

# Verwitterungsempfindliche Böschungen im Verkehrswegebau planen und dauerhaft sichern

Design and permanent securing of weathering-sensitive slopes in traffic route construction

Florian Böhm<sup>1</sup>, Harald Vogel<sup>2</sup>, Bodo Kind<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Florian Böhm, ARCADIS Deutschland GmbH, f.boehm@arcadis.de

<sup>2</sup> Dr.-Ing. Harald Vogel, ARCADIS Deutschland GmbH, h.vogel@arcadis.de

<sup>3</sup> Bodo Kind, DB ProjektBau GmbH, Bodo.Kind@deutschebahn.com

## Zusammenfassung

Wesentlich für die Standsicherheit von Böschungen sind neben den Kennwerten für den Lockerboden die Kontinuums-Kennwerte des Felsverbandes als Schichtpaket und die Grundwasserverhältnisse. Durch eine Entnahme von Großproben ( $\varnothing \geq 0,6$  m) im Vorfeld für Großtriaxialversuche können Kontinuums-Kennwerte des Felsverbandes bestimmt werden. Mit diesen ist es möglich für die Planung die erforderlichen Sicherungsmaßnahmen von Böschungen zu optimieren. Zur Sicherung nicht ausreichend stabiler Böschungen dienen Dübel. Dies sind i.d.R. Bohrpfähle größeren Durchmessers (1,2 bis 1,5 m). Dazu wird ein innovatives Berechnungsverfahren zur Dimensionierung von Bohrpfählen vorgestellt. Gegenüber herkömmlichen Verfahren (Dalbenmodell) können die Bohrpfähle sehr wirtschaftlich bemessen werden, weil bei einem Dübel eine beidseitige Einspannung ober- und unterhalb der möglichen Gleitfuge berücksichtigt wird. Dieses Bemessungsverfahren hat sich bereits bei zahlreichen Verkehrsprojekten und zur Sicherung aktiver Rutschungen erfolgreich bewährt.

**Schlüsselworte:** Böschungssicherung, Erddübel, Großtriaxialversuche, Standsicherheitsberechnung

## Abstract

Continuum-properties of the rock assembly in the shape of layer package and the groundwater conditions are essential for the stability of slopes in loose soil and rock. Using large scale triaxial tests in advance ( $\varnothing \geq 0,6$  m), the continuum-properties can be determined. With these values for the design the required securing measures of slopes can be optimised. In order to secure unstable slopes dowels can be applied. Generally they consist of large diameter bored piles ( $\varnothing$  1,2 through 1,5 m). For this an innovative calculation method for the dimensioning of bored piles is introduced. Contrary to common methods (dolphin model) the bored piles can be designed very economically because for a dowel a two-sided restraint above and below a possible failure line can be considered. This method of design has proven its suitability in numerous traffic projects and on securing of active slides, already.

**Keywords:** slope stabilisation, earth-dowels, large scale triaxial tests, stability analysis

## 1 Neubaustrecke Ebensfeld – Erfurt

Ziel bei der Planung von Einschnitten im Verkehrswegebau, insbesondere bei Bahntrassen, sind dauerhaft stand-sichere und möglichst wartungsfreie Böschungen, um den Verkehrsbetrieb nicht zu beeinträchtigen und nach der Herstellung der Bahntrasse die Betriebskosten zu minimieren.

An der Neubaustrecke (NBS) von Ebensfeld nach Erfurt wird an zwei Einschnitten mit gespannten Grundwasser-verhältnissen in der Einschnittsohle beispielhaft gezeigt, wie verwitterungsempfindliche Böschungen im Bahnbau mit einer Verdübelung gesichert und mit einem Böschungsfilter dauerhaft vor Verwitterung geschützt werden. Die Neubaustrecke (NBS) von Ebensfeld nach Erfurt ist Teil der Hochgeschwindigkeitsverbindung Berlin-München und im europäischen Verkehrsnetz Bestandteil der Eisenbahntransversale von Italien nach Skandinavien

(Abb1). Die Strecke Ebensfeld-Erfurt gehört zu den Verkehrsprojekten „Deutsche Einheit“ (VDE 8.1).

