

Sicherungsmaßnahmen und Konzepte zur Überbrückung potentieller Erdeinbrüche

Dr.-Ing. Michael Clostermann

Clostermann Consulting GmbH & Co. KG

Dipl.-Ing. Oliver Detert, HUESKER Synthetic GmbH

HUESKER Synthetic GmbH

ZUSAMMENFASSUNG

Der Ausbau des Straßennetzes sowie die Nutzung von Flächen in Bereichen des zum größten Teil eingestellten, untertägigem Bergbaus erfordern vielfach Sicherungsmaßnahmen. Der Einbruch oberflächennaher, stillgelegter Stollen oder Schächte führt zu Tagebrüchen oder Versätzen. Diese können fatale Folgen haben, insbesondere wenn sie im Bereich von hochfrequentierten Verkehrsflächen, wie zum Beispiel Autobahnen, auftreten. Die Sicherung solcher Bereiche kann vielfältig erfolgen. Der vorliegende Beitrag wird unterschiedliche Konzepte beschreiben und miteinander vergleichen. Im Anschluss erfolgt eine detaillierte Beschreibung, wie Erdfälle und Schächte mit Bewehrungslagen aus Geokunststoffen gesichert werden können, sowie verfügbarer Messtechnik zur frühzeitigen Erkennung von eintretenden Erdfällen.

1 Einleitung

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. Andererseits können auch natürliche Prozesse durch lösliches kreide-, gips- oder salzhaltiges Gebirge der Grund sein. Absenkungen an der Oberfläche treten 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 mehr haben diese zu überbrücken.

Unter Altbergbau werden alle bergmännisch hergestellten Hohlräume einschließlich aller Bohrungen, Tagebaue und Restlöcher verstanden, die nicht mehr genutzt werden. Zum einen ist da der tages- und oberflächennahe Bergbau, wo die Flöze zutage treten. „Tagesnaher“ Abbau bedeutet eine Teufe von weniger als 30 m unterhalb der Tagesoberfläche. Aufgrund der fehlenden technischen Möglichkeiten war der Abbau der Steinkohle teilweise nur durch tagesnahe einfachste Grabungen oder durch schachtartige Grubenbaue, sog. Pingen, möglich. Für den "oberflächennahen" Abbau (Teufe 30 m bis 100 m) wurde die Lagerstätte über seigere oder tonnlägige Schächte erschlossen. Während in diesem sogenannten "Tiefenbergbau" (Teufe größer 100 m) die Abbaueinwirkungen an der Tagesoberfläche in einem begrenzten Zeitraum von einigen wenigen Jahren beendet sind, bleiben die unverfüllten Grubenbaue in Bereichen des tages- und oberflächennahen Abbaus auf Grund des fehlenden bzw.

geringen Gebirgsdruckes lange Zeit offen. Dadurch besteht für die Tagesoberfläche und die hier geschaffenen baulichen Einrichtungen wie z.B. Straßen ein sehr lang anhaltendes bis zeitlich unbefristetes Gefährdungspotential. Wird die Standfestigkeit der Grubenbaue z. B. durch Verwitterung oder äußere Einflüsse wie Grubenwasserzuflüsse, Erschütterungen, bauliche Eingriffe an der Tagesoberfläche usw. verringert, kann es zu Tagesbrüchen in Form von Erdstufen, Mulden bis hin zu Kratern kommen. Hinzu kommt eine Vielzahl an Tagesöffnungen, also Schächte oder Stollen, die bis an die Tagesoberfläche reichen. Die Schächte sind in der Vergangenheit in der Regel teil- oder vollverfüllt und/ oder mit einer Betonplatte abgedeckt worden. Bei einem Nach- bzw. Absacken des Verfüllgutes und dem Einstürzen der Tagesöffnung ist mit Absenkungen und/ oder Einbrüchen der Tagesoberfläche zu rechnen. Auch die Betonplatten sind in der Regel nicht für die immer weiter wachsenden Belastungen der heutigen Verkehrsflächen ausgelegt.

