

# Erdfallsicherung mit geosynthetischer Bewehrung - praktische Erfahrungen bei der Planung und Ausführung einer Sicherungsmaßnahme in Stuttgart-Kornthal

Hartmut Hangen  
Huesker Synthetic GmbH, Gescher, Deutschland

Jürgen Baumbusch Hangen  
AquaSoil Ingenieure & Geologen GmbH, Westheim, Deutschland

## Zusammenfassung

Der technisch und ökonomisch erfolgreiche Einsatz geosynthetischer Bewehrung zur Teil- oder Vollsicherung von Verkehrswegen gegen Erdenbrüche konnte im Laufe der letzten 15 Jahre vielerorts eindrucksvoll demonstriert werden. Ausreichend hohe Zugfestigkeiten, Dehnsteifigkeiten und Praxistauglichkeit sowie die hohe Duktilität von Geokunststoffbewehrungen sind maßgebliche Gründe hierfür. Im Kontext von Eisenbahninfrastruktur sind jedoch besondere, bisweilen deutlich höhere Anforderungen an Sicherungsmaßnahmen zu stellen und zu erfüllen. Dies betrifft z.B. Fragen zu Restrisiko, Instandhaltung und Wirtschaftlichkeit.

Unter Berücksichtigung vorgenannter Aspekte werden im vorliegenden Beitrag die Erfahrungen bei der Dimensionierung und Ausführung einer Erdfallsicherung im Bahnhofsbereich Stuttgart Kornthal dargestellt und ein Ausblick für zukünftige Aufgabenstellungen diskutiert.

## 1. Einleitung

Die Existenz von Erdfällen und deren Bedeutung für bautechnische Fragestellungen findet in der Öffentlichkeit in aller Regel nur untergeordnete Beachtung. Dies verkehrt sich jedoch ins Gegenteil, wenn Verkehrswege betroffen sind, die öffentliche Sicherheit gefährdet ist und der Verkehr beeinträchtigt ist oder sogar zum Stillstand kommt. So waren Hohlräume, die sich im Juli 2009 im Bahnhofsbereich bei Stuttgart-Kornthal nach heftigen Regenfällen einstellten, Grund für mehrere Monate andauernde Einschränkungen im S-Bahnbetrieb und eine mehrere Wochen andauernde komplette Sperrung der Strecke zwischen Stuttgart-Zuffenhausen und Calw.

Bahnhof Kornthal

### Kaputtes Gleisbett kostet Bahn Millionen

Von Birgit Klein

09. Februar 2010 - 19:05 Uhr



Kornthal

Die S-Bahn-Linie S6 zwischen Kornthal und Zuffenhausen wird sechs Wochen lang gesperrt.  
Stuttgart - Pendler müssen mit erheblichen Behinderungen rechnen. Am 27. Februar wird die S-Bahn-Linie S6 zwischen Kornthal und Zuffenhausen sechs Wochen lang gesperrt - wegen Reparaturen an abgesenkten Gleisen. Das sind die bisher größten Bauarbeiten im laufenden Betrieb des Stuttgarter S-Bahn-Netzes.

Bild 1: Ausschnitte Stuttgarter Nachrichten

## 2. Ursachen und Erscheinungsformen der Erdfälle

Die Entstehung von Hohlräumen im Untergrund kann verschiedene Ursachen haben. Einerseits können diese durch Aktivitäten wie Bergbau, Gas- und Ölförderung oder Grundwasserentnahme und -rückführung verursacht werden.

