

Sicherungsmaßnahmen gegen Erdfallgefährdung

Peter-Andreas von Wolffersdorff

1. Einleitung

Erdfälle entstehen, wenn unterirdische, nicht dauerhaft standsichere Hohlräume einstürzen und diese Einstürze nach oben hin bis zur freien Geländeoberfläche fortschreiten. Mit Erdfallgefahr ist vor allem im verkarsteten Gebirge und in Gebieten mit Altbergbau zu rechnen. Insbesondere Verkehrswege führen vereinzelt durch erdfallgefährdete Gebiete.

Zu Vermeidung der Erdfallgefahr im Bereich von Verkehrswegen wird folgender Weg beschritten

1. Zunächst werden alle einsturzgefährdeten, unterirdische Hohlräume umfassend erkundet und gefundene Hohlräume möglichst vollständig verfüllt.
2. Bei Gebirge, das durch verzweigte Karststrukturen geschwächt ist, können nicht alle erkundeten Karststrukturen ausreichend verfüllt werden. In diesen Fällen sind zusätzliche bautechnische Sicherungsmaßnahmen notwendig, die gleichzeitig auch das Restrisiko aus nicht erkundeten Hohlräumen ausreichend verringern.

Sowohl im Straßenbau als auch im Eisenbahnbau hat sich der Einsatz von Geogitterkonstruktionen zur Sicherung gegen Erdfallgefährdung bewährt [8], [12].

2. Karststrukturen an der Hochgeschwindigkeitsstrecke Nürnberg – Ingolstadt

Die Neubaustrecke (NBS) Nürnberg – Ingolstadt führt südlich des Altmühltals über bzw. durch verkarstetes Gebirge des Oberen Jura. Bild 1 zeigt das Längsprofil des Loses Süd. Während Tunnel und Einschnitte zum Teil direkt in den verkarsteten Strukturen liegen, befinden sich die geländegleichen Abschnitte und die Dämme auf einer Lockergesteinsschicht über dem verkarsteten Gebirge.

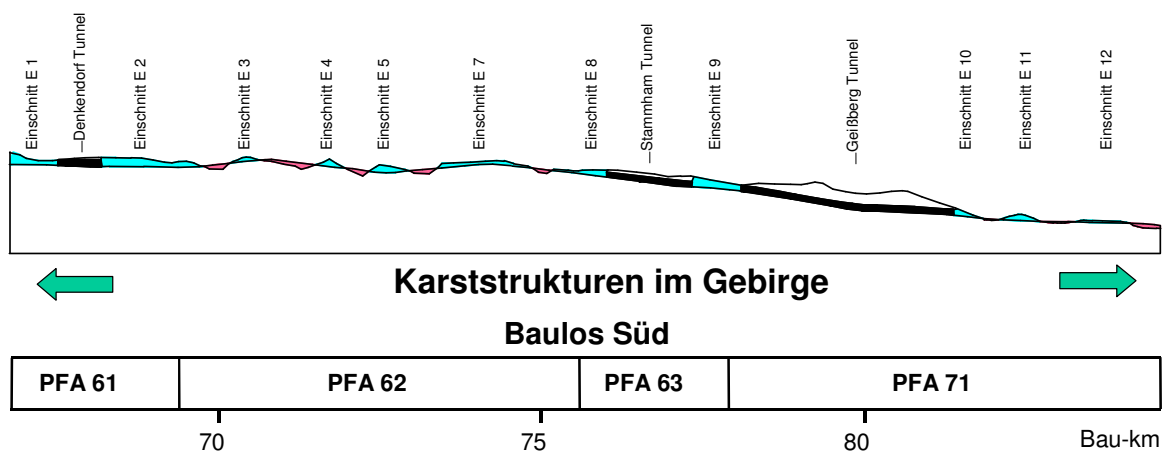


Bild 1: Los Süd der Bahn-Hochgeschwindigkeitsstrecke Nürnberg - Ingolstadt

Nach flächendeckenden geophysikalischen Untersuchungen und ergänzenden Kernbohrungen entlang der verkarsteten Streckenabschnitte wurden alle Schwächezonen analysiert und geotechnisch bewertet. Erkundete Schwachstellen werden so ertüchtigt, dass keine plötzlichen Einbrüche entstehen und die Verformungen hinreichend genau prognostiziert werden können. Bild 2 zeigt eine größere offene Karstspalte im Einschnitt E5.



Bild 2: Karstspalte im Einschnitt E5 des Planfeststellungsabschnittes 62

In der zusammengefassten Ergebnisdarstellung der geophysikalischen Erkundungen spiegeln sich unterirdische Karststrukturen durch Anomalien wider. In den Abschnitten, in denen eine bindige Lockergesteinsschicht das verkarstete Gebirge überdeckt, wird davon ausgegangen, dass im Bereich nachgewiesener, aber nicht eindeutig quantifizierbarer Anomalien offene Klüfte, Karstspalten, Karstschlote mit geringer Ausdehnung vorhanden sind, die durch natürliche Prozesse zu Materialabtransport aus dem Lockergestein, also zu einer „Kaminbildung“ im Lockergestein führen. Hier muss eine zusätzliche, statisch wirksame Sicherung erfolgen, um ein weiteres Fortschreiten der Kaminbildungen bis an die freie Oberfläche zu verhindern.

Anhand der Erfahrungen, die während der umfangreichen Untersuchungen des verkarsteten Gebirges gewonnen werden konnten, wurde nach eingehenden Beratungen folgendes Erdfallmodell vereinbart, das die Grundlage für den Entwurf und die Bemessung von Sicherungsmaßnahmen bildet:

- Annahme eines Karsthohlraumes mit quadratischer Grundfläche und einer Seitenlänge von 4 m bzw. kreisrunder Grundfläche von 16 m^2 , dessen Grundriss sich während der Nutzungszeit der Bahnstrecke nicht ändert,
- fortschreitender Abbruch in der Hohlraumdecke bis an die darüber liegende bindige Lockergesteinsschicht,
- Kaminbildung innerhalb der bindigen Lockergesteinsschicht mit senkrechten Kaminwänden.