Die Hinterlassenschaften des Bergbaus in Form von Tagesöffnungen oder (zum Teil tages-/ oberflächennahen) Hohlräumen sind bundesweit anzutreffen. Allein in NRW sind bis heute knapp 30.000 Tagesöffnungen bekannt. Durch die Auswertung weiterer Unterlagen erhöht sich die Zahl ständig, so dass von bis zu 70.000 verlassenen Tagesöffnungen ausgegangen werden kann [1]. Die Tagesbruchgefahr wird sich durch Einstellung der Wasserhaltung und einem damit verbundenen Grubenwasseranstieg deutlich vergrößern, da es dadurch verstärkt zu Ausspülungen, Umlagerungen und Reduzierung der effektiven Spannungen der Lockermassen in den altbergbaulichen Hinterlassenschaften kommen kann.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Erscheinungsbild eines Erdfalles an der Geländeoberfläche hängen maßgeblich von den vorherrschenden Umgebungsbedingungen ab. Typisch und bekannt sind kreisrunde bzw. ovale Öffnungen oder Spalten. Der Durchmesser und die Ausbildung eines Trichters werden dabei durch die Beschaffenheit der oberflächennahen Bodenschichten geprägt (siehe Abb. 1).

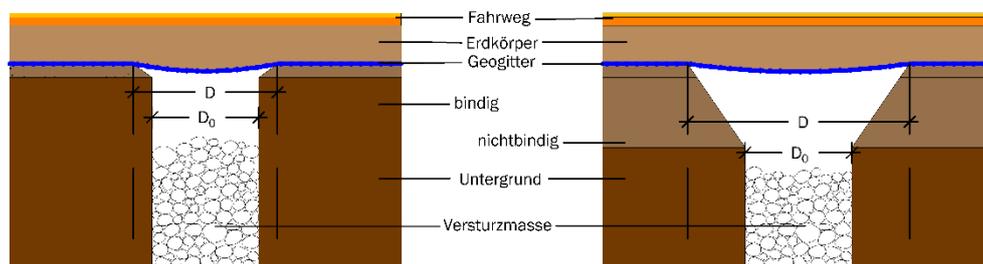


Abb.1 : Trichterbildung in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Oberbodens, links bindiger Boden, rechts nicht bindiger Boden, nach EBGEO 2010, [2]

Schachtverbrüche (schlagartiges Abgehen von Verfüllmassen in Schächten, siehe z.B. [3]) sind aus technischer Sicht insofern günstiger und besser beherrschbar, da sich Form und Durchmesser des Trichters als maßgebende Parameter bei der Berechnung und Bemessung einer Überbrückung mit hoher Genauigkeit bestimmen lassen [2].

2 Sicherungsmaßnahmen

Bei den Sicherungsmaßnahmen kann zwischen tiefgreifenden und oberflächennahen Lösungen unterschieden werden. Zu den tiefgreifenden Lösungen zählt die teilweise oder komplette Verfüllung von Hohlräumen bzw. Erdfällen. Die Kosten sind hierbei zunächst schwer abzuschätzen, da nur durch eine detaillierte Erkundung die Anzahl und Größe der Hohlräume und somit potentielle Erdfälle abgeschätzt werden können. Ein gewisses Restrisiko verbleibt, da aus Kosten- und Zeitgründen keine 100% Erkundung durchgeführt werden kann bzw. nicht alle Gefahrenstellen zuverlässig erkannt

werden. Kommt es zu einer Absackung oder Rutschung des Füllmaterials, so geschieht dies spontan und ohne Vorankündigung.