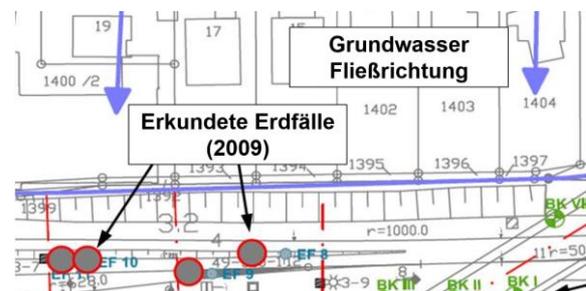


Bild 2: Kartierung von Erdfällen und Grundwasserfließrichtung, S-Bahnstrecke Stuttgart-Kornthal

So wie im vorliegenden Projektbeispiel können andererseits aber auch natürliche Prozesse durch wasserlösliche kreide-, gips- oder salzhaltige Böden zugrunde liegen. Absenkungen an der Oberfläche treten aber erst dann auf, wenn z.B. Verbaue von Abbaustrecken altersbedingt versagen oder erodierte Hohlräume eine

kritische Größe erreichen und überlagernde Bodenschichten keine ausreichende Mächtigkeit oder Festigkeit haben, diese zu überbrücken.

Oft ist das Eintreten von Erdfällen verbunden mit einer Veränderung im Grund- und Oberflächenwasserhaushalt; Lösungsvorgänge und Volumenumlagerungen können dadurch beschleunigt oder erst in Gang gesetzt werden.

Bild 2 zeigt einen Ausschnitt des Lageplanes im betroffenen Schadensbereich der S-Bahn-Strecke bei Korntal und die vorherrschende Fließrichtung des Grundwassers. Der zeitliche Zusammenhang zwischen dem Eintreten von Erdfällen im Gleiskörper und einem Starkregenereignis im Juli 2009 sowie die aufgrund der Einschnittlage beim Bau der Strecke entfernten oder nur noch geringmächtigen gering durchlässigen Deckschichten legen nahe, dass dies auch im vorliegenden Projektbeispiel eine maßgebliche Ursache für die Aktivierung der anstehenden Gipskarste war. Bild 3 zeigt sehr eindrucksvoll, welche Ausmaße Erdenbrüche im Gleiskörper verursachen können. Insgesamt wurden auf dem ca. 600 m langen Streckenabschnitt im Bahnhofsbereich 14 Erdfälle ähnlicher Ausprägung angetroffen.



Bild 3: Hochgebrochener Erdfall im Gleiskörper der S-Bahn-Strecke Stuttgart-Korntal

Die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Erscheinungsbild an der Geländeoberfläche eines Erdfalles hängen von der jeweiligen Ursache und den vorherrschenden Umgebungsbedingungen ab. Typisch sind kreisrunde bzw. ovale Öffnungen oder Spalten.

Bild 4 zeigt die Situation im Bahnhofsbereich von Korntal nach Abtrag des Gleiskörpers und der obersten Bodenschichten: die in Folge der Auslaugungsvorgänge des anstehenden Gipskeupers angetroffenen Erdfälle hatten Durchmesser von 0,3 m bis 1,0 m.

### 3. Sicherungs- und Sanierungskonzept

Die Konzepte zur Sicherung und Überbrückung von Erdfällen können vielfältig sein und reichen von der Verwahrung der Hohlräume durch Injektionen mit verschiedenen Füllern oder Beton bis zur Errichtung von umfangreichen Stahlbetonkonstruktionen. Zudem können Sicherungen so konzipiert werden, dass sie

regulären Verkehr entweder permanent sicherstellen oder alternativ nur für einen kürzeren Zeitraum wirksam sind, sodass dieser kontrolliert unterbrochen werden kann und weitergehende Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen eingeleitet werden können.



Bild 4: Hochgebrochener Erdfall im Gleiskörper der S-Bahn-Strecke Stuttgart-Korntal

Tabelle 1 zeigt beispielhaft einen qualitativen Vergleich verschiedener Varianten, welche größtenteils auch im Zuge der Sicherungsmaßnahmen für die S-Bahnstrecke in Korntal untersucht wurden.

