

## **Erfahrungen mit einem neuartigen Gründungs- und Sanierungsverfahren im Verkehrswegebau**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert & Dipl.-Ing. D. Zaeske, Universität Gh-Kassel, Deutschland

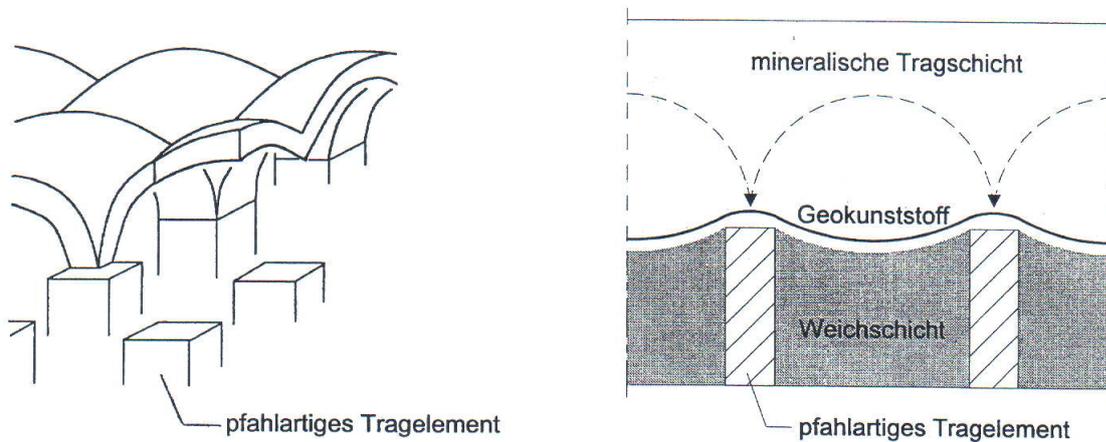
### **1 EINFÜHRUNG**

Zur Gründung von Verkehrswegen auf gering tragfähigem Untergrund wird in letzter Zeit zunehmend ein neuartiges Verfahren angewendet, bei dem der Untergrund rasterartig von pfahlähnlichen Elementen (z.B. Pfähle, Betonrüttelsäulen, Rüttelstopfsäulen, usw.) bis in tragfähige Bodenschichten durchfahren wird und oberhalb geokunststoffbewehrte mineralische Tragschichten ausgeführt werden. Dieses Verfahren hat sich in der bisherigen Ausführungspraxis, insbesondere im Anwendungsbereich von Eisenbahnverkehrswegen, als sehr wirtschaftlich und effektiv erwiesen. Da der Untergrund nicht entfernt oder in seiner ursprünglichen Struktur verändert werden muß, bietet dieses Verfahren auch eine kostengünstige Möglichkeit für Sanierungsmaßnahmen an bestehenden Bauwerken. Vorteilhaft wirken sich dabei insbesondere die kurzen Ausführungszeiten aus, die die Herstellung der Untergrundverbesserung in Anspruch nimmt. Das Gründungssystem läßt sich außerdem an natürliche oder künstliche Hindernisse leicht anpassen, da die Konstruktion sehr flexibel ausgeführt werden kann.

### **2 WIRKUNGSWEISE DES TRAGSYSTEMS**

Der grundsätzliche Tragmechanismus ist in Bild 1 dargestellt. Die bewehrte Tragschicht lagert sowohl auf den pfahlartigen Tragelementen als auch auf der anstehenden weichen Bodenschicht (Bild 1, rechts). Infolge der unterschiedlichen Steifigkeiten konzentrieren sich die vertikalen Bodenspannungen über den Tragelementen, was mit einer entsprechenden Spannungsumlagerung in der mineralischen Tragschicht verbunden ist. Bisher abgeleitete Tragvorstellungen gehen davon aus, daß sich in der Dammschüttung eine räumliche Gewölbewirkung über den steifen Tragelementen einstellt, sofern eine ausreichende Dammhöhe zur Verfügung

steht (Bild 1, links). Aus Gleichgewichtsgründen nehmen die senkrecht auf den Untergrund wirkenden Spannungen ab, d.h. die setzungsempfindlichen Bodenschichten werden entlastet.



*Bild 1:* Angenommene Gewölbetragswirkung in der mineralischen Tragschicht (links), Membranwirkung der Geokunststoffbewehrung am verformten System (rechts)

In der Ebene der Dammaufstandsfläche finden unterschiedliche Setzungen der Tragelemente, bzw. des nachgiebigeren Bodens statt. Diese Verformungsunterschiede bewirken Dehnungen und Zugkräfte in der Geokunststoffbewehrung, die über den Köpfen der Tragelemente verlegt ist. Die Geokunststoffe spannen sich dabei wie eine Membran über die unnachgiebigen Tragelemente und führen zu einer weiteren Entlastung des setzungsempfindlichen Untergrundes. Eine vollständige Entlastung des Bodens zwischen den Tragelementen kann wegen der begrenzten Steifigkeit der eingesetzten Geokunststoffe jedoch nicht erreicht werden, d.h. der Boden muß eine begrenzte Stützfunktion wahrnehmen. Kennzeichnend für die Gründungskonstruktion ist damit, daß die Lasten vorzugsweise von den gering tragfähigen Bodenschichten zu den pfahlähnlichen Tragelementen umgelagert werden.

Derzeit liegt ein abgesichertes Berechnungsmodell für die Verbundkonstruktion nicht vor. In der bisherigen Ausführungspraxis hat sich jedoch ein vereinfachtes Bemessungskonzept durchgesetzt, daß eine Dimensionierung der Geokunststoffbewehrung auf der sicheren Seite ermöglicht (*Kempfert et.al., 1997*).

