruch- und Belastungskörper voraussetzten, die unabhängig von der Scherfestigkeit des Dammkörpers waren. Man entwickelte aus diesem Grund eine Mischlösung: Die Berechnung der Spannungsumverteilung (Belastung direkt auf Pfähle/Belastung auf Bewehrung) erfolgte nach dem Verfahren von [9], das zum ersten Mal auch die Scherfestigkeit des Dammkörpers berücksichtigt (Bild 6). Nach Bestimmung der Belastung auf der Bewehrung wurde die Membrantheorie nach BS 8006 angewendet. Es wurde die Möglichkeit eingeführt, durch einen vereinfachten Ansatz eine nach oben gerichtete Gegenpressung von weichem Untergrund zwischen den pfahlähnlichen Traggliedern zu berücksichtigen. Es wurden auch minimale konstruktive Anforderungen an die ein- bis zweilagige Bewehrung eingeführt. Mehr Informationen finden sich z. B. bei [21, 12, 13, 14, 2, 4].

Das Verfahren wurde erfolgreich für mehrere zum Teil komplizierte Projekte in Deutschland und im Ausland verwendet und wurde mehrfach von Messprogrammen begleitet [2, 4].

Bild 7: Das „neuere deutsche Verfahren“ (in Bearbeitung)

Die Entwicklung begann vor einigen Jahren. Schwerpunkte waren: ein besseres Verfahren für die Spannungsumverteilung im Dammkörper, eine verbesserte Annahme der etwaigen Gegenpressung des Weichbodens zwischen den Pfählen nach oben, eine verbesserte Erfassung des Zusammenspiels Spannungsverteilung – Bewehrungsdehnung – Gegenpressung. Es wurden Versuche im Verhältnis 1:3 durchgeführt [14, 23] - sehr gute Arbeit! Nach zusätzlichen Arbeiten ist der Entwurf eines neuen Kapitels in [7] in Bearbeitung. Das Verfahren liefert präzisere Ergebnisse, was insbesondere für flachere schwerbelastete empfindlichere Systeme von Bedeutung ist. Es werden auch eine Reihe konstruktiver Empfehlungen getroffen: z. B. soll die hochfeste Bewehrung so tief wie möglich (am besten direkt auf dem „Pfahlkopf“) liegen und maximal aus einer bis zwei Lagen bestehen, weil das System dadurch ein besseres Verhalten aufweist und dort unabhängig vom Rechenergebnis gewisse Festigkeiten nicht unterschreitet. Weitere Informationen dazu in [12]. Dieses Berechnungsverfahren ist in Deutschland noch nicht eingeführt, weil unter anderem die praktische Berechnung für beliebige Fälle noch vielfach durch Experten zu checken und mit den vorhandenen Erfahrungen zu vergleichen ist. Es ist möglich, im Zweifelsfall zum „älteren deutschen Verfahren“ zu greifen (weniger präzise, aber mehrfach für unterschiedlichste Systeme und Materialien bewährt).

4. Überblick über einige interessante Projekte

Aus Platzgründen werden nur ganz kurze Beschreibungen ausgewählter Projekte gegeben. Jedes Projekt enthält innovative Momente oder spezifische Lösungen. Einige Projekte sind detaillierter beschrieben in [2, 3, 17, 4, 22].