Zu den oberflächennahen Lösungen zählen Stahlbetonplatten und Geokunststoffbewehrungen. Eine detaillierte Erkundung ist hierbei nicht notwendig, da auf „Verdacht“ der gesamte Gefährdungsbereich temporär gesichert wird. Kommt es zu lokalen Erdrutschen, so können diese gezielt verfüllt werden. Während eine Stahlbetonplatte die Überbrückung eines Erdfalls bis zu einer gewissen Größe verformungsfrei überbrückt und dann spontan versagt, kündigt sich das Versagen der Sicherung mittels einer Geokunststoffbewehrung anhand zunehmender Verformungen an. Es verbleibt Zeit zum Ergreifen von Gegenmaßnahmen, wie zum Beispiel die Sperrung des Verkehrsweges.

Grundsätzlich gilt, dass Erdrutschüberbrückungen mit geosynthetischer Bewehrung besonders im Hinblick auf außergewöhnliche Bemessungssituationen, z.B. bei einer Überschreitung des prognostizierten Bemessungsdurchmessers eines Erdalles, einen hohen Grad an Sicherheit bieten. Dies ist auf die deutlich höhere Duktilität von Geokunststoffen gegenüber z.B. Stahl oder Stahlbeton zurückzuführen.

Im Weiteren wird ausschließlich auf die Sicherung mit Geokunststoffen eingegangen.

3 Bemessung einer Erdrutschsicherung mit geosynthetischer Bewehrung

Geokunststoffbewehrungen können zur Teil- oder Vollsicherung von Verkehrswegen gegenüber Erdrutschen verwendet werden. Ausreichend hohe Zugfestigkeiten, Dehnsteifigkeiten sowie die hohe Duktilität von Geokunststoffbewehrungen sind diesbezüglich die maßgeblichen technischen Parameter.

Da weder in Deutschland noch auf europäischer Ebene einschlägige Normen vorliegen, wird für die Planung und Bemessung von geosynthetisch bewehrten Erdkörpern in Deutschland auf die 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 geometrischen und geotechnischen Randbedingungen unterschiedliche Tragwerksmodelle empfohlen. Grundsätzlich wird unterschieden in reine Membrantragwirkungen, bei der alle Einwirkungen über die Geokunststoffbewehrung abgetragen werden müssen und sog. Gewölbemodellen, [4] und [5].

In der EBGEO wird das Thema Erdrutschsicherung mit Geokunststoffen ausführlich behandelt. Es stehen u.a. je nach Geometrie, Bodenarten, Überdeckungsdicke etc. mehrere Berechnungsverfahren und Bewehrungskonstellationen zur Verfügung, so dass alle praktisch relevanten Fälle gelöst werden können. Maßgebend bei den Berechnungen ist die akzeptable Einsenkung auf OK System - also GZ 2 bzw. SLS - die vor allem durch eine höhere Dehnsteifigkeit der Bewehrung auf den erforderlichen Grenzwert reduzieren werden kann. Weiterhin wird der GZ1-Nachweis (ULS) geführt, um einen Bruch der Bewehrung während der Gebrauchsdauer des Systems auszuschließen.

Bei Verkehrsbauwerken ist der akzeptable Grenzwert der Absenkung von der Art (Straße, Schiene), Geschwindigkeit und Kategorie (Parkplatz, Bundesstraße, Autobahn) abhängig, und auch davon, ob es sich um eine Vollsicherung oder eine Teilsicherung handelt. Bei einer Vollsicherung wird der Verkehrsweg ohne zusätzliche Maßnahmen bis zum Ende der geplanten Gebrauchsdauer betrieben; die Anforderungen sind dementsprechend strenger. Bei einer Teilsicherung ist der weitere Betrieb zeitlich begrenzt (z.B. eine Stunde oder ein Monat) und meistens mit einer

Geschwindigkeitsreduzierung verbunden. In der EBGEO gibt es Empfehlungen zu den akzeptablen, relativen Einsenkungen (d.h. Einsenkung/Muldendurchmesser).