Die Trassenführung der 107 km langen Eisenbahnstrecke durch das waldreiche Mittelgebirge des Thüringer Waldes teilt sich auf in 53,7 km freie Strecke (Einschnitte/Dämme), 22 Tunnel mit einer Gesamtlänge von 41,0 km und 29 Talbrücken mit einer Gesamtlänge von rd. 12,3 km. Hinzu kommen 38 Straßenüberführungen sowie 18 Erdstoffdeponien mit einem Gesamtdeponievolumen von 16 Mio. m<sup>3</sup> für die Überschussmassen des Erdaushubes.

ARCADIS ist für den gesamten Abschnitt der Neubaustrecke geotechnischer Berater der DB ProjektBau in Erfurt. Für sämtliche Erdbauwerke, Brücken und Tunnel der Neubaustrecke erstellte ARCADIS die Baugrund- und Gründungsgutachten und betreut die Baumaßnahme.

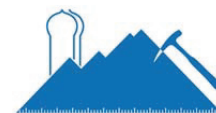


Abb. 1: NBS Ebersfeld – Erfurt, Lageplanausschnitt der Voreinschnitte Nord Tunnel Eierberge und Tunnel Lichtenholz (Planungsgrundlage: Obermeyer, unmaßstäblich)

Fig. 1: HSL Ebersfeld – Erfurt, layout extract of the northern pre-cut of the Tunnel Eierberge Tunnel Lichtenholz (design basis: Obermeyer GmbH)

## 2 Planung von Einschnitten

### 2.1 Grundlagen und Vorschriften

Die Planung für die Ausbildung von Böschungen im Lockergestein mit Böschungshöhen bis 5 m ist nach DIN 4124:2002-10 geregelt. Die Regelneigungen von Einschnitten und Dämmen werden für Bahntrassen nach Ril 836:2008 und im Straßenbau nach RAS-Q:1996-09 festgelegt. Die Regelneigungen betragen im Straßenbau 1:1,5 und im Bahnbau in Abhängigkeit von der Bodenart und der Böschungshöhe zwischen 1:1,5 und 1:2,0.

Bei Böschungen mit Höhen größer 5 m ist die Standsicherheit nach DIN 4124:2002-10 im Lockergestein und bei Felsböschungen durch einen geotechnischen Sachverständigen nachzuweisen.

Diese Vorschriften sind jedoch nicht immer (auch bei geringeren Böschungshöhen) ausreichend um dauerhaft stand-sichere Böschungen zu planen.

Die Grundwasserverhältnisse beeinflussen die Standsicherheit von Böschungen erheblich:

- Das Grundwasser und die Strömungskraft reduzieren das Gewicht des unter Auftrieb stehenden Böschungsfußes.
- Die Scherfestigkeit von Ton- und Schluffböden wird durch Verwitterungseinflüsse und bei Wasserzustrom beeinflusst. Bei Wassersättigung kann die natürliche Scherfestigkeit der Böden bis zur Restscherfestigkeit absinken (Abb. 2). Gleiches gilt für die Verwitterung von Tonböden, die durch Frost- und Tauwechsel, Wärme und Austrocknung Scherfestigkeit verlieren.

Bei einer Reduzierung der Scherfestigkeit von Tonböden kann der Nachweis der Spreizspannung von Böschungen bei einer Neigung von 1:1,5 nicht erfüllt werden – dennoch wäre nach RAS-Q 1996-09 eine Böschung mit dieser Neigung theoretisch möglich (Abb. 3).

Bei den o.g. Vorschriften werden die Verwitterungseinflüsse und Grundwasserverhältnisse nicht weiter berücksichtigt.

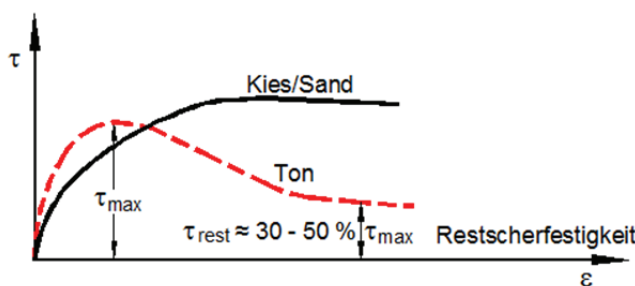


Abb. 2: Schematische Darstellung der Entwicklung von Verformung-Scherfestigkeit von Sand- und Tonböden

Fig. 2: Sketch of development of deformation-shear resistance of sand and clay soils