Projekt „Werder-Brandenburg“, Deutsche Bahn, 1993-1994

Bild 8: Typischer Querschnitt des Aufbaus“ Werder-Brandenburg“

Rekonstruktion einer alten Bahnstrecke für eine Geschwindigkeit von 160 km/h auf zum Teil extrem dicken Weichbodenschichten (Bild 8). Berechnung und Bemessung erfolgten in Kombination von Hewlett Randolph und BS 8006 als Vorläufer des älteren deutschen Verfahrens mit einigen versteckten Sicherheiten und extremer Sicherheitsphilosophie in dieser jungen Zeit. Verwendet wurde ein relativ starkes biaxiales Polyester-Geogitter (Bild 8). Das Projekt wurde von dem intensivsten und am längsten andauernden Messprogramm für solche Bauwerke weltweit über mehrere Jahre begleitet. Gelernt: Die großen Stahlbetonplatten auf den sehr schlanken Pfählen tendieren zum Teil zur Drehung. Einige der Pfahlsetzungen liegen über der Prognose. Die Bewehrung in sich funktioniert tadellos. Die dynamischen Dehnungen unter Zugverkehr sind marginal. Die Messungen bestätigen die „britisch-deutsche“ Membrantragwirkung der Bewehrung (Bild 9).

Bild 9:“Werder-Brandenburg“ – typisches Verformungsbild in der Ebene des untersten Geogitters direkt über den Pfahlkappen. Achtung: unterschiedliche Maßstäbe für horizontal und vertikal

Projekt „Bahnhof Rathenow“ (Körgraben), Deutsche Bahn, 1997

Teilstrecke für den ICE, sehr flaches System, sehr strikte Begrenzungen jeglicher Verformungen, feste Fahrbahn. Berechnung und Bemessung resultierten in ein hochfestes, extrem dehnsteifes Aramid-Geogitter in zwei Lagen (Bild 10). Gerechnet wurde nach dem „älteren deutschen Verfahren“. Messprogramm: einmonatige Simulation von ICE Überfahrten, dynamische Messungen unter echten ICE Fahrten bis zu 300 km/h. Ausgezeichnetes Systemverhalten, weniger als 20 mm Durchhang der unteren Bewehrung und weniger als 10 mm Durchhang der oberen Bewehrung zwischen den Säulen. Gelernt: Auch empfindliche sehr anspruchsvolle Systeme können gebaut werden, unter Anwendung einer geeigneten Geogitterbewehrung.

Bild 10: Typischer Querschnitt „Projekt Rathenow“ (Körgraben)

Tankstelle „Shell“, Bulgarien, Sofia 1998

Sehr flaches System wegen der existierenden Infrastruktur und des hohen Grundwasserspiegels. Deswegen eine einlagige relativ starke biaxiale Bewehrung mit Überlappungen direkt über den Fertigbetonrammpfählen (Bild 11). Extreme finanzielle Begrenzungen, große Pfahlabstände, keine Pfahlkappen. Allerdings sehr sorgfältige Ausführung vor Ort, sehr intensive Verdichtung von Anfang an, bereits auf der ersten Sandkiesschicht von 30 cm unter direkter Aufsicht des Projektanten (des Verfassers). Keine Verformungen nach 5 Jahren unter Betrieb. Gelernt: Hochfeste breite biaxiale Geogitter können eine gute Lösung sein, wenn man sie direkt über den Pfählen überlappt. Das spart Systemhöhe. Intensive fachgerechte Bodenverdichtung von Anfang an ist sehr wichtig. Systeme mit einlagiger starker geosynthetischer Bewehrung sind baubar und funktionieren gut. Es ist wichtig, rechtzeitig Pfahlabstand und Bewehrungsgeometrie aufeinander abzustimmen (Schnittpunkt im Projekt).

Bild 11: Typischer Querschnitt „Tankstelle Shell“, Sofia

Projekt „Überquerung des Flusses Laje“ bei Chapadao, Ferronorte Rail, Brasilien 1998