Im konkreten Fall sah eine der möglichen Varianten zur Instandsetzung und Sicherung des Gleiskörpers vor, umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen durchzuführen und die Verwahrung (Injektion) oder Einrichtung eines Überbrückungssystems nur an den Stellen, wo bereits Hohlräume entstanden waren oder mit hoher Wahrscheinlichkeit künftig entstehen könnten durchzuführen. Die Ergebnisse der Vorkundungen zeigten jedoch, dass die Ursachen für das Eindringen von Oberflächenwasser in die Gesteinsschichten vielfältig sind und es daher kaum möglich ist, die eventuell gefährdeten Standorte kosteneffektiv und mit einem akzeptablen Restrisiko für nicht erkundete Gefahrenbereiche zu bestimmen. Aufgrund dieser Tatsache wurde vorgezogen, das Ausmaß der Erkundung zu begrenzen, aber die Länge der Erdfallüberbrückung über den gesamten Gefahrenbereich hinaus auszudehnen. Stahlbetonbauwerke wurden als Überbrückungskonstruktion im Zuge einer Variantenuntersuchung berücksichtigt, jedoch erwies sich ein geokunststoffbewehrter Erdkörper mit zwei Geogitterlagen aus dem Rohstoff Polyethylenterephthalat (PET) als kostengünstiger. Darüber hinaus bieten Erdfallüberbrückungen mit geosynthetischer Bewehrung besonders im Hinblick auf außergewöhnliche Bemessungssituationen, z.B. bei einer Überschreitung des prognostizierten Bemessungsdurchmessers eines Erdfalles, einen hohen Grad an Sicherheit. Dies ist auf die deutlich höhere Duktilität von Geokunststoffen gegenüber z.B. Stahl oder Stahlbeton zurück zu führen.

Abbildung 5 zeigt schematisch die Entstehung und gewählte Vorgehensweise bei der Sicherung.

Da Oberflächenwasser die Entstehung der Erdfälle hervorruft, wurde ferner eine entsprechend dimensionierte Tiefdrainage (TE) beiderseitig des Gleiskörpers

angeordnet. Freigelegte Spalten wurden mit gering durchlässigem Korngemisch KG 1, gem. RiL 836 bzw. DBS 918 062 verfüllt. Siehe hierzu auch Abbildung 6.

Tabelle 1: Konzepte zur Sicherung von Erdfällen

| Sicherungskonzept   | Klassifizierung*           |                             |            |              |      |                | Zuverlässigkeit / Referenzen |
|---|----------------------------|-----------------------------|------------|--------------|------|----------------|------------------------------|
|   | Machbarkeit (technisch)    |                             | Duktilität | Konstruktion |      | Umwelteinfluss |                              |
|   | Hohlraum-durchmesser < 4 m | Hohlraum-durchmesser >= 4 m |            | Kosten       | Zeit |                |                              |
| Engmaschige Erkundung und Verwahrung (Injektion)  | ++                         | o                           | -          | o            | o    | +              | -                            |
| Tiefenverdichtung   | +                          | o                           | -          | o            | -    | o              | -                            |
| Überbrückung mit geosynthetisch bewehrten Gründungspolstern auf vertikalen Traggliedern | +                          | +                           | -          | --           | -    | o              | ++                           |
| Überbrückung mit Stahlbeton   | ++                         | ++                          | -          | --           | -    | o              | ++                           |
| Überbrückung mit geosynthetischer Bewehrung   | ++                         | -                           | +          | +            | +    | +              | ++                           |
| Überbrückung mit Edelstahlgeflecht  | +                          | -                           | -          | -            | o    | +              | -                            |

\* Klassifizierung: ++ sehr gut, + gut, o durchschnittlich, - schlecht, -- sehr schlecht