Kritisch anzumerken ist an dieser Stelle die extreme Abhängigkeit der Berechnungsergebnisse vom Eingangsparameter „erwarteter Erdfalldurchmesser“ und der zulässigen Einsenkungen. Bereits geringe Änderungen im Durchmesser des Erdfalls oder zulässiger Einsenkung führen zu großen Abweichungen in der benötigten Bewehrungsdehnsteifigkeit und –zugfestigkeit. Bei beiden Parametern ist eine zuverlässige Vorhersage jedoch nicht möglich. Eine nahe Abstimmung mit dem Bauherrn und Bodengutachtern ist hierbei anzustreben. Bei Schachtüberdeckungen stellt sich zumindest dieses Problem nur selten.

Die EBGEO-Berechnungsverfahren gehen vorwiegend von einem nicht bindigen Überdeckungsboden aus ("Reibungsboden"). Böden mit dauerhafter Kohäsion (z.B. nach Verfestigung) werden insoweit berücksichtigt, dass man auf anderswo publizierte, plausible und erfolgreich angewendete Verfahren verweist [4].

Abb. 2 gibt eine Übersicht über die Berechnungsmodelle und Bewehrungskonstellationen.

Benennung des Tragwerksmodells	Form des Einbruchkörpers	Benennung des Verfahrens, Literaturbezeichnung	Merkmale des Verfahrens			Tragwerksmodell gem. Bild 11-7	Lastabtragungsmodell		
			mit Gewölbewirkung	mit Seitenreaktion	mit Auflockerung		Biaxial	biaxial	Einaxial
Einbruchmodell	Kegelstumpf	BS 8006	nein	nein	nein	1a			
		B.G.E.	ja	ja	ja	1a / 1b			
	Zylinder	GIROUD	nein	möglich	nein	1a / 1b			
		R.A.F.A.E.L.	nein	ja	ja	1b			
Gewölbe- modell	Kugelkalotte	A.S.T.	ja	nein	nein	2b			
		BGE	Ja	Nein	Ja	2a			
Berechnungsverfahren									

Abb.2 : Physikalische Merkmale, Berechnungsverfahren und Bewehrungskonstellationen (EBGEO 2010,[2])

Die Zugkräfte in der Bewehrung, die den Leerraum durch Membrantragwirkung überbrückt, sind beträchtlich. Diese werden seitlich durch Weiterführung der Bewehrung in einen Verankerungsbereich abgeleitet. Weil die Auflast durch die Bodenüberdeckung im Verankerungsbereich oft gering ist, ergeben sich Verankerungslängen von mehreren Metern. Bei den typisch linearen Verkehrserdbauwerken ist das meist kein Problem. Bei der fokussierten Überdeckung eines Schachts bemüht man sich aber um einen flächenminimierten Eingriff; große Verankerungslängen sind ungünstig. Lösungen sind hier unter anderem durch betonierte Ringbalken zu finden, in die alkalibeständige Geokunststoffbewehrungen (z.B. aus dem Rohstoff Polyvinylalkohol - PVA) einbetoniert werden können (Abb. 3).

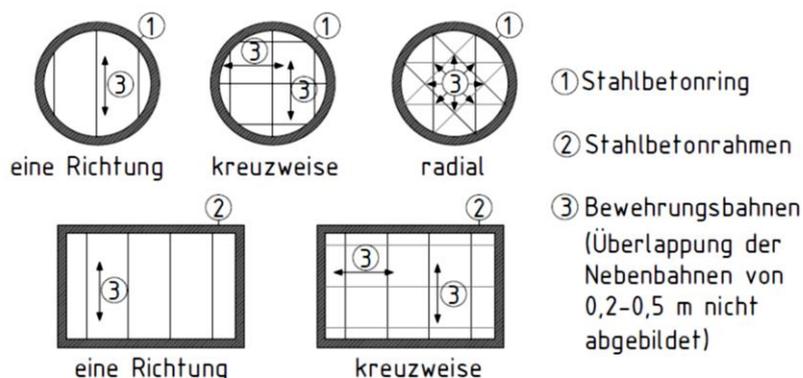


Abb.3 : Mögliche Lösungen mit Geokunststoffbewehrungen bei Schacht-überdeckungen mit Verankerungsring oder -rahmen [1]