### **3 AUSFÜHRUNGSFORMEN**

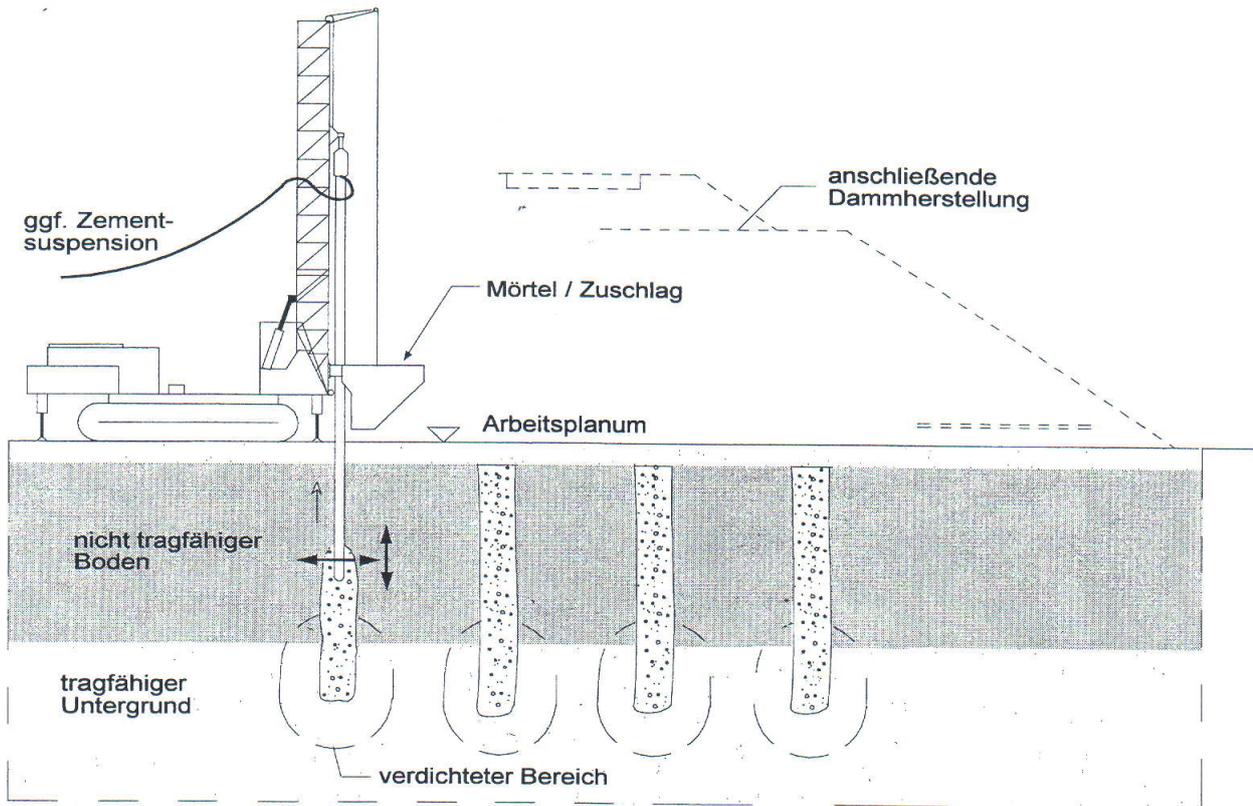
#### **3.1 Allgemeines**

International sind verschiedene Ausführungsformen von Gründungssystemen mit geokunststoffbewehrten Tragschichten über Pfahlelementen bekannt, in Großbritannien ist die Anwendung sogar im *british standart BS 8006* geregelt. Nachfolgend wird aber nur über die Ausführungsformen berichtet, die in Deutschland zur Gründung von Verkehrswegen umgesetzt worden sind und die daraus gewonnenen Erfahrungen dargestellt. Grundsätzlich kann das Verfahren für die Gründung von Neubaustrecken oder für die Sanierung, bzw. den Ausbau von bestehenden Strecken verwendet werden.

#### **3.2 Ausführung an Neubaustrecken**

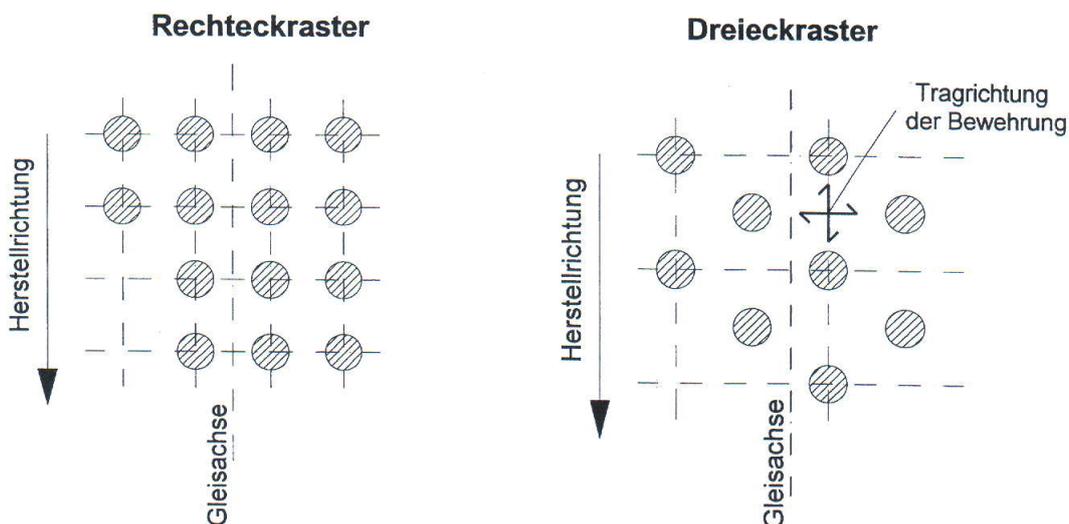
Für Neubaustrecken werden ausgehend von einem geschaffenen oder bereits vorhandenen Arbeitsplanum die pfahlähnlichen Tragelemente rasterartig über den gesamten Querschnitt des aufgehenden Bauwerkes in den Untergrund eingebracht. Zur Herstellung der Tragelemente kam in der bisherigen Ausführungspraxis oftmals das bekannte Rüttelstopfverfahren in Form von vermörtelten Stopfsäulen oder Betonrüttelsäulen zum Einsatz. Die Anwendung der Rüttelstopftechnologie hat sich wegen der einfachen und raschen Ausführung bewährt, insbesondere kann die Säulenlänge den jeweiligen Untergrundverhältnissen leicht angepaßt werden (*Sondermann, 1995*). Grundsätzlich sind aber auch andere Verfahren der Tiefgründung einsetzbar.

Nach der Herstellung der Tragelemente wird auf einer mineralischen Zwischenschicht über den Säulenköpfen die Geokunststoffbewehrung in Bahnen verlegt und der aufgehende Dammkörper lagenweise hergestellt, siehe Bild 2.



**Bild 2:** Ausführung der Tragelemente als Stopfsäulen mit aufgehender geokunststoffbewehrten Tragschicht

Die Tragelemente werden zumeist reihenweise in Streckenrichtung hergestellt, wobei sie in einem Rechteck- oder in einem Dreieckraster nach Bild 3 angeordnet werden können. Da als Geokunststoffbewehrung i.d.R. Geogitter ausgeführt werden, deren Haupttragrichtung rechtwinklig und parallel zur Gleisachse verläuft, wirkt sich ein Rechteckraster eher vorteilhaft auf die Tragwirkung der Bewehrung aus.