In Bild 3 ist das angenommene Erdfallmodell dargestellt.

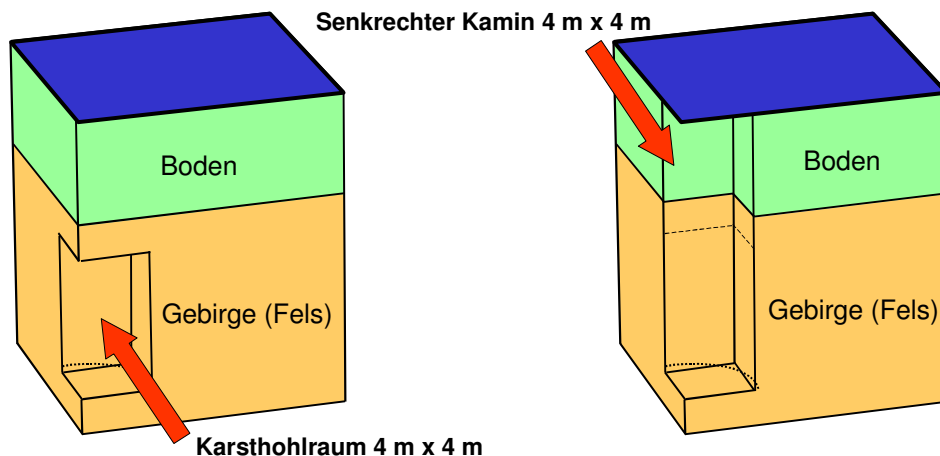


Bild 3: Angenommenes Erdfallmodell zur Bemessung von Sicherungsmaßnahmen

Für die Bemessung von Sicherungsmaßnahmen werden außerdem die maßgeblichen Lagen eines eventuellen Erdfalles unter dem Fahrweg festgelegt.

3. Geogitterkonstruktionen als Ertüchtigungsmaßnahmen im verkarsteten Gebirge

Die Geogitterkonstruktionen sind in oder unter Dämmen als Ertüchtigungsmaßnahmen im verkarsteten Gebirge geeignet. Sie müssen in den dynamisch wenig beanspruchten Bereichen angeordnet sein, d.h. mindestens 3 m unter dem Planum des Oberbaues. Werden Dämme aus nichtbindigem Material hergestellt, darf die Sicherungskonstruktion nur maximal 0,5 m oberhalb der Gründungssohle des Dammes liegen, weil sonst die senkrechte Kaminausbildung des Erdfallmodells nicht mehr angenommen werden kann.

Da bei Bahn-Hochgeschwindigkeitsfahrwegen sehr geringe Verformungstoleranzen einzuhalten sind, gelten folgende Anforderungen an die Geogitterkonstruktionen:

- Überspannung des angenommenen Hohlraums (Kamins) auf Dauer ohne Bruch des Unterbaues und Oberbaues, d.h. Gewährleistung der Tragfähigkeit bzw. Duktilität¹,
- Einhaltung der vorgegebenen zulässigen Verformungskriterien des Fahrweges, d.h. Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit bzw. ausreichend hoher Steifigkeit

Beide Kriterien können nur durch folgende Konstruktionsprinzipien erfüllt werden:

- eine Lage oder mehrere Lagen hochzugfester, dehnungsarmer Geogitter,
- mit Bindemittel verfestigte Schicht über der Geogitterkonstruktion mit einer Minstdicke von ca. 3 m.

Für die folgenden Untersuchungen in diesem Beitrag wurde eine einlagige Geogitterkonstruktion mit zementverfestigter Überdeckung gewählt (siehe Bild 4).

¹ Nichterkennbares Spröbruchverhalten muss ausgeschlossen sein.

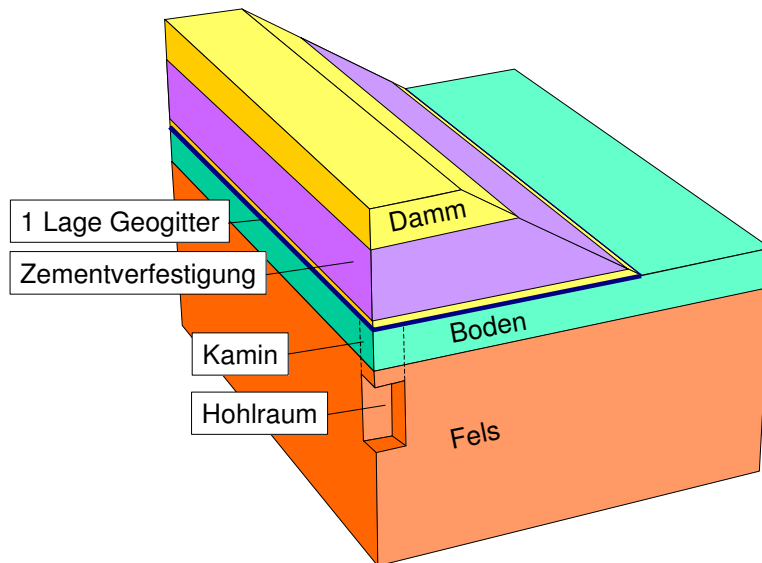


Bild 4: Geogitterkonstruktion (1 Lage Geogitter mit zementverfestigter Überdeckung)

Das Geogitter erstreckt sich in Querrichtung jeweils über die gesamte Dammbreite. Die Haupttragrichtung des hochfesten, dehnungsarmen Geogitters liegt in Dammlängsrichtung. Die Überlappung der Geogitterbahnen ist kraftschlüssig auszuführen. In Dammlängsrichtung sollten die Geogitterbahnen mindestens 7,0 m über die Ränder des angenommenen Kamins hinaus geführt werden.

Das Geogitter wird auf einer Kiessand-Schutzschicht mit einer Dicke von 30 cm straff gespannt verlegt und mit einer gleichdicken Kiessandschicht überdeckt. Die Endverankerung erfolgt nur über Reibungskräfte.