4 Bauverfahren

Die Verlegung der Geogitter reiht sich in den qualifizierten Erdbau des Straßenbaus ein. Nach Herstellung des Planums werden die Geogitter verlegt. Hierbei ist eine ebene und stramme Verlegung der Geogitter enorm wichtig. So ist die unmittelbare Aktivierung der Bewehrung gesichert. Die beste hochmodulige Bewehrung wird mit Verspätung anspringen, falls sie nicht präzise verlegt wurde.

Um eine bestmögliche Verlegung der hochzugfesten Geogitter zu ermöglichen, ist die Anfertigung von Verlegeplänen sowie die Verwendung von Verlegehilfen, die es erlauben eine konstruktive Vorspannung aufzubringen, zu empfehlen. Die in Abbildung 4 links gezeigte Verlegehilfe erlaubt es die Geogitterrollen vom Lagerplatz aufzunehmen, zum Einbauort zu transportieren und anschließend mit einer kontrollierten Vorspannung zu verlegen. Dabei werden die Geogitter zu Beginn 10 bis 30 Meter abgerollt und mittels einem Schütthaufen ballastiert. Anschließend wird mittels der Verlegehilfe eine vorgegebene Vorspannung auf das Geogitter aufgebracht und unmittelbar vor der Verlegehilfe erneut ballastiert, sodass die Vorspannung im Geogitter verbleibt. Im nächsten Schritt werden die nächsten 10-30 Meter Geogitter abgerollt, gespannt und ballastiert. So ist eine faltenfreie Verlegung der Bewehrungselemente gewährleistet (Abb. 4 rechts).



Abb.4 : Vorrichtung und Technik zur strammen Verlegung von Geobewehrungen, korrekt verlegtes Geogitter (von links nach rechts)

5 Messtechnik

Um Erdfälle frühzeitig zu erkennen und gegebenenfalls automatische Warnsysteme damit zu koppeln, wurden unterschiedliche Messtechniken entwickelt.

Vlies-Signal-Draht-Matrix und Horizontal-Extensometer

Im Zuge des Ausbaues des Eisenbahnknotenpunktes Gröbers [4,5] entwickelte die Firma Glözl ein flächendeckendes Überwachungssystem zur frühzeitigen Erkennung von Erdfällen [6]. Das Überwachungssystem besteht aus einem redundanten System aus Vlies-Signal-Draht-Matrix und Horizontal-Extensometern, die unterhalb der Geogitter eingebaut wurden.

Die Vlies-Signal-Draht-Matrix besteht aus einem Doppel-Vlies als Trägermaterial. Auf den Innenseiten der Vliese sind Widerstandsdrähte in einem Abstand von 25 cm eingewebt. Durch den kreuzweisen Einbau der Vliese entsteht eine Auflösung des Messrasters von 0,5 x 0,5 m, wodurch die Erfassung der Lage und Größe der gestörten Fläche ausreichend genau möglich ist. Das Messprinzip beruht auf der Erfassung von Widerstandsänderungen, die durch Bruch oder Dehnung hervorgerufen werden.

Horizontal-Extensometer: System 1

Die Horizontal-Extensometer als redundantes Überwachungssystem beim Projekt Gröbers wurden in einem Abstand von 1-1,2 m in Trassenquerrichtung verlegt und an den Enden außerhalb des Gefahrenbereichs mittels Anker fixiert. Die Erfassung der Messwerte erfolgt mittels Wegaufnehmer. Eine exakte Lokalisierung des Erdfalls ist bei einer einlagigen Anordnung der Horizontal-Extensometer nicht möglich.