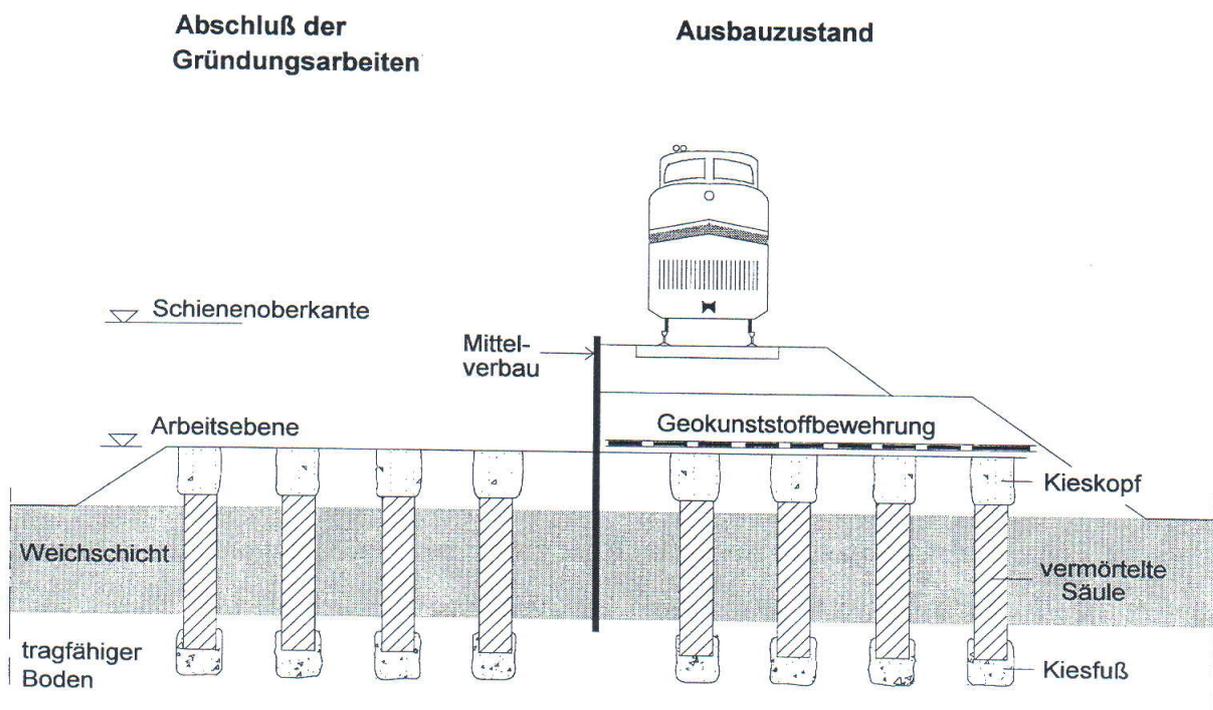


**Bild 3:** Rasteranordnung der pfahlartigen Tragelemente im Grundriß

Beim Rechteckraster fällt die Tragrichtung der Geogitterbewehrung mit den kürzesten Abständen der Tragelemente zusammen, wodurch die von der Bewehrung zu überspannende lichte Stützweite minimal wird. Andererseits ist ein Dreieckraster aus fahrdynamischen Gründen zu bevorzugen, da eventuell auftretende Setzungen an der Fahrbahn in Streckenrichtung besser ausgeglichen werden können.

### 3.3 Ausführung an Ausbaustrecken

Zur Sanierung oder den Ausbau an bestehenden Verkehrswegen wird der Dammkörper oft nur bis zu einer vorgegebenen Arbeitsebene abgetragen, wobei unter dem Schutze eines Mittelverbau der Verkehr auf benachbarten Gleisen aufrechterhalten werden kann. Bei Ausbaustrecken wurde häufig eine neuartige Variante der Stopfsäulen eingesetzt, bei der die Säulen nur im Bereich der Weichschicht vermörtelt sind und mit einem Kiesfuß und einem Kieskopf versehen werden (teilvermörtelte Stopfsäule). Je nach Höhenlage der Arbeitsebene wird, wie in Bild 4 gezeigt, die Geokunststoffbewehrung in größerem Abstand von der Weichschicht auf den Kiesköpfen verlegt.



*Bild 4:* Ausführung zur Untergrundverbesserung an bestehenden Verkehrswegen

Mit zunehmender Höhenlage der Bewehrung über der weichen Bodenschicht nehmen die Setzungsdifferenzen und die Membranwirkung der Bewehrung jedoch ab, da im Bereich der

Kiesköpfe Scherdeformationen bereits teilweise abgebaut werden. Die Tragwirkung der Geokunststoffe kann bei der in Bild 4 dargestellten Ausführungsform somit nur begrenzt mobilisiert werden. Dies hat sich in der bisherigen Ausführungspraxis aber nicht als nachteilig erwiesen, da der Boden unter der Bewehrung infolge seiner guter Verdichtung durch die eingestopften Kiesköpfe größere Scherbeanspruchungen aufnehmen kann.

## **4 ERFAHRUNGEN AN AUSGEFÜHRTEN PROJEKTEN**

### **4.1 Neubaustrecke Hannover-Berlin**

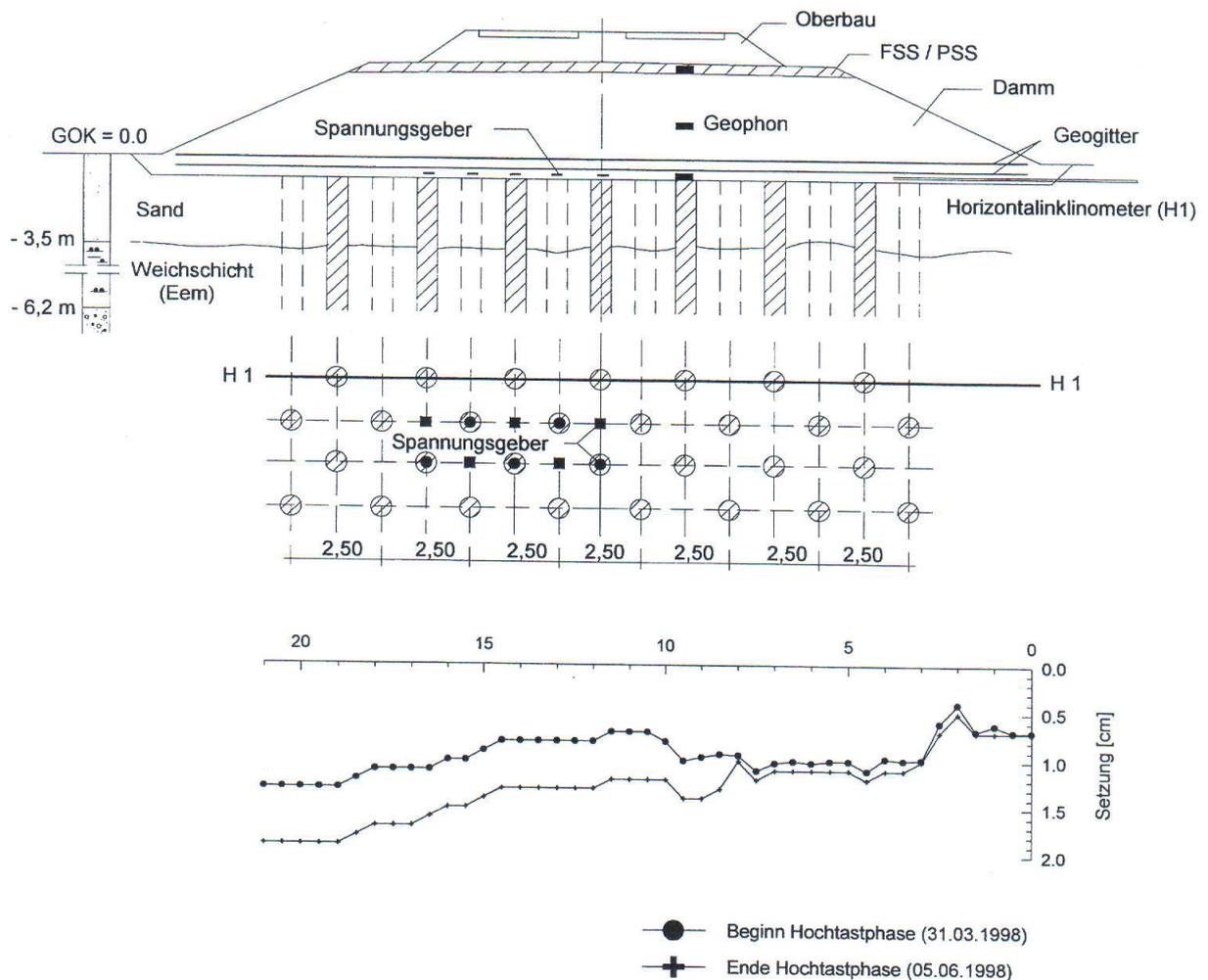
An der Neubaustrecke Hannover-Berlin mußte der 2 bis 3 m hohe Bahndamm stellenweise über gering tragfähige Bodenschichten geführt werden. In zwei Streckenabschnitten südwestlich von Berlin wurde ein Gründungssystem mit geokunststoffbewehrten Tragschichten über pfahlartigen Elementen quasi als Pilotprojekt für die Anwendung im Bereich der Deutschen Bahn AG (DB AG) ausgeführt. Der Untergrund in diesen Bereichen ist durch tiefliegende Weichschichten aus Eemablagerungen gekennzeichnet, die etwa 2 bis 5 m unterhalb der Geländeoberkante (GOK) in Mächtigkeiten bis maximal 7 m anstehen und von oberflächennahen Sandschichten überlagert werden. Zur Untergrundverbesserung wurden vermörtelte Stopfsäulen in einem Dreieckraster von 1,75 m auf 1,75 m durch die Weichschicht geführt, die in tragfähige tiefere Bodenschichten einbinden. Die Säulen schließen etwa mit der GOK ab, auf der die Dammschüttung und der Schotteroberbau hergestellt wurde. In der Dammaufstandsebene ist eine zweilagige Bewehrung aus Geogittern verlegt.