Die hier untersuchte Geogitterkonstruktion ist folgenden Beanspruchungen ausgesetzt:

- Eigengewicht der Geogitterkonstruktion einschließlich der Kiessand-Schutzschichten
- Auflast aus zementverfestigter Überdeckung
- Auflast aus übriger Dammkonstruktion und aus Oberbau
- Nutzlast aus Zugverkehr (Verwendung des vereinfachten Lastbildes UIC 71)

Für das verwendete, hochfeste, dehnungsarme Geogitter gilt in Spannrichtung ein charakteristischer Wert der Kurzzeitfestigkeit von $F_{B,k0} = 1200 \text{ kN/m}$. Bei einer maximalen Dehnung von 2,5% leitet sich daraus die Dehnsteifigkeit $J_{kurz} = E \cdot A = 48000 \text{ kN/m}$ für Kurzzeitbeanspruchung ab. Analog wird eine Dehnung von 1,7% infolge Zugkriechen bei einer Last von $500 \pm 100 \text{ kN/m}$ und einer Einwirkungsdauer von 8 Wochen für die Ableitung der Dehnsteifigkeit $J_{lang} = 29400 \text{ kN/m}$ bei Langzeitbeanspruchung angesetzt [5].

Die Oberbaukonstruktion der NBS Nürnberg – Ingolstadt, die als Hochgeschwindigkeitsfahrweg mit 300 km/h ausgelegt ist, wird als „Feste Fahrbahn“ ausgeführt, und es gelten hierfür sehr hohe Verformungsanforderungen. Deswegen haben die Verformungsprognosen, die nur am Gesamtsystem „Untergrund mit Hohlraum, Damm mit Oberbaukonstruktion“ realitätsnah erstellt werden können, besondere Bedeutung, und haben Priorität vor den Tragfähigkeitsuntersuchungen der Geogitterkonstruktion. Es müssen jedoch beide Nachweise – Verformungs-

nachweise und Tragfähigkeitsnachweise – erbracht werden. Bild 5 gibt einen Überblick über das empfohlene Nachweiskonzept für Geogitterkonstruktionen zur Sicherung gegen Erdfallgefährdung.

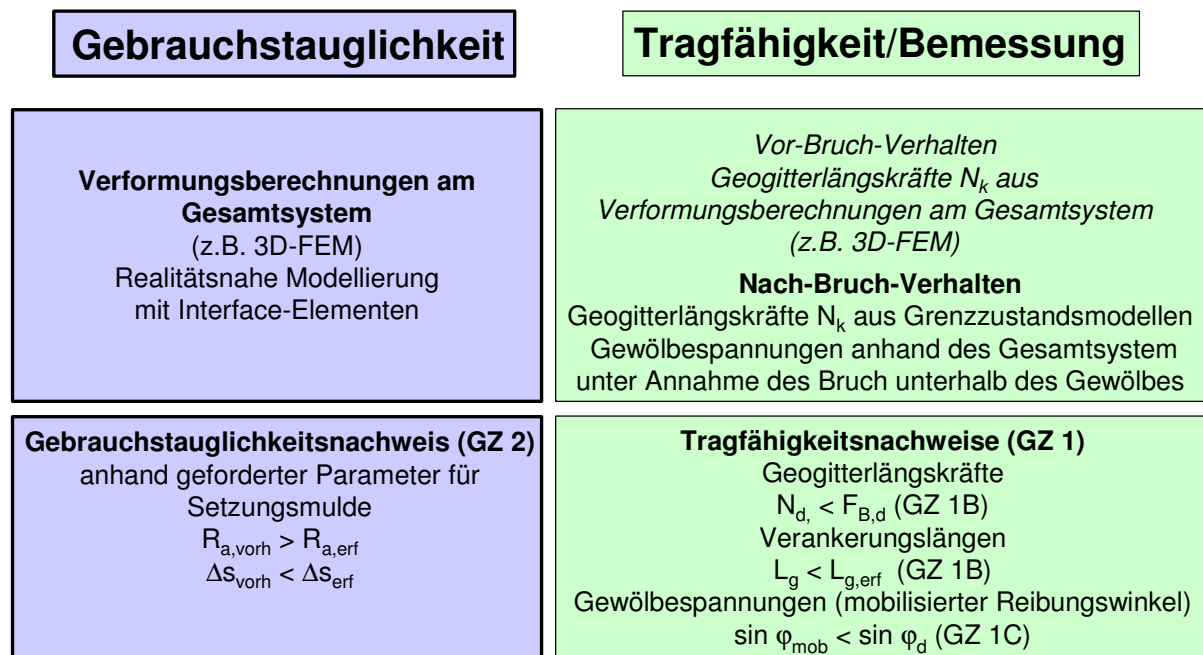


Bild 5: Nachweiskonzept für Geogitterkonstruktionen zur Sicherung gegen Erdfallgefahr

Dieses Nachweiskonzept stützt sich auf das Sicherheitskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten nach [3]. Die Grundzüge dieses Nachweiskonzeptes werden in den folgenden Abschnitten am Beispiel der einlagigen Geogitterkonstruktion mit zementverfestigter Überdeckung beschrieben.

4. Gebrauchstauglichkeit der Geogitterkonstruktionen

Da die Gebrauchstauglichkeit der Sicherungskonstruktion gegen Erdfallgefährdung anhand einzuhaltende Ausrundungsradien der Setzungsmulde und Querneigungen des Hochgeschwindigkeitsgleises nachzuweisen ist, war es notwendig, hierfür möglichst realitätsnahe dreidimensionale Finite-Elemente-Modelle zu verwenden. In Bild 6 ist das Berechnungsmodell für die zentrale Lage des Hohlraumes unter dem Damm dargestellt (Ausnutzung doppelter Symmetrie). Zusätzlich wurden auch außermittige Hohlraumlagen untersucht, wobei zu deren Modellierung nur einfache Symmetrie ausgenutzt werden kann (siehe Bild 7).