Horizontal-Extensometer: System 2

Im Zuge des Baues der A1 in Polen wurde ein ähnliches System zu den Horizontal-Extensometern verwendet. In diesem Projekt wurden Zugelemente kreuzweise zueinander verlegt [7]. Die Dehnung der Elemente wurde über Sensoren mit Schwingseiten ermittelt. Über den Abstand der Zugelemente zueinander kann die Erkundungsaufösung gesteuert werden. Bild 5 zeigt exemplarisch die Verlegung der Zugelemente, exemplarische Messwerte und die daraus resultierende Ortung des Erdfalls in Größe und „Tiefe“.

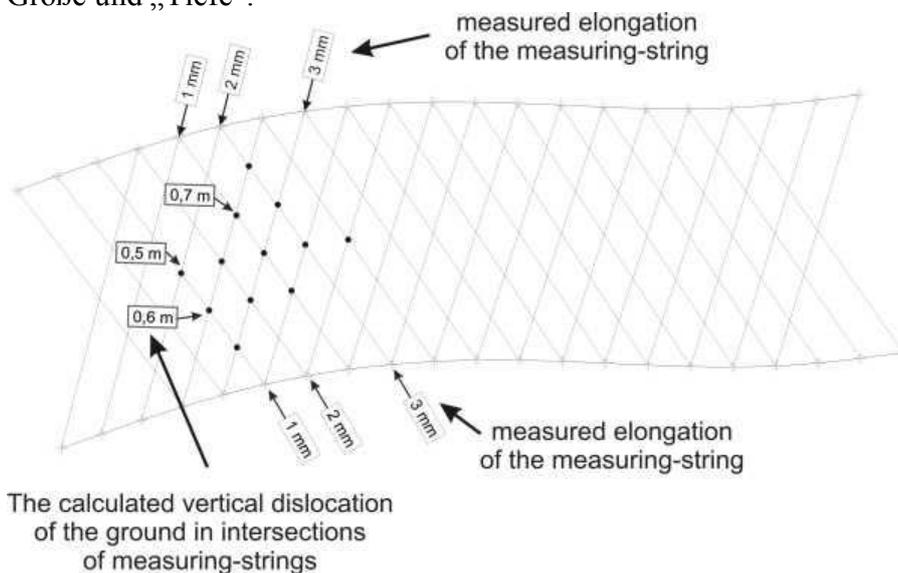


Abb.5 : Anordnung der Zugelemente mit exemplarisch angenommenen Messwerte der Wegaufnehmer und der daraus resultierenden Ortung des Erdfalls in Größe und „Tiefe“ [7]

Verwendung von Wegaufnehmern zur Erkundung von Erdfällen

Eine weitere Möglichkeit den Eintritt und die Lage eines Erdfalls zu erkunden, ist die Verwendung von Wegaufnehmern, die Längungen der Geogitter lokal auf Strecken von ca. 20-30 cm messen. Die einzelnen Wegaufnehmer sind in einem zuvor definierten Raster zu installieren, um die Lage und die Größe eines eintretenden Erdfalls mit ausreichender Genauigkeit zu ermitteln. Eine kontinuierliche Messung, wie mit den zuvor beschriebenen Methoden, ist mit Wegaufnehmern nicht möglich.

Faseroptische Messungen

Punktuelle und auch kontinuierliche Messungen der Dehnungen im Bewehrungselement sind mittels Messfasern aus Glas oder Polymeren möglich. Bei punktuellen Messungen werden die Messfasern in regelmäßigen Abständen am Bewehrungselement fixiert und die Dehnung zwischen den Befestigungspunkten ermittelt [8]. Hierzu können sogenannte „Bregg-Gitter“ in die Faser mittels Lasertechnik „eingebrennt“ werden. Deren Verformungen werden über Laufzeitmessungen ermittelt und daraus letztlich die Dehnung im Bewehrungselement.