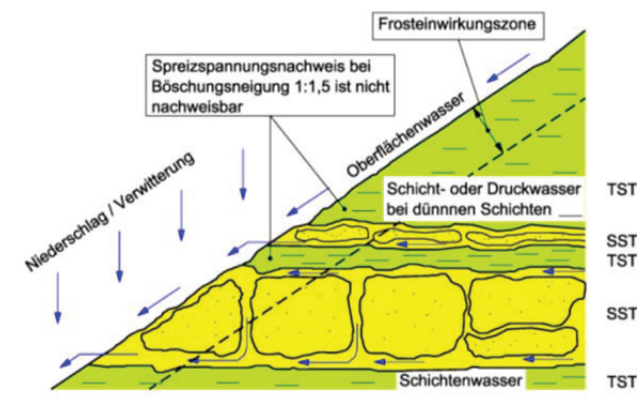


Abb. 3: Standsicherheitsprobleme einer Böschung

Fig. 3: Stability problems of an embankment

Da die genannten Randbedingungen von Streckenplanern nicht immer ausreichend berücksichtigt werden, treten an frisch hergestellten Böschungen mit Regelneigung häufig Böschungsbrüche auf (Abb. 4).

Dazu gibt es zahlreiche weitere Beispiele von unzureichenden Planungen im Straßenbau, beispielsweise an den Autobahnen A 3 und A 8.



Abb. 4: Beispiel einer bereits im Bauzustand sanierten Böschung  
 Fig. 4: Example of a slope, that has already been rehabilitated in the construction phase

### 3 Einschnitte der NBS Ebensfeld - Erfurt

#### 3.1 Entwurfsplanung

Die Einschnitte der NBS Ebensfeld – Erfurt sind im südlichen Teil der Trasse in den verwitterungsempfindlichen bindigen Böden und Fels des Lias  $\delta$  und des Feuerletten gemäß Planfeststellung mit Böschungsneigungen zwischen 1:2,2 bis 1:2,8 sowie Böschungshöhen bis 20 m geplant. Diese Neigungen sind bereits flacher als die Regelneigungen der Ril 836. Dennoch sind die Böschungen zum Teil nicht ausreichend standsicher und auch nicht dauerhaft verwitterungsbeständig.

An zwei Einschnitten der Neubaustrecke Ebensfeld - Erfurt werden beispielhaft die Baugrundmodelle hergeleitet und Standsicherheitsberechnungen durchgeführt:

- Einschnitt Nord Tunnel Eierberge
- Einschnitt Nord Tunnel Lichtenholz

Für die nicht ausreichend standsicheren Böschungen werden die erforderlichen Sicherungsmaßnahmen mit Dübeln (Bohrpfählen) beschrieben.

#### 3.2 Baugrundaufschlüsse

Zur Ermittlung der Böschungsstandsicherheit und Planung der Böschungen wurden vor der Entwurfs- und Ausführungsplanung direkte Erkundungsaufschlüsse im Bereich der Trasse und am Rande der Böschungen in Anlehnung an DIN 4020 abgeteuft.

Aus den direkten Aufschlüssen wurden Bodenproben entnommen, an denen die herkömmlichen Laborversuche wie Rahmenscher- und Triaxialversuche etc. durchgeführt wurden. Daraus konnten für die einzelnen Baugrundschichten charakteristische Bodenkennwerte abgeleitet werden. Bei Böschungen im Lockergestein wurde anhand dieser Angaben das Baugrundmodell mit Kontinuums-Kennwerten abgeleitet.

Im geschichteten Fels mit Wechsellagerung der Felsentfestigungszone/angewittertem Fels lassen sich hingegen die Kontinuums-Kennwerte nicht so einfach herleiten. Bodenmechanisch stellt sich der Fels als Diskontinuum dar. Üblicherweise werden im Fels je Schicht Laborversuche für die Ermittlung der Gesteinskennwerte und Kennwerte auf Fels-trennflächen durchgeführt.

#### 3.3 Großtriaxialversuche

Um Kontinuums-Kennwerte für das geschichtete Festgestein der Felsentfestigungszone und des angewitterten Felses zu erhalten wurden im Jahr 2010 vom Institut für Boden- und Felsmechanik des Karlsruher Institutes für Technologie (KIT) in den o.g. Einschnitten jeweils drei Großbohrkerne für Großtriaxialversuche mit einem Durchmesser von 0,6 m und einer Höhe von etwa 1,0 m entnommen (Abb. 5).