Da dieses Verfahren im Sinne der Regelungen der DB AG seinerzeit eine neue Bauweise darstellte, für die bisher keine abgesicherten Berechnungsverfahren bzw. allgemeine Regeln für die Bemessung vorliegen und auch keine ausreichenden Erfahrungen über das Langzeitverhalten der Konstruktion vorhanden sind, wurde ein geotechnisches Meßprogramm konzipiert, mit dem eine Beobachtung der Wirkungsweise der Tragkonstruktion ermöglicht werden soll.

Unter anderem wurden folgende geotechnischen Messungen vorgesehen:

1. Setzungsmessungen mit Horizontalinklinometern in einer Ebene 0,2 m über den Säulenköpfen,
2. Spannungsmessungen mit pneumatischen Erddruckgebern über den Säulenköpfen und über dem dazwischen liegenden Boden,
3. Schwingungsmessungen mit Geophonen in verschiedenen Tiefenlagen unter dem Gleis.

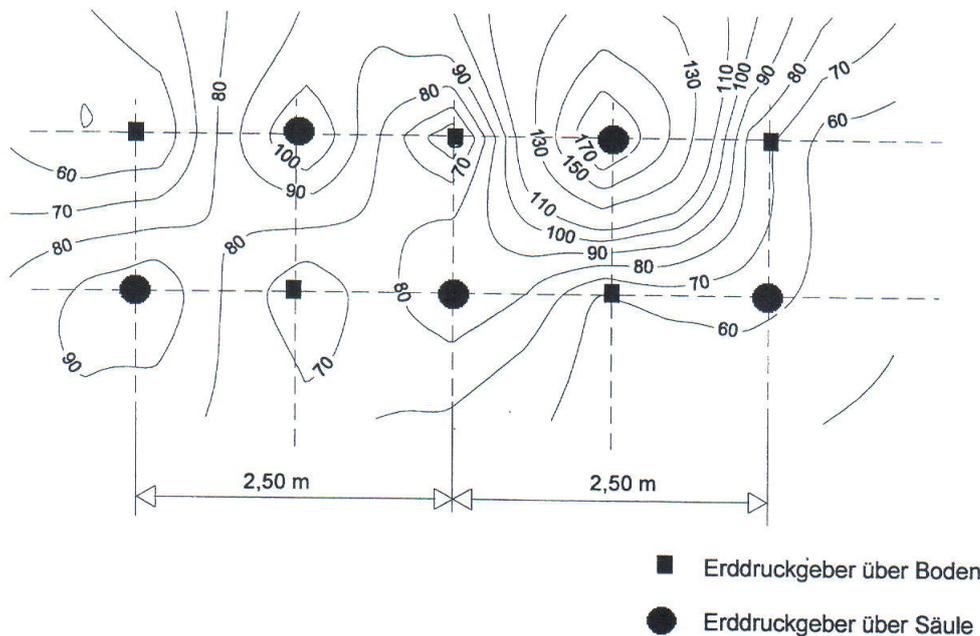
In Bild 5 sind die installierten Meßelemente dargestellt. Exemplarisch ist in Bild 5 das mit dem Horizontalinklinometer H1 aufgenommene Setzungsprofil aufgetragen. Die erste Meßkurve wurde aufgenommen, nachdem das fertiggestellte Bauwerk einer ca. 24-monatigen Liegezeit unterzogen wurde. Meßkurve 2 zeigt das Setzungsprofil nach Abschluß der Hochstastphase, in der Züge des Typs ICE mit Geschwindigkeiten bis 330 km/h die Strecke befahren hatten.



**Bild 5:** Beispiel für einen Meßquerschnitt an der Neubaustrecke Hannover-Berlin

Der Setzungsverlauf in der Ebene über den Säulenköpfen nach Bild 5 entsprach zunächst nicht den Erwartungen, da sich die angenommenen Setzungsmulden (siehe Bild 1) zwischen den starren Tragelementen nicht einstellten. Die annähernd gleichmäßigen Setzungen in der Dammaufstandsebene werden auf die obere Sandschicht zurückgeführt, die auch zwischen den Säulen ein relativ steifes Auflager für den Dammkörper schafft. Diese Annahme wird durch die Spannungsmessungen über den Säulen und über der Weichschicht insofern bestä-

tigt, als auch die Spannungskonzentration über den Tragelementen hinter den Erwartungen zurückblieb. Die Lastumverteilung auf die Säulen muß in Abhängigkeit der Setzungsdifferenzen zwischen Boden und Säulen gesehen werden, da diese für die Mobilisierung von Scherkräfte in der Überschüttung erforderlich sind. In Bild 6 sind die Bodenspannungen in der Dammaufstandsebene nach Abschluß der Hochtastphase ausgewertet.



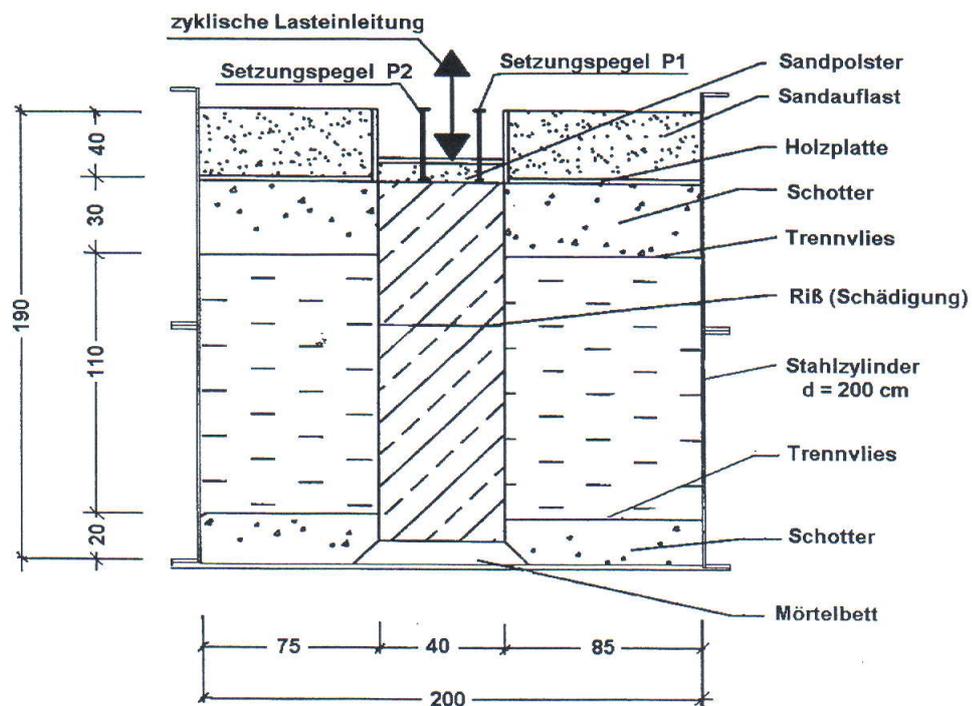
*Bild 6:* Isobaren der gemessenen Erddrücke [ $\text{kN/m}^2$ ] in der Dammaufstandsebene

Die Erschütterungsmessungen dienten der Beurteilung der Einflußtiefe von Eisenbahnverkehrslasten. Aus den Geophonmessungen ging hervor, daß die Energiedissipation i.w. innerhalb des Dammkörpers erfolgt, wobei die Schwinggeschwindigkeiten unterhalb der für Schotteroberbau zu erwartenden Werte liegen (Rehfeld, et.al., 1996).