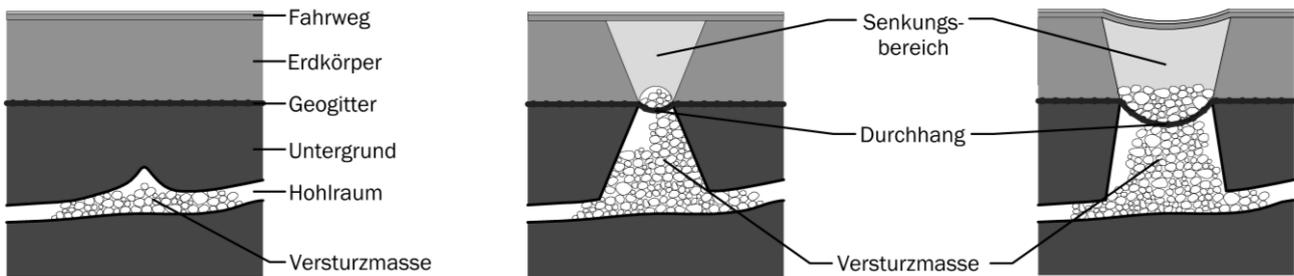


Bild 5: Entstehung und Sicherung eines Erdfalles mit Hilfe einer geosynthetischen Bewehrung (nach Möller et al., 2002 [1])

#### 4. Bemessung der geosynthetischen Bewehrung

Da weder in Deutschland noch auf europäischer Ebene einschlägige Normen vorlagen, wurde für die Bemessung der Geokunststoffbewehrung auf die aktuelle Ausgabe der Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO), der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT), [2], zurückgegriffen. Gemäß Kapitel 11 der EBGEO, werden in Abhängigkeit von den geometrischen und geotechnischen Randbedingungen unterschiedliche Tragwerksmodelle empfohlen. Grundsätzlich unterscheidet man dabei reine Membrantragwirkung, bei der alle Einwirkungen über die Geokunststoffbewehrung abgetragen werden müssen und s.g. Gewölbemodelle, bei denen die Lasten nur teilweise in die Geokunststoffbewehrung eingeleitet werden.

Ein derartiges Tragwerksmodell wurde für die Planung der ersten im deutschen Schienennetz realisierten Erd-

fallsicherung mit geosynthetischer Bewehrung, der NBS Halle/Leipzig im Bahnhofsbereich Knoten Gröbers verwendet. Weitergehende Informationen zur Modellierung, Verifizierung anhand einer realmaßstäblichen Erdfallsimulation sowie praktische Erfahrungen während der Bauausführung dieses Meilensteinprojekts wurden u.a. von Alexiew et al. in den Jahren 2002 und 2003 veröffentlicht, [3] und [4].

Aufgrund der hohen Einwirkungen aus Bahnverkehr, insbesondere dem großen Anteil an dynamischer Einwirkungen, war auch im vorliegenden Fall zu prüfen, ob ein Bodengewölbe unter den lokalen Gegebenheiten dauerhaft gewährleistet werden könnte. Laborversuche der Universität Kassel (Heitz 2006) zum Tragverhalten geokunststoffbewehrter Gründungspolster auf vertikalen Traggliedern, bei dem ebenfalls eine Gewölbewirkung im bewehrten Erdkörper zum Lastabtrag vorausgesetzt wird, zeigten, dass die Bodengewölbestructur nicht beeinträchtigt wird, wenn das Verhältnis  $H/(s-a)$  mehr als 2 beträgt.  $H$  entspricht hierbei der Dicke des bewehrten Erdkörpers,  $s$  entspricht dem Achsabstand zweier vertikaler Tragglieder und  $a$  ist die Breite einer Pfahlkopfplatte. Der Abstand  $(s-a)$  entspricht dabei grob dem Durchmesser eines kreisrunden Hohlraums.