Hoher Eisenbahndamm, sehr schwere Frachtzüge, Verwendung des lokalen, bindigen, lateritischen Bodens (bescheidene ϕ -Werte, hohe Kohäsion). Ruht auf sehr schlanken Pfählen (Bild 12), einlagige Bewehrung aus projektbezogenem berechnetem und hergestelltem semi-biaxialen Geogitter mit 5 m Breite und 400 kN/m in Ausrollrichtung und 150 kN/m quer zur Ausrollrichtung, ausgerollt quer zur Dammachse. Es wurde das ältere deutsche Berechnungsverfahren verwendet. Der Verfasser führte die Berechnung unter Anwendung eines äquivalenten Scherwinkels ϕ durch, um die hohe Kohäsion des Dammkörpers zu nutzen. Das ist in den bisherigen analytischen Verfahren weltweit nicht vorgesehen. Gutes Verhalten nach mehr als fünf Jahren unter Verkehr. Gelernt: Bindige Böden mit beständiger Kohäsion können erfolgreich für Dammkörper mit Bewehrung auf Pfählen verwendet werden. Die Nutzung eines äquivalenten Scherwinkels erscheint eine

mögliche Prozedur zu sein. Projektbezogen konzipierte und hergestellte semi-biaxiale Geogitter sparen Kosten.

Bild 12: Typischer Querschnitt „Überquerung von Laje“

Projekt „Harper Mühlenbach“, Deutsche Bahn, 1988 - 1999

Existierende alte Strecke musste für 160 km/h ertüchtigt und auch verbreitert werden. Breitere und standfestere Dammkörper waren erforderlich. Lösung: Obere alte Dammhälfte wegschneiden, zementstabilisierte Bodensäulen installieren, starke Geogitterbewehrung direkt darauf, Wiederaufbau der oberen Dammhälfte mit übersteilen Böschungen links und rechts mit einer separaten Geogitterbewehrung. Solch ein kombiniertes System „Damm auf Pfählen plus übersteile Böschungen“ wurde zum ersten Mal vom Eisenbahnbundesamt zugelassen. Keinerlei Probleme nach einigen Jahren unter Betrieb. Gelernt: Kombinierte Systeme wie diese sind eine geeignete Lösung zur Ertüchtigung alter Eisenbahndämme. Die vorsichtige Berücksichtigung einer nach oben gerichteten Gegenpressung vom alten Damm spart Bewehrungsfestigkeit und Kosten. Es ist immer wieder sehr aufmerksam zu überlegen, ob diese Gegenpressung über die ganze Lebensdauer von 100 Jahren vorhanden sein wird oder unter Umständen verloren geht, z.B. durch eine Absenkung des Grundwasserspiegels.

Bild 13: Typischer Querschnitt „Harper Mühlenbach“

Projekt „Selby Bypass“, Britische Straßen und Autobahnverwaltung, UK 2002

Dammhöhe bis zu 12 m, strikte Limitierung jeglicher Verformungen nach Ende der Bauphase. Aus Kostengründen: große Pfahlabstände mit kleinen Köpfen (Bild 14), relativ schlanke Bohrpfähle, hohe horizontal nach draußen gerichtete Spreizkräfte kombiniert mit der Empfindlichkeit der Pfähle gegen Biegung. Berechnungen nach BS 8006 mit einigen Modifikationen. Lösung: sehr starke dehnsteife Geogitter aus PVA (Polyvinylalkohol) mit einer Kurzzeitfestigkeit von 1600 kN/m und nur 5% Grenzdehnung, als 0,8 m breite Streifen direkt auf den Pfählen quer zur Dammachse; parallel zur Dammachse, vollflächig

5 m breite Polyester-Geogitter mit 400 und 600 kN/m Kurzzeitfestigkeit; Ergebnis mehrfacher Optimierung. Volle Ausnutzung der Pfähle als teuerste Systemkomponente. Messprogramm: Ergebnisse und Verhalten bis jetzt sehr positiv, kaum Setzungen, kleine vertikale und horizontale Verformungen der Bewehrungsebene. Gelernt: Die Kombination von Geogittern aus unterschiedlichen Polymeren in zwei unterschiedlichen Dammrichtungen erlaubt eine Optimierung, indem man in jede Richtung das Zugkraftdehnverhalten nutzt, das man braucht. Stark konzentrierte extrem hochfeste Geogitterstreifen, nur über den pfahlähnlichen Traggliedern perpendicular zur Dammachse können eine interessante, sehr zweckmäßige Lösung bei großen Pfahlabständen und großen Spreizkräften sein.