Insgesamt belegen die bisherigen Messungen, daß durch die Untergrundverbesserung alle gestellten Anforderungen an den Verkehrsweg erfüllt werden und von einem Erfolg der Baumaßnahme ausgegangen werden kann. Zusätzliche Sicherungsmaßnahmen, die beim Überschreiten von bestimmten Verformungsgrößen hätten eingeleitet werden müssen, konnten daher ausbleiben. Die Bahnstrecke wurde Ende 1998 in Betrieb genommen, wobei die geotechnischen Messungen zum Zweck eines Langzeitinspektionsprogramms weitergeführt werden.

Die guten Erfahrungen mit dem Gründungsverfahren an den beschriebenen Streckenabschnitten begünstigten die Entscheidung, das Verfahren an einem weiteren Abschnitt westlich von Berlin anzuwenden. Nach dem Abschluß der Rüttelstopfarbeiten wurden hier die Säulen-

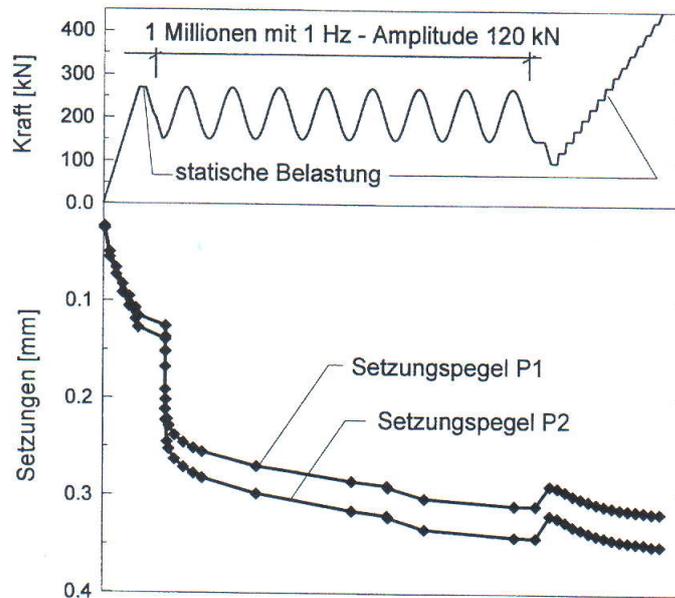
köpfe der im Rechteckraster eingebrachten Betonrüttelsäulen etwa 0,5 m freigelegt, um den oberflächennahen Boden durch eine gut verdichtete mineralische Tragschicht zu ersetzen. Diese Maßnahme sollte eine horizontale Verspannung der Säulenköpfe und damit eine stabile Säulenlage sicherstellen. Nach dem Bodenabtrag stellte sich jedoch heraus, daß ein Großteil der Betonrüttelsäulen zwischen 0,5 und 3 m unterhalb der Säulenoberkante gerissen waren. Die Ursache der Rißbildung ist bisher nicht abschließend geklärt, möglicherweise kommen Frosthebungen oder ein unsachgemäßes Freilegen der Säulenköpfe in Frage. Da in diesem Abschnitt als Oberbau eine Feste Fahrbahn vorgesehen war, wurde zur Untersuchung der Tragfähigkeit eine vorgeschädigte Betonrüttelsäule teilweise aus dem Baugrund entnommen und an der Universität Gh-Kassel in einem Versuchstand eingebaut, der die Gegebenheiten vor Ort etwa im Maßstab 1:1 abbildet. Auf die Säulenoberkante wurde eine statische und zyklische Belastung eingeleitet, die etwa der zu erwartenden Beanspruchung in der Natur entspricht. Über zwei nebeneinander liegende Setzungspegel wurde die Vertikalverformung an der Säulenoberkante aufgezeichnet. Der Versuchstand ist in Bild 7 dargestellt.



*Bild 7:* Modellversuch im Maßstab 1:1 an einer vorgeschädigten Betonrüttelsäule

Die maximalen vertikalen Verformungen der Säule wurden nach Beendigung von 1 Millionen Lastwechseln und anschließender statischer Belastung etwa mit  $s = 0,35$  mm gemessen. Die Vorschädigung an der Betonrüttelsäule weist danach auf das Tragverhalten auch unter zykli-

scher Lasteinwirkung keine wesentliche Verschlechterung auf und die Setzungen am Säulenkopf klingen mit zunehmender Zyklenanzahl ab, siehe Bild 8.



*Bild 8:* Im Modellversuch gemessene Setzungen am Säulenkopf

Durch numerische Berechnungen mit der FEM konnte nachgewiesen werden, daß die vorgesehene dreilagige Bewehrung aus Geogittern den Zwischenraum der Säulen sogar noch im zulässigen Dehnungsbereich überspannen kann, wenn eine Säule rechnerisch vollständig aus dem Raster herausgenommen wird.

Der Streckenabschnitt wurde im Herbst 1998 in Betrieb genommen. Aus begleitenden Meßbeobachtungen geht hervor, daß die Lage des Oberbaus stabil ist und die Verformungen im Untergrund keine sicherheitsrelevanten Größenordnungen erreichen. Eine Horizontalverschiebung der Säulenköpfe muß wegen der im Kopfbereich der Säule angeordneten hochschubfesten mineralischen Schicht nicht befürchtet werden.

## 4.2 Ausbaustrecke Magdeburg-Berlin

Etwa zeitgleich mit der Neubaustrecke Hannover-Berlin sollte die zweigleisige Bahnverbindung von Magdeburg nach Berlin für Zuggeschwindigkeiten bis 160 km/h ausgebaut werden. Westlich von Berlin überquert der 2,5 m hohe Bahndamm organische Bodenschichten (Torf- und Muddeschichten mit Scherfestigkeiten  $c_u \approx 15 \text{ kN/m}^2$ ) in Mächtigkeiten von bis zu 30 m, die in der Vergangenheit zu erheblichen Setzungen am bestehenden Bahnkörper geführt ha-

ben. Im Frühjahr 1994 wurde der Bahndamm zum Streckenausbau teilweise abgetragen und ausgehend von einem geschaffenen Arbeitsplanum sogenannte Duktülpfähle (zementmörtelummantelte Pfähle aus duktilem Gußeisen) in einem Rechteckraster in den Untergrund eingerammt. Die Aufstandsfläche der Pfähle wurde durch rechteckige Kopfplatten aus Stahlbeton vergrößert, die gelenkig auf den Pfahlköpfen mittig auflagern. Der neu aufgebrachte Dammkörper wurde mit einer dreilagigen Geogitterbewehrung ausgeführt und darauf der konstruktive Schotteroberbau hergestellt.

Das zur Überprüfung der Gebrauchs- und Trageigenschaften umgesetzte Meßkonzept an dem Bauwerk beinhaltet u.a. Dehnungsmessungen mit Dehnungsmessstreifen (DMS) an der Geogitterbewehrung. Darüber hinaus wurden die Setzungen in Bewehrungsebene punktuell durch Extensometer aufgenommen. Die Position der hier relevanten Meßapplikationen im Bahndamm ist schematisch in Bild 9 dokumentiert.