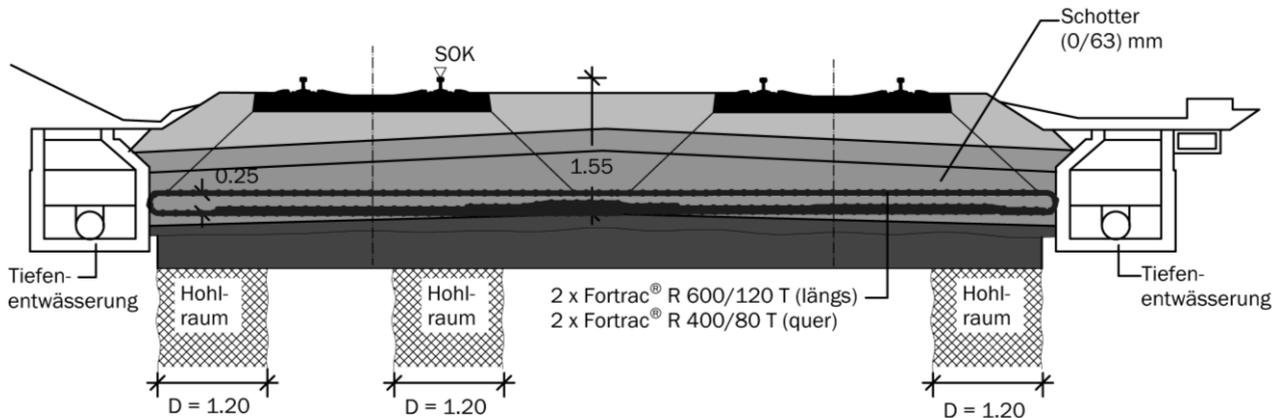


Bild 6: Regelquerschnitt Stuttgart-Korntal

In der EBGEO wird für die Bemessung von Erdfallsicherungen für dieses Verhältnis sogar ein Wert von  $H/D > 3$  empfohlen. Dies bedeutet zum Beispiel, dass eine Überdeckung mit einer Mächtigkeit von 3 m erforderlich wäre, um für den erkundeten maximalen Hohlraumdurchmesser von 1 m eine Gewölbetragswirkung dauerhaft sicherzustellen. Da sich ein Bodenaushub in dieser Dicke wesentlich auf die Bauzeit auswirkt und dies zu unverhältnismäßigen Einschränkungen des Bahnbetriebs geführt hätte, entschied man sich letztlich, die Bemessung ausschließlich auf Grundlage eines Membranmodells durchzuführen. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse, welche eine Ausdehnung des bewehrten Erdkörpers für eine seitliche Verankerung nicht ermöglichten, war es erforderlich, innerhalb eines Berechnungsquerschnittes zwei unterschiedliche Membranmodelle zu untersuchen: im zentralen Bereich des Bemessungsquerschnittes wurde ein biaxialer Lastabtrag vorausgesetzt und gemäß EBGEO mit dem s.g. B.G.E.-Verfahren nachgewiesen. Für potentielle Erdfälle im Randbereich wurde hingegen die R.A.F.A.E.L.-Methode verwendet, welche einen Lastabtrag ausschließlich in einer Richtung, hier die Längsrichtung der Trasse, zugrunde legt, siehe auch Bild 6.

Eine detaillierte Beschreibung der oben genannten Berechnungsmodelle findet sich in EBGEO, sodass an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen wird. In Tabelle 2 sind wesentliche Kennwerte der gewählten Sanierungsvariante zusammengestellt.

## 5. Konstruktive Besonderheiten

Neben dem geosynthetisch bewehrten Erdkörper wurde in Korntal ein interessanter Sondervorschlag des Planers AQUASOIL INGENIEURE & GEOLOGEN GmbH zur bauzeitlichen Sicherung der Oberleitungs- und Signalmasten umgesetzt. Um eine zeit- und kostenintensive Neugründung und -installation zu vermeiden, kam eine Konstruktion zur Ausführung, bei der die bestehenden Fundamente vor Freilegung des Gipskeupers mit Hilfe von Mikropfählen und Injektionsbohrungen gesichert wurden und somit an ihren Standorten

verbleiben konnten. Abbildung 7 zeigt ein Foto der Anordnung mithilfe von Stahlprofilen als Querträger und drei Verankerungen.