In den Berechnungsmodellen wurden jeweils an den Grenzflächen zwischen verfestigten und nicht verfestigten Schichten (Grenzfläche „HGT – FFS“ bzw. Grenzfläche „Zementverfestigte Überdeckung – Kiessandschutzschicht“) Interface-Elemente angeordnet, die bei Entlastung (Zug) sehr weich sind und bei Belastung (Druck) die Eigenschaften der angrenzenden unverfestigten Schicht besitzen. Die Anordnung dieser Interface-Elemente hat folgenden Zweck:

- Modellierung des Entstehens von Spalten, wie sie in der Praxis bereits beobachtet wurden,

- Ermittlung realistischer Verformungen der Betontragschicht der Festen Fahrbahn,
- Ermittlung realitätsnaher (größerer) Verformungen und Beanspruchungen der Geogitter im Vor-Bruch-Zustand.

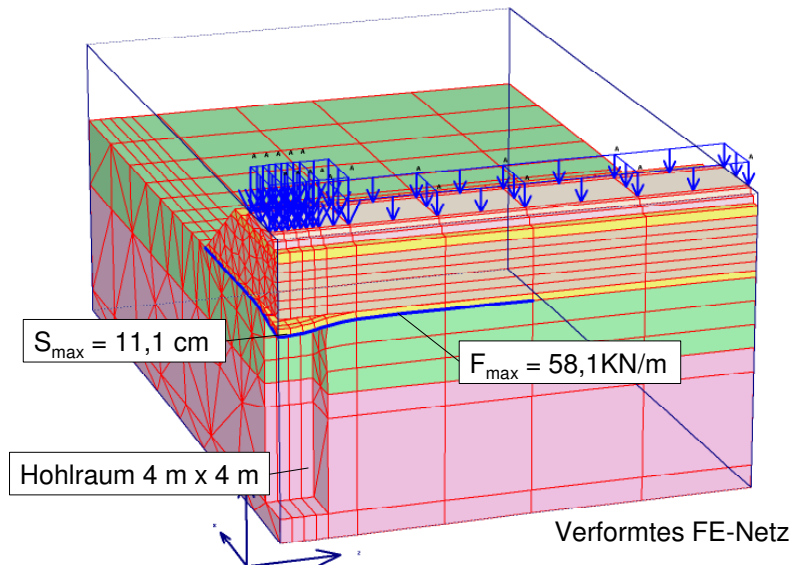


Bild 6: 3D-Finite-Elemente-Modell für die maßgebende Berechnungsphase: verformtes FE-Netz, maximaler Durchgang des Geogitters, maximale Geogitterbeanspruchung

Die Geogitter wurden mit Platten-Elementen mit sehr geringer Biegesteifigkeit modelliert. Die bei hochfesten, dehnungsarmen Geogitter vorhandene viele geringere Festigkeit und Dehnsteifigkeit in Querrichtung (anisotropes Materialverhalten) konnte mit den verfügbaren Platten-Elementen [9] nicht berücksichtigt werden. Statt dessen wurden 80 % der hohen Dehnsteifigkeit (Spannungsrichtung) für beide Richtungen angesetzt (siehe auch [11]).

Für Gebirge (Fels, Boden) und Dammmaterial (verfestigt/unverfestigt) wurde das linear-elastische, ideal-plastische Mohr/Coulomb-Modell verwendet. Die Betontragschicht (BTS) und die hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT) wurden linear-elastisch angenommen.

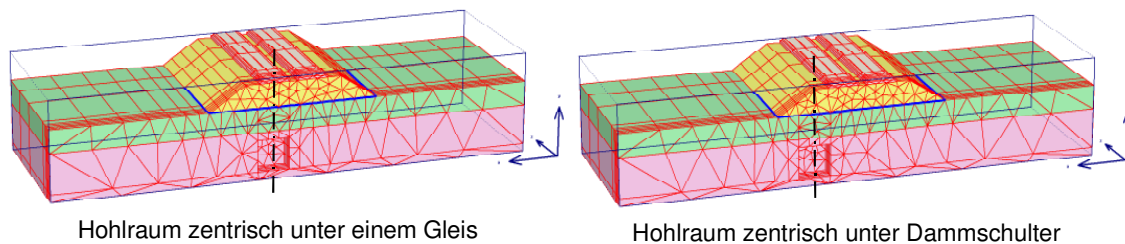


Bild 7: Berechnungsvarianten mit außermittigen Hohlraumlagen

Folgende Berechnungsphasen wurden in den Finite-Elemente-Berechnungen modelliert:

- Phase 1: Ausgangszustand (Primärspannungszustand)
- Phase 2: Entstehung des Karsthohlraums im Fels
- Phase 3: Schütten des Dammes, Einbau der Geogitterkonstruktion, Einbau des Oberbaues
- Phase 4: Entstehung des „Kamins“ bis Unterkante Geogitterkonstruktion
- Phase 5: Belastung aus Zugverkehr nach Lastbild UIC 71

Die dreidimensionalen, nichtlinearen FE-Berechnungen haben sich aus folgenden Gründen als numerisch schwierig und als äußerst aufwendig erwiesen:

- Da die biegeweichen Geogitter senkrecht zu ihrer Längssteifigkeit belastet werden, ergeben sich die Beanspruchungen in diesen Plattenelementen vorrangig aus Geometrieeffekten 2. Ordnung (geometrische Nichtlinearität), wodurch ein höherer numerischer Aufwand entsteht (lange Berechnungszeiten mit sehr vielen Lastschritten).
- Die Einbettung der sehr biegeweichen Geogitter in Bodenschichten mit größerer Steifigkeit kann insbesondere bei der Simulation des Erdfallkamins zu Genauigkeitsproblemen der Finite-Elemente-Berechnungen führen.
- Die Simulation von Spalten, die für eine realitätsnahe Modellierung unerlässlich sind, führt ebenfalls zu numerischen Schwierigkeiten. Die „passende“ Steifigkeiten von Interface-Elementen, die auch Spalte bei Entlastungen zulassen, müssen von Fall zu Fall festgelegt werden.