Neueste Entwicklungen in der Produktionstechnologie ermöglichen es Messfasern direkt bei der Produktion ins Bewehrungsprodukt einzuarbeiten, so dass kontinuierliche Messungen möglich sind. Kontinuierliche Messungen können mittels sogenannter Streuungsmessungen erfolgen.

6 Projektbeispiel „Bundesstraße B 180 bei Eisleben“

Beim Projekt „Bundesstraße B 180, Eisleben“ handelt es sich um die erste Erdfallüberbrückung mit Geogittern, nicht nur an einer deutschen Straße, sondern weltweit. Planung und Ausführung erfolgten in 1992-1993. Der zu erwartende Durchmesser des Erdfalltrichters in einem Karstgebiet lag zwischen 6 und 12 m, wobei die exakte Lage durch einen zuvor aufgetretenen Erdfall bekannt war. Das System sollte für mindestens 10-15 Minuten den Verkehr mit 100 km/h tragen; in dieser Zeit sollte ein an den Dehnungen des Geogitters geeichtes und gekoppeltes Warnsystem den Verkehr stoppen. Der Problembereich lag in einem Einschnitt, somit war ein sehr flaches System erforderlich. Zu derzeit waren keine Rechenverfahren in Deutschland vorhanden, daher wurden die Berechnungen gemäß dem Entwurf vom BS 8006 (1992) geführt. Es gab keine Bewehrung, die den enormen Anforderungen genügen konnte. Aus diesem Grund wurde zum ersten Mal weltweit ein Geogitter aus Aramid (AR) entwickelt, produziert und angewendet. Die Kurzzeitfestigkeit betrug $F_k = 1200 \text{ kN/m}$ bei einer Grenzdehnung $\varepsilon_{ult} < 2,5 \%$ (Abb. 6).

In Oktober 2001 (acht Jahre nach dem Bau) trat der Erdfall erneut auf. Binnen kurzer Zeit erreichte der Trichterdurchmesser 5-6 m und vergrößerte sich innerhalb einer Stunde auf über 10 m. Die Warnanlage sprang angesichts eines vorangegangenen menschlichen Versäumnisses nicht an, wobei der Verkehr jedoch schadlos über dem wachsenden Trichter mindestens für eine halbe Stunde weiterfuhr. Das System kollabierte als der Trichter über 12 bis 14 m Weite erreichte. Zu diesem Zeitpunkt war die Straße aufgrund der großen aufgetretenen Verformung bereits gesperrt. Das System hat länger als bemessen und für einen deutlich größeren Erdfalldurchmesser als angenommen gehalten. Detaillierte Informationen finden sich in Alexiew & Thurm [9].