Tabelle 2: Eckdaten der Erdfallsicherung

| Baumaßnahme                | Stuttgart Korntal                        |
|----------------------------|--|
| Streckenlänge              | 600 m                                    |
| Entwurfsgeschwindigkeit vE | 120 km/h                                 |
| Ursache für Erdfall        | Karst Erosion                            |
| Bemessungsdurchmesser      | 1,2 m                                    |
| gepl. Beanspruchungsdauer  | 120 Jahre                                |
| Geogitterbewehrung         | R 400/80 T (quer)<br>R 600/120 T (längs) |
| Polymer                    | Polyester (PET)                          |
| Kurzzeitfestigkeit in MD   | 400 kN/m<br>600 kN/m                     |
| Bruchdehnung in MD         | ~ 9,5%                                   |
| Schütthöhe über GG*        | 1,55 m                                   |
| Dammbaumaterial            | Breckkorn (0/63) mm                      |
| Bemessungskonzept          | (R.A.F.A.E.L. / B.G.E.)                  |
| Baujahr                    | 2010                                     |

\*) Abstand zwischen unterstem Geogitter und Schienoberkante – (SOK)



Bild 7: Bauzeitliche Sicherung eines Mastfundaments

## 6. Bauausführung

### 6.1 Ausrollen und Spannen der Geogitterbewehrung

Bei der Bemessung von Erdfallsicherungen mit geosynthetischer Bewehrung spielt die Dehnsteifigkeit der Bewehrungsmaterialien eine elementare Rolle, um die Gebrauchstauglichkeit des Systems zu beeinflussen. Um sicherzustellen, dass die bei der Standsicherheitsberechnung vorausgesetzten Festigkeitseigenschaften jedoch auch in die Praxis umgesetzt werden können, die Bewehrung also unmittelbar nach Auftreten eines Erdfalls aktiviert werden kann, ist bei der Bauausführung mit besonderer Sorgfalt vorzugehen. Neben der Erstellung eines Verlegeplans mit eindeutiger Bezeichnung der Geogitterbahnen wurde dem Auftragnehmer (Fa. Spitzke) daher zu Baubeginn eine auf die lokalen Bedingungen angepasste Verfahrensanweisung abverlangt. Insbesondere in Bereichen mit Durchdringungen oder Einsprünge im Regelprofil, z.B. bei Maststandorten oder Schächten war dies von großer Bedeutung. Um die vorgeschlagene Verfahrensweise im Einvernehmen zwischen Auftragnehmer und Auftraggeber zu verabschieden, wurden die Baubehelfe zur Ausführung des Rückumschlages und das Anspannen des Geogitters zur Sicherung einer faltenfreien Verlegung vorab im Bau-feld ausprobiert und optimiert, siehe hierzu auch Abbildung 8.



Bild 8: Anspannen und Fixieren eines Geogitterrückumschlages

### 6.2 Überprüfung der Einbaubeschädigung

Als Teil der Nebenbedingungen für Zustimmungen im Einzelfall, ZiE, aber auch der durch die DBAG erteilten Herstellerbezogenen Produktqualifikation (HPQ), [5], sind üblicherweise Feldversuche zur Untersuchung der Einbaubeschädigung der Geokunststoffbewehrung durchzuführen. In der Praxis ist es sinnvoll, diese Vorabversuche mit einer Verifizierung der Arbeitsanweisung für die Verdichtung zu kombinieren. Dies gilt umso mehr, wenn besonders dünne Schüttlagen herzustellen sind und Bauverkehr bereits bei minimalen Überschüttungshöhen erforderlich ist. Abbildung 9 zeigt die Durchführung des Einbaubeschädigungsversuches in Korntal, wo auf diese

Weise vorgegangen wurde. Für beide eingesetzten Geogittertypen ergaben die Einbaubeschädigungsversuche Festigkeitsverluste im Kontakt mit scharfkantigem Schottermaterial von maximal 15%.