Bild 6 zeigt Berechnungsergebnisse mit dem doppelsymmetrischen FE-Modell (zentrale Hohrraumlage) für die maßgebende Berechnungsphase 5. Das verformte FE-Modell ist nicht überhöht, sondern im tatsächlichen Maßstab dargestellt. Der maximale Durchhang des Geogitters beträgt $s_{\max} \approx 11$ cm. Deutlich ist der Spalt zwischen der Kiessand-Schutzschicht und der zementverfestigten Überdeckung zu erkennen.

Ein Nachbrechen der zementverfestigten Überdeckung, das bei dem Großversuch an einer ähnlichen Geogitterkonstruktion beobachtet wurde und sich nach längerer Standzeit infolge wiederholter Zugüberfahrten einstellt [8], blieb in den dreidimensionalen FE-Berechnungen unberücksichtigt. Bild 6 zeigt trotz des Spaltes den Vor-Bruch-Zustand, bei dem eine maximale Geogitterbeanspruchung $F_{\max} \approx 58$ kN/m auftritt.

Für die Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen der Festen Fahrbahn wurden die Vertikalverschiebungen an der Oberkante der BTS (linke und rechte Seite) ausgewertet. Anschließend wurden die maßgebenden Ausrundungsradien R_{vorh} , die Setzungsunterschiede Δs_{vorh} der Setzungsmulde in Längsrichtung und Schiefstellungen $\tan \delta_{\text{vorh}}$ ermittelt (siehe Bild 8).

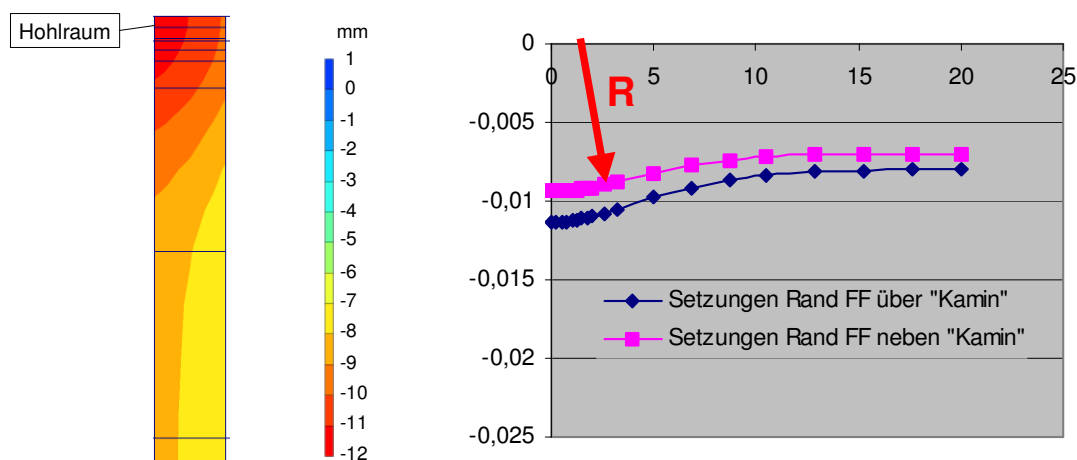


Bild 8: Setzungsmulde der Festen Fahrbahn infolge Kaminbildung über dem Hohlraum

Folgende Gebrauchstauglichkeitsnachweise sind zu führen:

$$R_{\text{vorh}} \geq 0,1 v_e^2 = 9000 \text{ m};$$

$$\tan \delta_{\text{vorh}} \leq 0,001;$$

$$\Delta s_{\text{vorh}} \leq 15 \text{ mm}$$

Die hier verwendeten zulässigen Verformungskriterien orientieren sich zwar am Anforderungskatalog Feste Fahrbahn (AKFF) [1], [2] sind aber nicht allgemeingültig.

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsnachweise für die einlagige Geogitterkonstruktion mit zementverfestigter Überdeckung dargestellt. Die hier vorgegebenen Verformungskriterien für die Feste Fahrbahn werden eingehalten.

Tabelle 1: Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsnachweise in der Festen Fahrbahn

Krümmungsradius [m]: $R_{\text{min,vorh}} > R_{\text{zul}}$	10608 > 9000 Nachweis erfüllt
Setzungsdifferenz [mm] $\Delta s_{\text{max,vorh}} < \Delta s_{\text{zul}}$	3,32 < 15 Nachweis erfüllt
Querneigung [-] $\tan \delta_{\text{max,vorh}} < \tan \delta_{\text{zul}}$	0,00062 < 0,001 Nachweis erfüllt

5. Tragfähigkeit der Geogitterkonstruktionen

Maßgebend für die Tragfähigkeitsuntersuchungen ist der Nach-Bruch-Zustand (post failure), bei dem sich innerhalb der zementverfestigten Überdeckung ein stabiles Gewölbe ausbildet und ein Teil der Zementverfestigung über dem Kamin nachgesackt ist.

Zur Simulation des Nach-Bruch-Zustandes in der zementverfestigten Überdeckung wurde vereinfachend ein axialsymmetrisches FE-Modell verwendet (siehe Bild 9). Zunächst werden die 5 Berechnungsphasen analog der 3D-FE-Berechnungen modelliert und berechnet. Da Berechnungsmethoden, bei denen sich ablösende bzw. nachsackende Materialbereiche ohne vorgegebene Sollbruchgeometrien einstellen können, zur Zeit noch nicht ausreichend entwickelt sind, muss die Form des Nach-Bruch-Bereiches vorgegeben werden. Hierfür wird wie folgt vorgegangen:

- 1 Darstellung des Zugspannungsbereiches (weiße tension-cut-off-Punkte) nach Entstehen des Kamins bis Unterkante Geogitterkonstruktion ohne Nachbruch der zementverfestigten Schicht in der Berechnungsphase 5
- 2 Ergänzung der Geometrie des FE-Modells mit einer geeigneten Umgrenzungslinie (z.B. Parabel) um den Zugspannungsbereich; Ansatz einer äquivalenten Flächenlast für den Abbruchkörper innerhalb der Umgrenzungslinie
- 3 Durchführung der Berechnung mit neuem axialsymmetrischen FE-Modell von Berechnungsphase 1 bis Berechnungsphase 6 (Ersatz des Abbruchkörpers durch Flächenlast)