Bild 14: Typischer Querschnitt „Selby Bypass“

5. Abschließende Bemerkungen

Dämme auf pfahlähnlichen Traggliedern mit geosynthetischer Bewehrung in der Dammaufstandsfläche haben das Reifestadium erreicht. Es sind inzwischen große Erfahrungen vorhanden, sowohl in den Berechnungsverfahren, als auch beim Bau und beim registrierten Verhalten der Systeme. Das breite Spektrum von geosynthetischen Bewehrungen und unterschiedlichen Rohstoffen (Polymeren), das heute vorhanden ist, eliminiert jegliche technische Begrenzungen bei der Systemgestaltung und erlaubt eine Bewehrungs- und Systemoptimierung. Alle Erfahrungen bis jetzt zeigen, dass es kostensparend ist, den Abstand der vertikalen pfahlähnlichen Tragglieder zu maximieren und diese größeren Abstände mit einer stärkeren Geogitterbewehrung zu kompensieren.

Die heutigen deutschen Berechnungsverfahren, das ältere und das neuere, entsprechen im weltweiten Rahmen dem neuesten Stand der Technik.

Ein spezifischer Punkt ist der Ansatz der entlastenden Bodengegenpressung vom weichen Untergrund nach oben zwischen den pfahlähnlichen Traggliedern, die zum Teil von der gesamten Dammsetzung, aber insbesondere vom Durchhang der Bewehrungen generiert wird. Man muss sich immer wieder der Frage stellen: wird diese Gegenpressung tatsächlich über 100 Jahre lang vorhanden sein. Die könnte z.B. verloren gehen durch

eine spätere Grundwasserspiegelabsenkung in der Gegend. Dann bleibt das System nämlich freihängend zwischen den pfahlähnlichen Traggliedern und soll im Vorfeld so bemessen werden.

Bei Zweifeln und Bedenken bezüglich der Tragfähigkeit oder der Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks soll man lieber stärkere Bewehrungen aus geeigneten Polymeren wählen. Die Kosten dafür sind verglichen mit den Kosten für das gesamte Bauwerk und auch mit den Kosten für etwaige spätere Sanierungen gering.

Misserfolge durch Unterschätzung der erforderlichen Bewehrungsfestigkeiten oder infolge Anwendung unvorsichtiger Ansätze sind international bekannt, zum Glück bis jetzt nicht in Deutschland, können aber aus Platzgründen hier weder dargestellt noch diskutiert werden.

Literatur

- [1] Alexiew, D.: Modified redistribution of tensile forces of biaxial span reinforcement between the pile caps. Huesker Synthetic internal report, unveröffentlicht 1996.
- [2] Alexiew, D., Gartung, E.: Geogrid reinforcement railway embankment on piles – Monitoring 1994-1998. Proc. Geosyntetico '99, South American Symposium on Geosynthetics (1999), S. 403-411.
- [3] Alexiew D., Sobolewski J., Pohlmann H.: Projektbezogene Anwendungsmöglichkeiten von Geogittern aus neuartigen Polymeren. 6. Inform.- und Vortragstagung über Kunststoffe in der Geotechnik, München, 1999. Sonderheft "Geotechnik", DGGT Essen (1999), S. 199-206.
- [4] Alexiew, D., Vogel, W.: Railroads on piled embankments in Germany: Milestone projects. Proc. International Symposium on Earth Reinforcement, Fukuoka, Kyushu, Japan; Rotterdam, Balkema Vol. 1 (2001), S. 185-190.
- [5] British Standards institution BS 8006:1995: Code of practice for strengthened / reinforced soils and other fills. London, BSI (1995).
- [6] Carlsson, B.: Armerad Jord, Linköping, Terratema AB (1987).
- [7] EBGEO: Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik – DGGT (1987), Berlin, Ernst & Sohn.