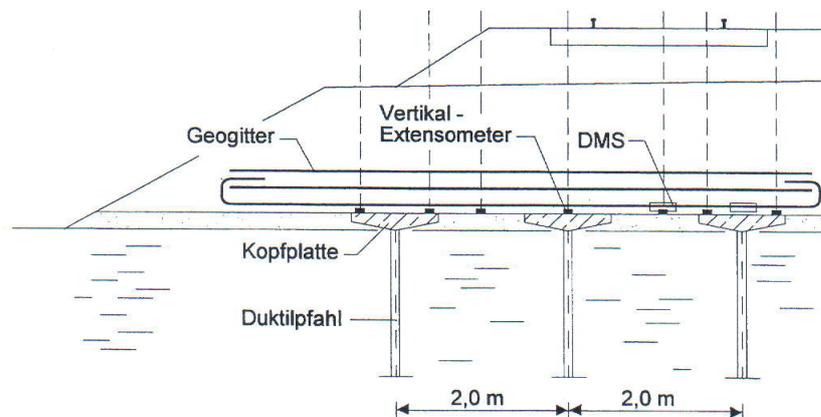


Bild 9: Bahnquerschnitt ABS Magdeburg-Berlin

Aus den seit Mai 1994 durchgeführten Messungen geht hervor, daß der vertikale Durchhang der Bewehrung innerhalb von 2 Jahren Werte von bis zu ca. 40 mm angenommen hat (Gartung, et. al., 1996). Die Kopfplatten über den Duktülpfählen setzten sich im selben Zeitraum um etwa 10 mm. Infolge der gelenkigen Lagerung auf den Duktülpfählen stellten sich die Setzungen aber nicht gleichmäßig über die Kopfplatte ein, vielmehr wurden Verdrehungen gegenüber der Horizontalen festgestellt. Der Vorteil der vergrößerten Aufstandsfläche durch die Kopfplatten (größerer Flächenanteil der tragenden Elemente gegenüber dem weichen Boden und Reduzierung der freien Stützweite der Geogitterbewehrung zwischen den Tragelementen) wird durch diese Verdrehungen nur teilweise wirksam, da an einem Plattenrand zusätzliche Setzungen auftreten.

Bild 10 zeigt in überhöhtem Maßstab die mit Extensometern gemessenen Verformungen in der Dammaufstandsebene.

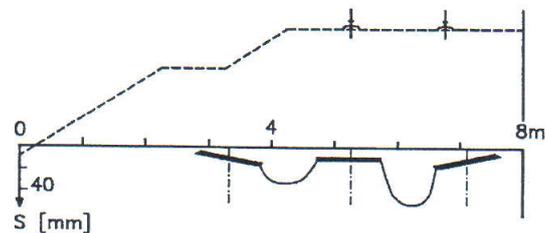


Bild 10: Vertikalverformungen an den Kopfplatten und an der unteren Bewehrungslage (Gartung, et. al., 1996).

Die Gesamtdehnungen in den Geogittern erreichten 6 Monate nach der Fertigstellung einen etwa gleichbleibenden Wert von maximal  $\varepsilon = 1\%$ , der im lichten Zwischenraum zwischen benachbarten Kopfplatten senkrecht zur Streckenrichtung gemessen wurde. In diesem Dehnungsbereich verfügt das eingesetzte Geogitter über eine Dehnsteifigkeit von etwa 1500 kN/m. Bei Zugüberfahrten wurden sehr geringe elastische Dehnungsanteile gemessen, die in der Größenordnung von 0,01 % liegen, siehe Bild 11.

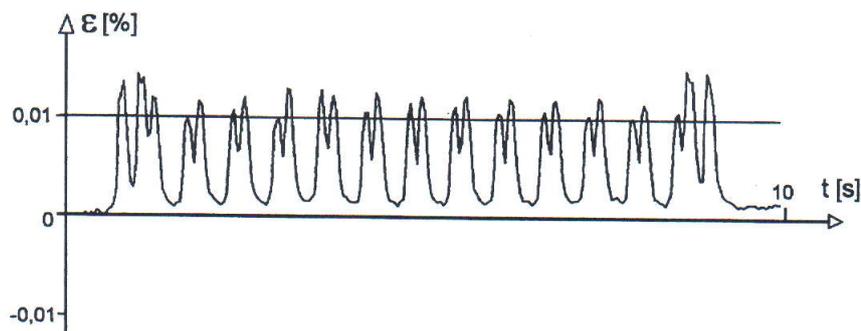


Bild 11: Dynamische Dehnungen rechtwinklig zur Streckenachse im unteren Geogitter bei Zugüberfahrt (Gartung, et. al., 1996).

Die festgestellten Dehnungen sind geringer als bei der Bemessung angenommen, d.h. die Tragfähigkeit der Bewehrung wird bisher nur teilweise ausgenutzt. Da bei den hier eingesetzten Polyester-Geogittern eine zeitliche Entfestigung (Kriechen) in Betracht gezogen werden muß, stellt das hohe Sicherheitsniveau jedoch keine Überdimensionierung dar. Dies gilt insbesondere, weil das Langzeitverhalten der Geokunststoffe unter Eisenbahnverkehrslasten nicht abschließend geklärt ist, wenngleich die dynamischen Beanspruchungen unerwartet gering ausfallen.

### 4.3 Ausbaustrecken der Schienenverkehrsprojekte Deutsche Einheit (VDE)

Im Zuge der Wiedervereinigung sollten zahlreiche Streckenabschnitte, die nun in den Zuständigkeitsbereich der DB AG fielen, saniert bzw. ausgebaut werden. Im Rahmen des daraus initiierten Schienenverkehrsprojektes Deutsche Einheit (VDE) wurde das Gründungsverfahren mit geokunststoffbewehrten Tragschichten über pfahlähnlichen Elementen an zahlreichen Streckenabschnitten ausgeführt. Eine detaillierte Schilderung ist bei *Sondermann & Jebe, 1996* enthalten. In den meisten dieser Ausführungsbeispiele wurde der Untergrund mit teilvermörtelten Stopfsäulen verbessert, über denen der Dammkörper entsprechend Abschnitt 2 als bewehrte Tragschicht ausgeführt worden ist. Da das Rüttelstopfgut über eine Druckluftschleuse in den Untergrund ausgetrieben und dieser seitlich verdrängt wird, wurden Bedenken geäußert, daß in wassergesättigten Böden der Porenwasserdruck stark ansteigen könnte und es zu grundbruchähnlichen Versagenszuständen kommt. Während der Rüttelstopfarbeiten wurden daher stellenweise Porenwasserdruckmessungen unter dem in Betrieb befindlichen Nachbargleis durchgeführt, während die innere Säulenreihe des Ausbaugleises hergestellt wurde. Die Randbedingungen und die Lage der Porenwasserdruckaufnehmer für ein ausgewähltes Beispiel sind in Bild 12 dargestellt.