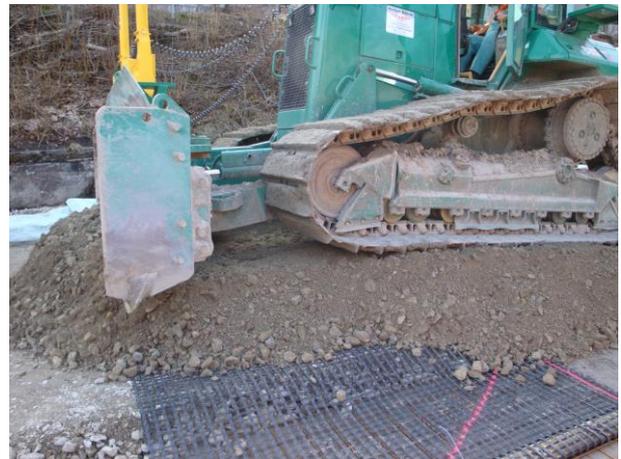


Abb. 9: Feldversuch zur Bestimmung der Einbaubeschädigung

## 7. Fazit

Durch Erdfälle verursachte Schäden an Verkehrswegen können gravierende Behinderungen im privaten und öffentlichen Verkehr verursachen. Im Bahnhofsbereich von Stuttgart-Korntal führten durch Karsterosion verursachte Erdfälle zu einer mehrmonatigen Betriebsstörung und einer mehrwöchigen Vollsperrung.

Das vorgestellte Referenzprojekt Stuttgart-Korntal zeigt, dass Erdfallsicherungen mit Geokunststoffen bei moderaten Bemessungsdurchmessern gleisnah mit einem Abstand von nur 1,60 m zwischen der Bewehrungsebene und Schienenoberkante ausgeführt werden können. Mithilfe von Geokunststoffbewehrungen stehen für vergleichbare Randbedingungen somit sowohl technisch als auch wirtschaftlich vorteilhafte Lösungen für die Überbrückung von Hohlräumen - auch für Schienenverkehrswege - zur Verfügung. Ausreichend hohe Zugfestigkeiten, Dehnsteifigkeiten sowie die hohe Duktilität von Geokunststoffbewehrungen sind maßgebliche technische Parameter, um den hohen Anforderungen des Eisenbahnverkehrs an die Gebrauchstauglichkeit gerecht zu werden. Aufgrund der verhältnismäßig kleinen Erdfalldurchmesser war es in Korntal möglich, Geokunststoffbewehrungen aus Polyester einzusetzen, in der Regel ist es aber erforderlich, für die Herstellung der Geokunststoffbewehrung besonders hochwertige Werkstoffe wie Aramid und Polyvinylalkohol zu wählen.

Im Vergleich zu konventionellen Bauweisen können diese Erdfallsicherungen mit Geokunststoffen als technisch gleichwertige Alternative angesehen werden, häufig stellen sie auch die kostengünstigste Variante dar.

## Literaturverzeichnis

- [1] Möller B., Graf W., Hoffmann A. (2002). Berechnungsmodelle für Geotextilien bei Erdfall. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik, TU Darmstadt, Heft 58.
- [2] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Arbeitskreis 5.2 (2010): "Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen" (EBGEO), Ernst und Sohn.
- [3] Alexiew, D., Elsing, A., Ast, W. (2002). FEM-Analysis and Dimensioning of a Sinkhole Overbridging System for High-Speed Trains at Gröbers in Germany, Proc. 7th Int. Conf. on Geosynthetics, pp. 1167-1172.
- [4] Alexiew D., Ast, W., Elsing, A., Hangen, H., Sobolewski, J., (2003). Erdfallüberbrückungssystem Eisenbahnknoten Gröbers - zur Bemessung, Ausführungsplanung und Bauausführung. Sonderheft aus: 8. Informations- und Vortragstagung über Kunststoffe in der Geotechnik. München, Februar 2003 Selbstverlag 2003, pp. 235-248.
- [5] DB Netz AG (2015) : TM 4-2015-10838 I.NPF 2 zu Ril 836, Einführung des DBS 918039 Geokunststoffe.