- [8] Guido, V.A., Knueppel, J.D., Sweeny, M.A.: Plate loading tests on geogrid-reinforced earth slabs. Proc. Geosynthetic '87 Conf. , New Orleans, USA (1987), S. 216-225.
- [9] Hewlett, W.J., Randolph, M.F.: Analysis of piled embankments. Ground Engineering, Vol. 22, No. 3, April (1988), S. 12-18.
- [10] John, N.W.M.: Geotextiles. Blackie, Glasgow and London (1987), S. 294-302.
- [11] Jones, C.J.F.P., Lawson C.R., Ayres, D.J.: Geotextile reinforced piled embankments. Proc. Fourth Intern. Conf. on Geotextiles, The Hague, Netherlands; Rotterdam, Balkema (1990), S. 155-160.
- [12] Kempfert H.G., Göbel, C., Alexiew, D., Heitz, C.: German recommendations for reinforced embankments on pile-similar elements. Proc. EuroGeo 3, Munich (2004), S. 279 - 284.
- [13] Kempfert, H.G., Stadel, M., Zaeske, D. (1997). Berechnung von geokunststoffbewehrten Tragschichten über Pfahlelementen. Bautechnik, Vol. 74, Heft 12, S. 818-825.
- [14] Kempfert, H.G., Zaeske, D., Alexiew, D.: Interactions in reinforced bearing layers over partial supported underground. Proc. Twelfth Europ. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam, Netherlands; Rotterdam, Balkema, Vol. 3 (1999), S. 1527-1532.
- [15] Kempton, G.T., Russel, D., Pierpoint, N.D., Jones, C.J.F.P.: Two-and-three-dimensional numerical analysis of the performance of piled embankments. Proc. Sixth Intern. Conf. on Geosynthetics, Atlanta, USA; Minneapolis, IFAI, Vol. 2 (1998), S. 767-772.
- [16] Lawson, C.R.: Performance related issues affecting reinforced soil structures in Asia. Proc. Intern. Symposium on Earth Reinforcement, Fukuoka, Kyushu, Japan; Rotterdam, Balkema, Vol. 2 (2001), S. 831-867.
- [17] Lieberenz K., Alexiew D., Pohlmann H.: Bau eines Bahndammes mit geokunststoffbewehrter Basis und Böschung. Proc. 26. Deutsche Baugrundtagung in Hannover 2000. DGGT, Essen (2000), S. 433-439.

- [18] Rogbeck, Y, Gustavson, S., Sodergren, I., Lindquist, D.: Reinforced piled embankments in Sweden – design aspects. Proc. Sixth Intern. Conf. on Geosynthetics, Atlanta, USA; Minneapolis, IFAI, Vol. 2 (1998), S. 755-762.
- [19] Rogbeck, Y., Erikson, H.L., Persson, J., Svahn, V.: Reinforced piled embankment – 2D and 3D numerical modelling compared with case studies. Proc. EuroGeo 2, Bologna, Italy; Pátron Editore, Vol 2 (2000), S. 275-280.
- [20] Russel, D.M., Pierpoint, N.: An assessment of design methods for piled embankments. Ground Engineering (1997), S. 29-44.
- [21] Vogel, W.: Application of a new construction method for the substructures of railroads. Analysis Report, Deutsche Bahn AG (1995), unveröffentlicht.
- [22] Wood, H., Horgan, G., Pedley, M.: A63 Selby bypass design and construction of a 1.6 km geosynthetic reinforced piled embankment. Proc. EuroGeo 3, Munich (2004), S. 299 – 304.
- [23] Zaeske, D.: Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen. Schriftenreihe Geotechnik, Uni Kassel, Fachbereich Geotechnik, Heft 10 (2001).

Autor: Dr.-Ing. Dimiter Alexiew, HUESKER Synthetic GmbH, Fabrikstraße 13 – 15,
48712 Gescher