4 Überprüfung der Umgrenzungslinie für den Abbruchbereich anhand des Zugspannungsbereiches in den Berechnungsphasen 5 und 6

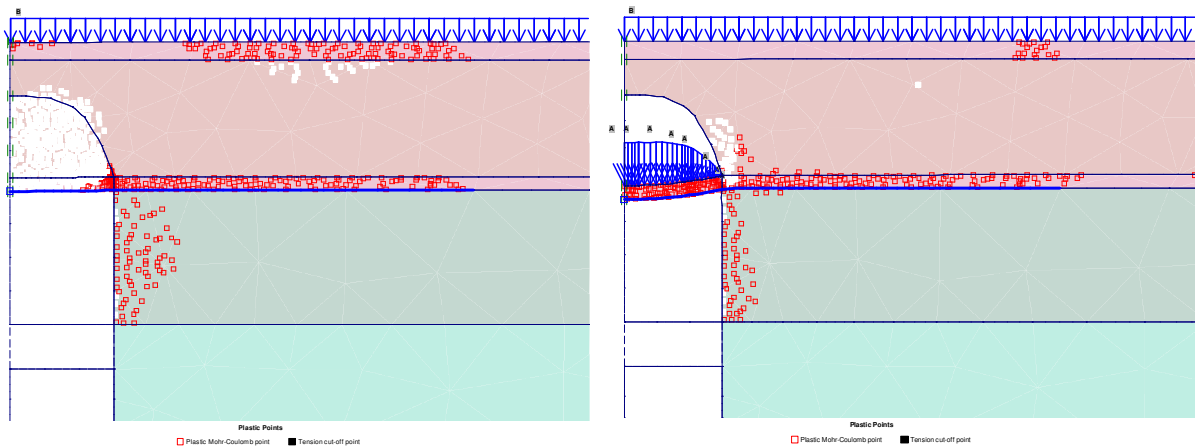


Bild 9: Simulation des Nach-Bruch-Zustandes anhand axialsymmetrischer Finite-Elemente-Berechnungen

Falls die gewählte Umgrenzungslinie nicht zutreffend den Zugspannungsbereich umschließt, sind die Lösungsschritte 2 bis 4 zu wiederholen.

Das Ergebnis dieser Modellierungsmethode zeigt Bild 9. Als Höhe des Nachbruches wurde ca. 70 % der Dicke der zementverfestigten Schicht angenommen, d.h. das Druckgewölbe konzentriert sich im oberen Teil der zementverfestigten Schicht. Die Darstellungen belegen die realistische Annahme für den Bereich, in dem sich die zementverfestigte Schicht ablöst bzw. nachsackt. Es entsteht die maßgebende Beanspruchung des Geogitters bei möglichst großem Abbruchkörper.

Für den Nach-Bruch-Zustand lassen sich die erforderlichen Tragfähigkeitsnachweise praxistauglich führen. Das sind

- der Nachweis der Tragfähigkeit des Geogitters,
- der Nachweis der erforderlichen Verankerungslänge des Geogitters,
- der Nachweis der Standsicherheit des Druckgewölbes in der Zementverfestigung.

Für den Nachweis der Tragfähigkeit des Geogitters mit einaxialer Tragwirkung im Nach-Bruch-Zustand ist die ebene Membrantheorie der „biegeweichen Saite“ im Vergleich zu den aufwendigen FE-Berechnungen gleichwertig geeignet. In Bild 10 sind die für die o.g. Theorie maßgebenden Größen dargestellt. Der Vorteil besteht darin, dass die charakteristische Geogitterzugkraft N_k wie folgt direkt anhand von geschlossenen Lösungen ermittelt werden kann:

$$N_k = \sqrt[3]{\frac{4}{135} h_g^2 \cdot \gamma^2 \cdot D^2 \cdot J} \quad (1)$$

In (1) sind außer den in Bild 10 definierten Größen γ die Wichte der Überdeckung in kN/m^3 und J die Dehnsteifigkeit des Geogitters in Spannungsrichtung in kN/m .

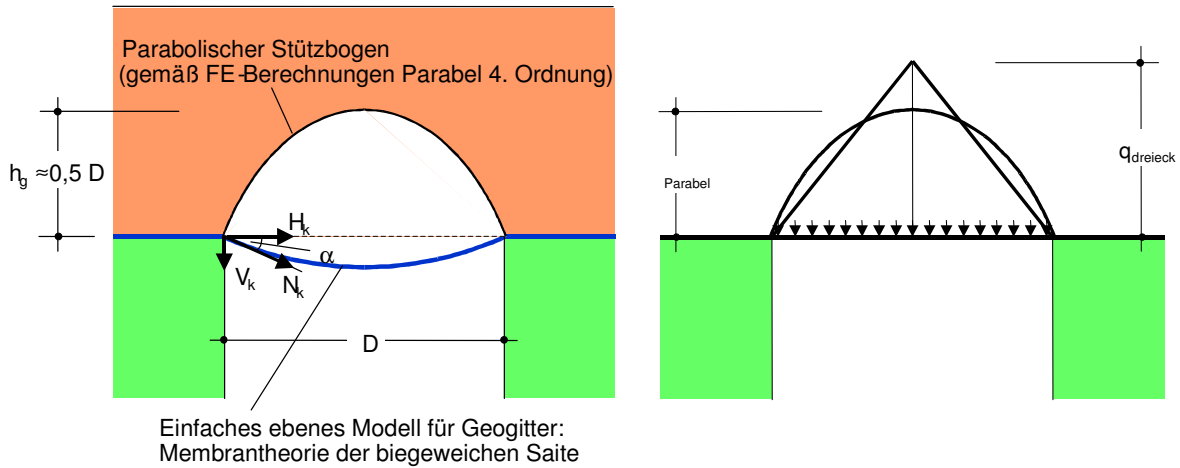


Bild 10: Vereinfachtes Berechnungsmodell für die maßgebende Beanspruchung des Geogitters (nach Alexiew [7])

Der Nachweis der Sicherheit gegen Bruch des Geogitters wird nach DIN 1054:2002-12 für den Grenzzustand GZ 1B geführt. Der Nachweis ist erbracht, wenn sowohl für die Langzeit- als auch für die Kurzzeitbeanspruchung folgende Bedingung erfüllt ist:

$$N_d \leq F_{B,d} \quad (2)$$

In (2) sind N_d der Bemessungswert der Geogitterbeanspruchung und $F_{B,d}$ der Bemessungswert des Materialwiderstandes des Geogitters (siehe [4]).