Abb. 5: NBS Ebensfeld – Erfurt, Voreinschnitt Nord Tunnel Lichtenholz (Fotos:ARCADIS/DB AG)

Fig. 5: HSL Ebensfeld – Erfurt, precut north of Tunnel Lichtenholz

Die Probennahmen konnten erst während des Auffahrens der Einschnitte erfolgen, da die Grundstücke zum Zeitpunkt der Planung für einen Großscharf noch nicht zugänglich waren.

Die Versuche wurden in Anlehnung an die Empfehlung des AK 3.3 der DGGT „Dreiaxiale Druckversuche an geklüfteten Großbohrkernen“ und „Suggested Methods for large Scale Sampling and Triaxial Testing of Jointed Rock“ der ISRM in Mehrstufentechnik durchgeführt.

Mit dieser Technik ist es möglich, die Grenzspannungszustände bei jeweils geänderten Randbedingungen wiederholt anzufahren. Die sprunghaften Änderungen der Deformationsrate dienen der Beurteilung der viskosen Eigenschaften des Gesteins. Abb. 6 und 7 zeigen die Großproben nach Versuchsende.

Ergänzend zu den Großtriaxialversuchen wurden große Rahmenscherversuche (ca. 20 x 12 cm) durchgeführt (Abb. 7). Die Versuche wurden in Anlehnung an die Empfehlung Nr. 13 „Laborscherversuch an Felstrennflächen“ des AK 3.3 der DGGT mit einer konstanten Schergeschwindigkeit von  $\dot{\gamma} = 0,5$  mm/min durchgeführt und ergeben die Kennwerte auf den Schichtflächen /Trennflächen/Klüften.

Die Versuchsergebnisse werden in der Standsicherheitsberechnung mit folgendem Berechnungsansatz berücksichtigt:

- Ansatz von Kontinuums-Kennwerten der Großtriaxial-Versuche in der „steilen“ Gleitfuge.
- Kennwerte aus den Rahmenscherversuchen in der schichtparallelen Gleitfuge.

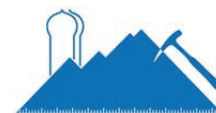


Abb. 6: Abgeschnittene Großtriaxialprobe des Feuerletten nach Versuch aus dem Voreinschnitt Nord Tunnel Lichtenholz (Fotos: KIT/DB AG)

Fig. 6: The large-scale triaxial sample of the Feuerletten from precut north of the Lichtenholz Tunnel is sheared-off after the test (Photogr.: KIT/DB AG)

Damit konnten die Bodenkenngrößen des Gutachtens und der Ausnutzungsgrad der Böschung mit den Berechnungsansätzen des erdbautechnischen Gutachtens überprüft werden. Dabei wurden die unteren Kennwerten aus den Großtriaxialversuchen angesetzt.



Abb. 7: Abgeschnittene Großtriaxialprobe und Rahmenscherversuch nach Versuch des Lias  $\delta$  aus dem Voreinschnitt Nord Tunnel Eierberge (Fotos: KIT/DB AG)

Fig. 7: Large scale triaxial sample and shear sample of Lias  $\delta$  of precut north of Tunnel Eierberge after test (Photogr.: KIT/DB AG)

### 3.4 Böschungssicherung durch Dübel

Wie an zwei Beispielen (Abs. 3.8) aufgezeigt, sind die planfestgestellten Böschungen (Böschungsneigungen < Regelleigungen) teilweise nicht ausreichend standsicher. Eine Abflachung der Böschungen war nicht möglich, so dass als Sicherungsmaßnahme eine Hangverdübelung mit Bohrpfählen aufgrund der tiefen Gleitfuge der Böschungsbruchberechnungen (siehe Abb. 12) ausgeführt wurde. Für die Bemessung von Bohrpfählen als Böschungssicherung liegen keine Vorschriften vor. Von ARCADIS wurde aufgrund umfangreicher Erfahrungen mit Sanierungen von Böschungen und Rutschhängen ein Berechnungsmodell (Dübelmodell) entwickelt. Gegenüber dem Dalbenmodell wird bei dem von ARCADIS entwickelten Dübelmodell ober- und unterhalb der Gleitfuge eine Einspannung des Bohrpfahles (Dübel) im Boden berücksichtigt (Abb. 8). In Höhe der Gleitfuge wird bei dem statischen System ein Querkraftgelenk (Q-Gelenk) abgebildet. Dieses Gelenk wird durch die Haltekraft bzw. Defizitkraft ( $\sum Q_{\text{Dübel, Bemessung}}$ ) blockiert. Die Kompatibilitätsbedingungen (gleiche Winkelverdrehung des Dübels oberhalb und unterhalb der Gleitfuge und gleiche Horizontalverschiebung) müssen erfüllt werden. Die Lasten verteilen sich über Bettungsspannungen (horizontale Bodenpressungen im Boden). Weitere Hinweise zu dem Dübelmodell finden sich in EL-MOSSALLAMY et al. (2006).