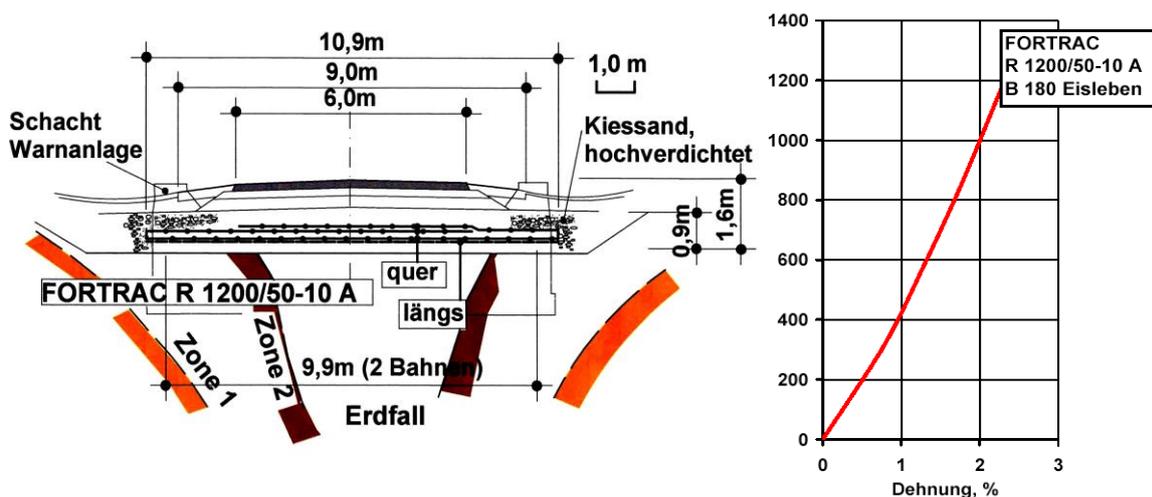


Abb.6 : B 180 Eisleben: Konzept der Geogitterbewehrung (links) und Kurzarbeitslinie Zugkraft/Dehnung (rechts) (Alexiew & Thurm, 2003)

7 Zusammenfassung

Durch Erdfälle verursachte Schäden an Verkehrswegen können gravierende Behinderungen im privaten und öffentlichen Verkehr entstehen. In ehemaligen Bergbauregionen wie dem Ruhrgebiet oder Regionen Thüringens und Sachsens sind Erdfälle bekannt. Jedoch im Zuge steigender Grundwasserspiegel, die sich nach der Stilllegung des Bergbaubetriebes einstellen werden, ist zukünftig mit einer Zunahme von Problemen zu rechnen. In anderen Regionen treten Erdfälle, Bodenabsenkungen und Hohlräume aufgrund von Karstprozessen auf. Die Verwendung geosynthetischer Bewehrungen zur Teil- oder Vollsicherung von Verkehrswegen gegen Erdenbrüche wird in Deutschland bereits seit mehr als 20 Jahren erfolgreich praktiziert. Ausreichend

hohe Zugfestigkeiten, Dehnsteifigkeiten sowie die hohe Duktilität von Geokunststoffbewehrungen sind hierfür maßgebliche technische Parameter.

Quellenangaben

[1] Alexiew, D.; Edel, J.,; Witte, R.: Sicherung von Verkehrswegen gegen Altbergbaueinwirkungen mit Hilfe von Geokunststoffen. End des Steinkohlebergbaus im Ruhrrevier: Realität und Perspektiven für die Geotechnik. Beiträge zum RuhrGeo Tag 2014, Bochum

[2] EBGEO: Empfehlungen für den Bau und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2. Auflage, Ernst und Sohn, Berlin 2010

[3] Scherbeck, R.; Barciaga, T.; König, D.; Wollnik, F.; Schanz, T.: Neue Untersuchungen zum Systemverhalten von Lockermassenfüllsäulen alter Tiefbauschächte, Geotechnik 36 (2013), H. 4, 218-230

[4] Alexiew, D., Elsing, A., Ast, W.: 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, 2002

[5] Alexiew D., Ast, W., Elsing, A., Hangen, H., Sobolewski, J.: 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, 2003

[6] Glötzl, F.; Haberland, J.: Flächendeckendes Überwachungssystem unter einer Erde-Verbund-Konstruktion zur Lokalisierung von Erdfällen, Fach Symposium „Messen in der Geotechnik 2002“, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, 2002

[7] Bednarski Ł.; Sieńko R.; Sobolewski J.; Ajdukiewicz J.: Electronic monitoring system combined with an overbridging in the most endangered sections of A1 Motorway in Poland. 12th Baltic Sea Geotechnical Conference, Rostock, Germany, 2012

[8] Lienhart, W.; Moser, F.; Schuller, H.; Schachinger, T.: Reinforced Earth Structures at Semmering Base Tunnel – Construction and Monitoring using Fiber Optic Strain Measurements, 10th ICG, Berlin, Germany, 2014

[9] Alexiew, D.; Thurm, S.: Die Bundesstrasse B 180 von 1993 bis heute: Erste Erdfallüberbrückung mit Geokunststoffbewehrung in Deutschland. Straße und Autobahn, Vol. 54, Heft 3, 157-163, 2003