N_d ist aus dem charakteristischen Wert N_k durch Multiplikation mit dem Teilsicherheitsbeiwert für ständige Lasten γ_G nach DIN 1054:2002-12 zu ermitteln. Die Langzeitbeanspruchung ist als Lastfall 1 (LF1) und die Kurzzeitbeanspruchung ist als Lastfall 2 (LF2) anzunehmen, so dass folgende Teilsicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen sind: $\gamma_G = 1,35$ für LF1, $\gamma_G = 1,20$ für LF2.

Anhand der Bemessungswerte der Materialwiderstände für Langzeit- und Kurzzeitbeanspruchungen nach [4], [5] wurden die Nachweise der Sicherheit gegen Bruch des Geogitters erbracht. Die Ergebnisse der Nachweisführung sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Der Nachweis der Sicherheit gegen Herausziehen des Geogitters wird nach DIN 1054:2002-12 ebenfalls für den Grenzzustand GZ 1B geführt. Der Nachweis ist erbracht, wenn sowohl für die Langzeit- als auch für die Kurzzeitbeanspruchung folgende Bedingung erfüllt ist:

$$N_d \leq R_{t,d} \quad (3)$$

In (3) sind N_d der Bemessungswert der Geogitterbeanspruchung und $R_{t,d}$ der Bemessungswert des Herausziehwerstandes des Geogitters. $R_{t,d}$ ist:

$$R_{t,d} = \frac{1}{\gamma_{G1}} \cdot L_g \cdot h_{\ddot{u}} \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \tan \varphi \quad \text{bzw.} \quad L_{g,\text{erf}} \geq \frac{\gamma_{G1} \cdot N_d}{h_{\ddot{u}} \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \tan \varphi} \quad (4)$$

Tabelle 2: Ergebnisse des Tragfähigkeitsnachweises für das Geogitter

Angaben zum Nachweis	Membrantheorie Dreieckersatzlast
Kurzzeit $N_{d, kurz} < F_{B, d, kurz}$ [kN/m]	306 < 559
Langzeit $N_{d, lang} < F_{B, d, lang}$ [kN/m]	294 < 351
Nachweis	erfüllt

In (4) sind L_g die Verankerungslänge, $h_{\bar{u}}$ die Überdeckungshöhe, γ die Wichte der Überdeckung, μ der Reibungskoeffizient zwischen Geogitter und Boden, φ der Reibungswinkel des Bodens und γ_{GI} der Teilsicherheitsbeiwert für den Gleitwiderstand. Gemäß DIN 1054:2002-12 ist $\gamma_{GI} = 1,10$ für die Lastfälle LF1 und LF2.

Der Nachweis der Sicherheit gegen Herausziehen des Geogitters kann auch geführt werden, indem die erforderliche Verankerungslänge $L_{g, erf}$ nach (4) mit der vorhandenen Verankerungslänge $L_{g, vorh}$ (Empfehlung ≥ 7 m) verglichen wird.

In Tabelle 3 sind die erforderliche Verankerungs- und Überlappungslänge zusammengestellt, die sich anhand des Nachweises der Sicherheit gegen Herausziehen des Geogitters ergeben.

Tabelle 3: Ergebnisse des Nachweises der erforderlichen Verankerungslänge

Vorhandene Verankerungslänge $L_{g, vorh}$ [m]		Erforderliche Verankerungslänge $L_{g, erf}$ [m]	Angaben zum Nachweis	Überlappungslänge $L_{\bar{u}} = 2 \cdot L_{g, vorh} + D_{Erdfall}$ [m]
7,00	>	6,50	erfüllt	18

Der Nachweis der Sicherheit gegen Bruch im Druckgewölbe der zementverfestigten Schicht lässt sich nur widerspruchsfrei für den Grenzzustand GZ 1C nach DIN 1054:2002-12 führen. Hierbei sind die abgeminderten Bemessungswerte für die Scherparameter c_d und $\tan \varphi_d$ zu verwenden. Der Nachweis erfolgt nach Alexiew [7] in der Weise, dass überprüft wird, ob der Ausnutzungsgrad der Scherfestigkeit des zementverfestigten Materials in der wirksamen Druckzone des Gewölbes im Nach-Bruch-Zustand kleiner 1 ist. Nach dem MOHR/COULOMB-Kriterium gilt

$$\sin \varphi_{mob} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \cdot c_d \cdot \cot \varphi_d} \quad (5)$$

In (5) sind σ_1 die größte Hauptspannung, σ_3 die kleinste Hauptspannung sowie φ_d und c_d die Bemessungswerte des Reibungswinkels und der Kohäsion des zementverfestigten Materials.