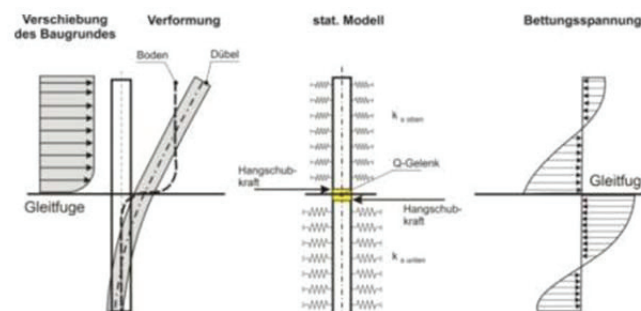


Abb. 8: Prinzipskizze Hangverdübelung (Dübelmodell)

Fig. 8: Schematic diagram of piles for slope dowelling

Die Bemessung der Bohrpfähle als Kreisquerschnitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist nach DIN 1045-1 und nach Heft 220 DAfStb geregelt. Die Bemessung nach dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist für Kreisquerschnitte nach den vorliegenden Vorschriften nicht eindeutig geregelt und kann unterschiedlich interpretiert werden.

In Abstimmung mit der DB ProjektBau wurde der erforderliche Bewehrungsgrad der Pfähle auf den Grenzzustand der Tragfähigkeit und nicht auf eine Rissbreite von 0,2 oder 0,3 mm begrenzt, da die Bohrpfähle nicht planmäßig auf Biegung beansprucht werden und nur zur rechnerischen Sicherheit des Hanges hinsichtlich erdstatischer Nachweise dienen.

### 3.5 BöschungsfILTER

Als Verwitterungsschutz und für das gezielte Ableiten von Oberflächen-, Schicht- und Grundwasser wurden die Böschungen flächig mit einem 1 m mächtigen, filterstabilen zwei-schichtigen BöschungsfILTER abgedeckt. Die treppenförmig profilierten Böschungen werden dabei mit gebrochenem Kiessand der Körnung 0/32 und darüber mit Hart-

steinmaterial 0/100 abgedeckt (Abb. 10). Damit der Filter sich nicht zusetzt wurde der Schluffanteil auf  $< 5\%$  begrenzt.



Abb. 9: Bauzustand Voreinschnitte Nord Tunnel Eierberge (links) und Tunnel Lichtenholz (rechts) (Fotos: ARCADIS/DB AG)

Fig. 9: Northern precuts of Nord Tunnel Eierberge (left) and Tunnel Lichtenholz (right) under construction

Der Filter ist unmittelbar nach dem Aushub und der treppenartigen Profilierung der Böschung aufzubringen, damit die anstehenden Böden ihren natürlichen Wassergehalt und somit ihre Scherfestigkeit nicht verlieren. Der Böschungsfiler wurde mit einer Nassansaat aus Magerrasen oder 10 cm Oberboden begrünt.

### 3.6 Entspannungsbohrungen

Zur Absenkung der gespannten Grundwasserverhältnisse im Einschnitt wurden Entspannungsbohrungen ( $\varnothing 0,6\text{ m}$ ) beidseitig alternierend entlang der Trasse hergestellt. Das Wasser wird am perforierten Kopf der Entspannungsbohrungen seitlich in die Tiefenentwässerung frostfrei abgeleitet (Abb. 10). Während des Bauzustandes konnten die Entspannungsbohrungen beumpft werden, um die Grundwasserabsenkung zu beschleunigen.