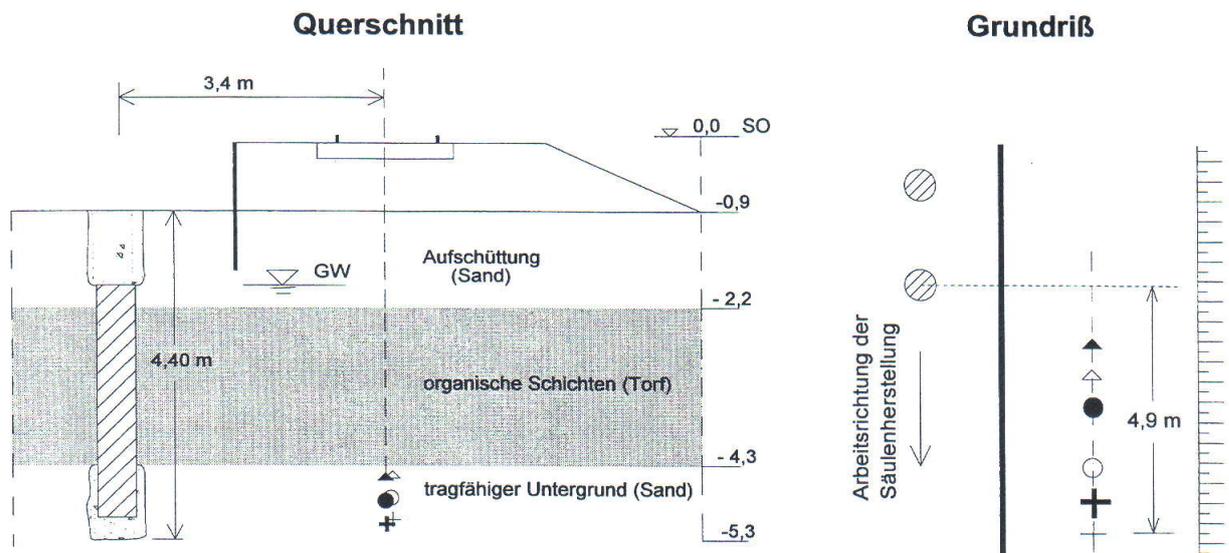


Bild 12: Lage der Porenwasserdruckaufnehmer im Querschnitt (links) sowie im Grundriß (rechts), Ausbaustrecke Hamburg-Berlin, Bereich Friesack-Segelitz, (*Sondermann & Jebe, 1996*)

Die gemessenen Porenwasserüberdrücke nach Bild 13 wurden während der Herstellung der oben eingezeichneten Stopfsäule aufgenommen.

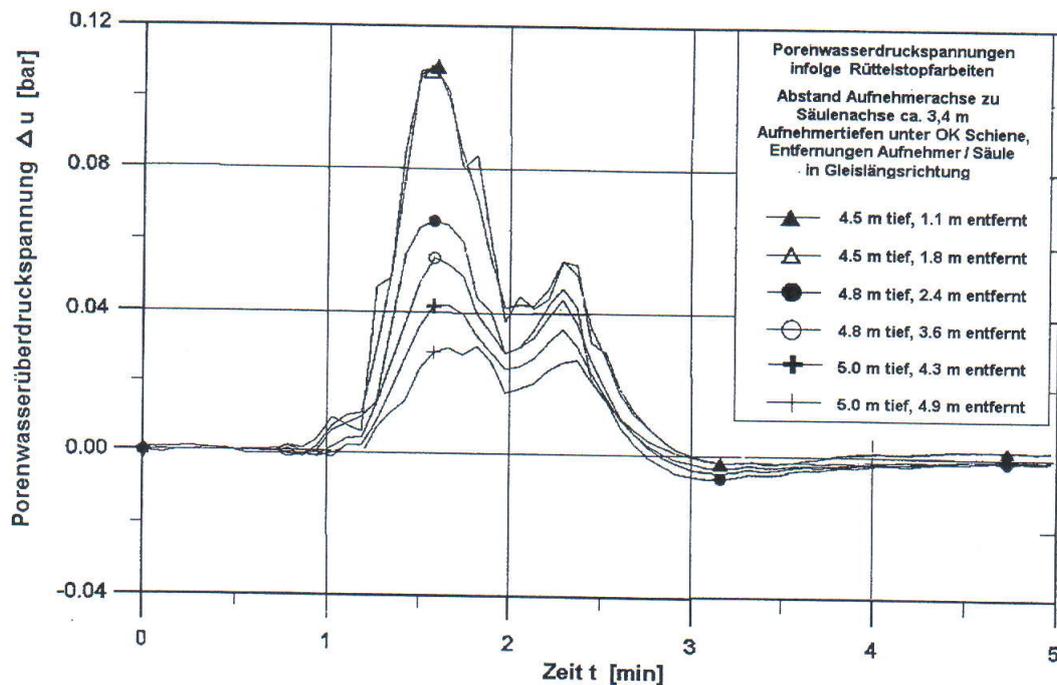


Bild 13: Gemessene Porenwasserüberdrücke infolge Rüttelstopfarbeiten (Sondermann & Jebe, 1996)

Der zusätzliche Porenwasserdruck infolge Rüttelstopfarbeiten liegt im vorliegenden Fall maximal bei etwa 0,1 bar und wird rasch abgebaut. Als kritischer Wert wurde bei dem hier beschriebenen Projekt ein Druck von 0,3 bar (3 m WS) definiert, der sich aus der Forderung ergab, daß der gesamte Porenwasserdruck unter dem Betriebsgleis während der Herstellung der Stopfsäulen einen Wert von 60% der effektiven Spannungen aus Auflast des Dammes nicht überschreiten sollte. Da in der Weichschicht mit einem langsameren Abklingen der Porenwasserüberdrücke gerechnet werden muß, könnte durch eine alternierende Säulenherstellung (jede zweite Säule einer Reihe) eine Überlagerung verringert werden. Dies war im vorliegenden Fall wegen der niedrigen gemessenen Druckspitzen aber nicht erforderlich.

Um Verformungen unter dem Betriebsgleis entgegenzuwirken, die aus der Verdrängung des anstehenden Bodens beim Einstopfen der Säulen entstehen können, hat es sich außerdem als vorteilhaft erwiesen, die Rüttelstopfarbeiten mit der inneren Säulenreihe zu beginnen, so daß beim Herstellen der übrigen Säulenreihen bereits eine gewisse Abschirmung vorhanden ist. Insgesamt führten die durchgeführten Sanierungsmaßnahmen zu einer effektiven Verbesserung der Verformungseigenschaften der Verkehrswege. Weitere Messungen mit Horizontal-

inklinometern in der Ebene der Säulenköpfe und Höhenkontrollen am Fahrweg mit Feinnivellements belegen, daß mit dem Verfahren die hohen Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften von Hochgeschwindigkeitsstrecken erfüllt werden können.

## 5 STAND DER REGELUNGEN IN DEUTSCHLAND

Bisher ist das geschilderte Gründungs- und Sanierungsverfahren in Deutschland noch nicht einheitlich geregelt. Bei den ausgeführten Projekten im Anwendungsbereich der DB AG wurde im Rahmen der Ausschreibung das Verfahren i.d.R. als Sondervorschlag eingereicht und als wirtschaftlichere Alternative zu herkömmlichen Verfahren der Untergrundverbesserung (z.B. Bodenaustausch) umgesetzt. Da es sich um eine neue Bauweise im Sinne der geltenden Vorschriften der DB AG handelt, mußte für jedes Projekt eine Zustimmung im Einzelfall erteilt werden, bzw. liegt zwischenzeitlich auch eine auf zunächst drei Jahre begrenzte allgemeine Zulassung durch das Eisenbahn-Bundesamt, siehe auch *Kempfert (1997)*, vor. In den Bestimmungen der Zulassung wurden dabei technische Anforderungen formuliert, die das Einhalten der Nutzungsanforderungen sicherstellen sollten. In den Bestimmungen wurden dabei auch Maßnahmen zur Überwachung der Gebrauchseigenschaften vorgeschrieben, die meistens mit geotechnischen Messungen am Bauwerk einhergehen. Nachfolgend werden einige wesentliche Bedingungen aufgeführt, nach denen das Gründungsverfahren gemäß den Zustimmungsbescheiden bzw. der Zulassung bisher konstruktiv in Deutschland ausgebildet wurde.