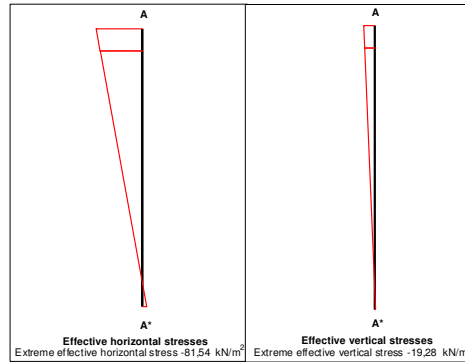


Bild 11: Spannungsverteilung in der Firste des Druckgewölbes der Zementverfestigung (axialsymmetrisches FE-Modell)

Die Bemessungswerte c_d und $\tan \varphi_d$ werden aus den charakteristischen Werten c_k und $\tan \varphi_k$ durch Division mit den Teilsicherheitsbeiwerten für den Reibungsbeiwert γ_φ und die Kohäsion γ_c nach DIN 1054:2002-12 ermittelt. Es gilt $\gamma_\varphi = \gamma_c = 1,25$ für LF1

Der Nachweis der Sicherheit gegen Bruch im Druckgewölbe ist erbracht, wenn im Nach-Bruch-Zustand in den maßgebenden Schnitten der wirksamen Druckzone folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\sin \varphi_{\text{mob}} \leq \sin \varphi_d \quad (6)$$

Dabei wird angenommen, dass der maßgebende Schnitt senkrecht an der Stelle der kleinsten Dicke der wirksamen Druckzone verläuft. In Bild 11 ist die Verteilung der Horizontal- und Vertikalspannungen an dieser Stelle dargestellt. Die Spannungsverteilungen wurden für den Nach-Bruch-Zustand aus der axialsymmetrischen FE-Berechnung gemäß Bild 9, rechte Seite, entnommen.

In Tabelle 4 sind Ergebnisse des erbrachten Nachweises der Sicherheit gegen Bruch im Druckgewölbe für unterschiedliche Höhen über dem Geogitter zusammengestellt.

Tabelle 4: Ergebnisse des Tragfähigkeitsnachweises der zementverfestigten Überdeckung

Höhe [m]	$\sin \varphi_{\text{mob}}$ [-]		$\sin \varphi_d$ [-]
3,00	0,1611	<	0,4740
2,89	0,1524	<	0,4740
2,89	0,1497	<	0,4740
2,10	0,0210	<	0,4740
Nachweis erfüllt			

6. Schlussbemerkungen

Anhand einer einlagigen Geogitterkonstruktion mit zementverfestigter Überdeckung wurde ein einheitliches Nachweis- und Berechnungskonzept erläutert, in dem insbesondere verfeinerte Verformungsnachweise berücksichtigt sind. Die numerischen Untersuchungen ergaben hinsichtlich des Tragverhaltens der Geogitterkonstruktion, dass die Haupttragwirkung über die zementverfestigte Überdeckung erfolgt. Sowohl die Tragfähigkeit als auch die Steifigkeit der Gesamtkonstruktion werden maßgeblich durch die Materialeigenschaften der Zementverfestigung geprägt. Das Geogitter hat eine mittragende Wirkung. Es verstärkt auf jeden Fall die Duktilität der Gesamtkonstruktion. Gemäß [3] ist Duktilität eine entscheidende Voraussetzung für die Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten und zur Gewährleistung eines hohen Sicherheitsniveaus für die Tragfähigkeit.

Die Überprüfung des hier vorgestellten Nachweis- und Berechnungskonzeptes anhand ausgeführter Konstruktionen bzw. zu planender Konstruktionen ist noch nicht abgeschlossen. Insbesondere ist noch nicht endgültig geklärt, inwieweit Messsysteme in der Geogitterkonstruktion zwingend notwendig sind, um eingetretene Erdfälle feststellen zu können oder ob es ausreicht, einen eingetretenen Erdfall anhand stärkerer Setzungsmulden in der Festen Fahrbahn erkennen zu können.

Die Tragfähigkeit der Geogitterkonstruktion zur Sicherung gegen Erdfallgefahr muss auf alle Fälle gewährleistet bleiben. In dem vorliegenden Beitrag wurden die Teilsicherheitsbeiwerte für die Scherparameter der zementverfestigten Überdeckung vorerst nach DIN 1054:2002-12 übernommen ($\gamma_\phi = \gamma_c = 1,25$). In weiteren Untersuchungen ist zu klären, inwieweit erhöhte Teilsicherheitsbeiwerte im Zusammenhang mit den Qualitätsanforderungen an eine zementverfestigte Bodenschicht erforderlich sind.

Literatur

- [1] Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn, 3. überarbeitete Auflage, Stand 15.10.1995
- [2] Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn, 4. überarbeitete Auflage, Stand 01.08.2002
- [3] DIN 1054:2002-12: Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau (Weißdruck)
- [4] Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO), herausgegeben von der Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 1997
- [5] Produktkatalog, Huesker Synthetic GmbH & Co. KG, Aramid Geogitter Fortrac 1200
- [6] Richtlinie 800.0110 Netzinfrastruktur Technik entwerfen; Linienführung, Deutsche Bahn AG, 01.02.1997
- [7] Alexiew, A.; Elsing, A.; Ast, W.: FEM-Analysis and Dimensioning of a Sinkhole Overbridging System for High-Speed Trains at Gröbers in Germany, erscheint demnächst, 2002
- [8] Ast, W.; Hubal, H.; Schollmeier, P.: Bewehrter Erdkörper mit Erdfall – Warnanlage für den Eisenbahnknoten Gröbers, Edition ETR Ingenieurbauwerke, S.130-137
- [9] Brinkgreve, R.B.J., Vermeer, P.A ed., Manual PLAXIS 3D Version 1, A.A. Balkema Publishers Lisse, Abindgon, Exton (PA), Tokyo, 2001

- [10] Brinkgreve, R.B.J. ed., Manual PLAXIS 2D Version 8, A.A. Balkema Publishers Lisse, Abindgon, Exton (PA), Tokyo, 2002
- [11] Möller, B., Graf, W., Hoffmann, A. Berechnungsmodelle für Geotextilien bei Erdfall, Vorträge zum 9. Darmstädter Geotechnik-Kolloquiums am 14. März 2002, Mitteil. d. Inst. u. Versuchsanst. f. Geotechnik der TU Darmstadt, Heft 58, S. 161-175, 2002
- [12] Sobolewski, J. Erdfallsicherung mit einaxialer geosynthetischer Bewehrung; Ortsumfahrungen: Zeitz-Theißen und Dingelstädt, 7. Informations- und Vortragstagung „Kunststoffe in der Geotechnik“, 2001