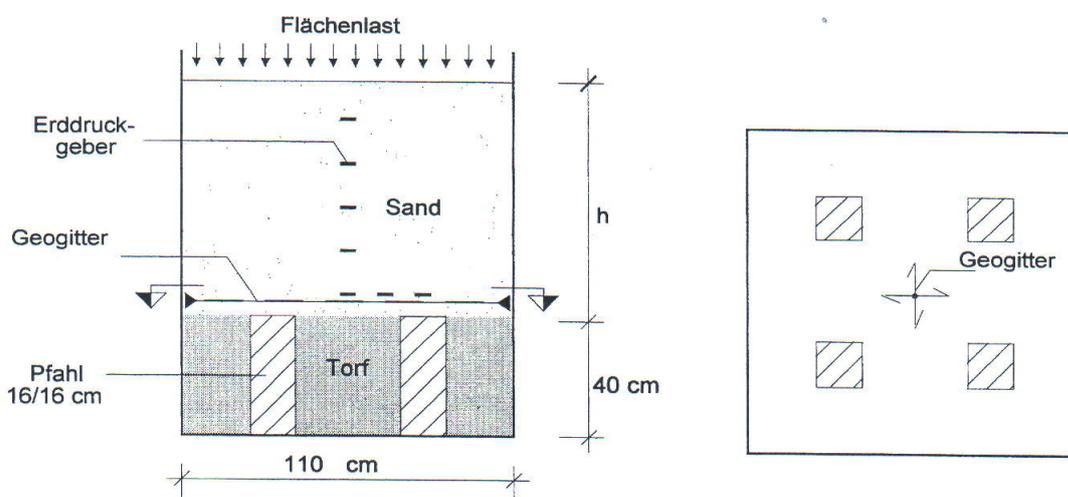
- a) Je Gleis sind mindestens 3 Säulenreihen im Raster anzuordnen, wobei der Achsabstand benachbarter Tragelemente 1,75 m nicht überschreiten sollte.
- b) Die Dehnungen in der Geokunststoffbewehrung sind rechnerisch auf maximal 3% zu begrenzen. Die Bewehrung soll unabhängig von den rechnerischen Erfordernissen Kurzzeitfestigkeiten von mindestens 60 kN/m aufweisen.
- c) An die mineralische Tragschicht im Verlegebereich der Geokunststoffbewehrung werden besondere Anforderungen gestellt. Zur Gewährleistung der Membrantragwirkung sind hier ausgewählte, grobkörnige Bodenarten (Sand/Kiesgemische) vorgeschrieben.
- d) Der Abstand der untersten Bewehrungslage von der Oberkante der Tragelemente darf 1,0 m nicht überschreiten. Bei teilvermörtelten Stopfsäulen bezieht sich dieser Abstand auf die Oberkante des vermörtelten Säulenabschnittes.

- e) Die Dammhöhe muß für die Ausbildung der angenommenen Traggewölbe ausreichend bemessen sein. Bisher soll die Dammhöhe, gemessen von Oberkante pfahlartiges Tragelement bis Oberkante Planum, für Neubaustrecken mindestens 2,0 m und für Ausbaustrecken mindestens 1,5 m betragen.

Weitere Konstruktionsempfehlungen sind bei *Kempfert, et.al., 1997* enthalten.

## 6 AUSBLICK

Obwohl zwischenzeitlich eine Vielzahl von Erfahrungen im Zusammenhang mit der Ausführung vorliegen, fehlt noch ein abgesichertes Bemessungskonzept. Ebenso liegen noch keine ausreichenden Informationen zum Langzeitverhalten des Tragsystems vor. Für eine wissenschaftliche Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens werden an der Universität Gh-Kassel derzeit Modellversuche durchgeführt, bei denen das Gründungssystem in einem dreidimensionalen Modell im Maßstab 1:3 nachgebildet wird. Der in Bild 14 dargestellte Versuchstand besteht aus einem quadratischen Stahlkasten, in dem 4 Betonpfähle in einem Rechteckraster aufgestellt sind. Der Zwischenraum der Pfähle wird mit setzungsempfindlichem Boden (Torf) verfüllt und darüber eine geogitterbewehrte mineralische Tragschicht aus Sand eingebaut. Für verschiedene Tragschichthöhen  $h$  und unterschiedliche Bewehrungsausführungen wird das Trag- und Verformungsverhalten unter einer äußeren Flächenlast experimentell untersucht.



*Bild 14:* Versuchsaufbau zur Untersuchung der Tragwirkung der Konstruktion unter Belastung (Prinzipiskizze)

Aus bisherigen Versuchsergebnissen geht hervor, daß die Anwendung des Bemessungskonzeptes nach Kempfert, et.al. (1997) zu einer auf der sicheren Seite liegenden Dimensionierung der Tragkonstruktion unter statischer Belastung führt. Bei zyklischer Belastung wurde dagegen in einigen Versuchen ein teilweises Nachgeben der Gewölbewirkung in der Tragschicht beobachtet. Offensichtlich verringern dynamische Lasteinflüsse den Grad der Spannungsumlagerung in der Sandüberschüttung, was gleichzeitig zu einer stärkeren Mobilisierung der Membranwirkung aus der Geokunststoffbewehrung führt. Ziel der zur Zeit laufenden experimentellen Untersuchungen ist es, ein zutreffendes Tragmodell abzuleiten, bzw. bestehende Tragmodelle zu erweitern, an denen die wesentlichen Interaktionen der Verbundkonstruktion erfaßt werden können. Dadurch soll die Anwendung dieses Gründungs- und Sanierungsverfahrens, das sich bisher als sehr wirtschaftlich und effektiv erwiesen hat, für die Ausführungspraxis weiter abgesichert werden.

#### LITERATUR:

- British Standard 8006 (1994):* Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and other Fills, Chapter 9.
- Gartung, E.; Verspohl, J.; Alexiew, D.; Bergmair, F. (1996):* Geogrid reinforced railway embankment on piles - monitoring. Proc. 1<sup>st</sup> European Geosynthetics Conference (EUROGeo 1), Maastricht, S. 251-258.
- Kempfert, H.-G.; Stadel, M.; Zaeske, D. (1997):* Berechnung von geokunststoffbewehrten Tragschichten über Pfahlelementen. Bautechnik 75, Heft 12, S. 818-825.
- Kempfert, H.-G. (1997):* Gründungsverfahren für Erdbauwerke: Tragelemente „System Keller“ und geokunststoffbewehrte Tragschicht. Gutachten für das Eisenbahn-Bundesamt (unveröffentlicht).
- Rehfeld, E.; Ehling, B.; Rump, R. (1996):* Wirkungen von Verkehrserschütterungen auf Erdbauwerke und ungebundene Tragschichten im Oberbau., ETR 45, Heft 7/8.
- Sondermann, W. (1995):* Herstellung und Prüfung mittels Schleusenrüttler ausgeführter pfahlartiger Gründungselemente. Pfahlsymposium Braunschweig, Feb. 1995.
- Sondermann, W.; Jebe, W. (1996):* Methoden zur Baugrundverbesserung für den Neu- und Ausbau von Bahnstrecken auf Hochgeschwindigkeitslinien. Vorträge der Baugrundtagung Berlin 1996, Seite 259-279.