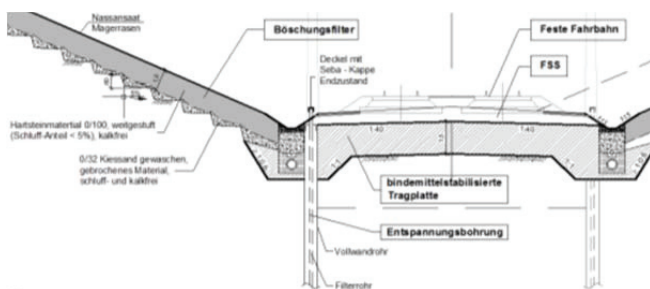


Abb. 10: Entspannungsbohrungen und bindemittelstabilisierte Tragplatte

Fig. 10: Relief drillings and binder stabilised bearing slab

### 3.7 Bindemittelstabilisierte Tragplatte

Bei der Trasse wurde das von ARCADIS entwickelte Erdbaukonzept angewendet. Danach wird eine bindemittelstabilisierte Tragplatte  $\geq 0,4\text{ m}$  bzw. bindemittelstabilisierte Dämme als homogene Linienbauwerke mit Bindemittelgehalten zwischen  $\geq 4$  und  $10\text{ M}\%$  hergestellt, um Setzungsunterschiede im Untergrund auszugleichen (Abb. 10).

Im Bereich quellfähiger Tonsteine, wie z.B. des Feuerletten, wurde die Tragplatte als Schutz vor unkontrolliertem Was-

serzutritt auf  $1,5\text{ m}$  verstärkt und die Tiefenentwässerung in die gevoutete Tragplatte integriert.

## 3.8 Einschnitt Nord Tunnel Eierberge

### 3.8.1 Entwurfsplanung

Die Böschungen im etwa  $20\text{ m}$  tiefen Voreinschnitt Nord des Tunnels Eierberge sind gemäß Planfeststellung mit einer Neigung von  $1:2,8$  links der Bahntrasse und  $1:2,2$  rechts der Bahn geplant (Abb. 11).



Abb. 11: Voreinschnitt Nord Tunnel Eierberge

Fig. 11: Northern precut Tunnel Eierberge

### 3.8.2 Geologie und Grundwasser

Im Voreinschnitt Nord des Tunnels Eierberge stehen unter GOK bis  $14\text{ m}$  mächtige Hang- und Decklehme an. Unter den quartären Deckschichten folgen Festgesteine des Unteren Jura (Lias  $\delta$ ). Die Felsersatz- (VZ) und Felsentfestigungszonen (VE nach „Merkblatt Felsbeschreibung für den Straßenbau“ des FGSV) sind jeweils rd.  $5\text{ m}$  mächtig. In die Tonsteine sind Kalkmergelknollen von  $5$  bis  $20\text{ cm}$  Größe eingelagert. Darunter folgen angewitterte bis unverwitterte Ton- und Schluff-, sowie Mergel- und Kalksteine.

Die Gesteine des Lias  $\delta$  fallen mit  $1$  bis  $1,5^\circ$  nach SE bis SSE ein. Die Klüfte sind orthogonal zueinander ausgebildet, mit Kluftabständen zwischen  $5$  und  $30\text{ cm}$ . Schicht- und Kluftflächen sind vorherrschend ebenflächig bis glatt, die Klüfte eben bis gewellt sowie glatt bis rau ausgebildet. Das gespannte Grundwasser steht in Trassenachse bis etwa  $2,5\text{ m}$  unter GOK Urgelände an.

### 3.8.3 Bodenkenngößen

In Tab. 1 sind die charakteristischen Bodenkenngößen als Rechenwerte zusammengestellt. Diese wurden anhand herkömmlicher Laborversuche bzw. mit den Großtriaxial- und ergänzenden Rahmenscherversuchen ermittelt. Der über die Großtriaxialversuche ermittelte Zähigkeitsindex  $I_{v\alpha}$  liegt bei  $4,4\%$ .

### 3.8.4 Standsicherheitsberechnung

Die Standsicherheit des Einschnittes wurde an maßgebenden Querprofilen nach DIN 4084:1981-07 (nach globalem Sicherheitskonzept) und DIN 4084:2009-01 (nach Teilsicherheitskonzept der DIN 1054: 2010) berechnet. In Abstimmung mit der DB ProjektBau war für den Endzustand ein Sicherheitsniveau von  $\eta \geq 1,3$  bzw.  $\mu \leq 1,0$  zu erreichen. Sofern keine ausreichende Standsicherheit nachzuweisen war, wurden die Defizitkräfte ermittelt. Nach dem Teilsicherheitskonzept der DIN 1054:2010 lassen sich bei den Standsicherheitsberechnungen keine charakteristischen Defizitkräfte mehr direkt ermitteln, so dass diese nach alter DIN 4084:1981-07 berechnet wurden.



Tab. 1: Bodenkenngrößen Voreinschnitt Nord Tunnel Eierberge  
Tab. 1: Soil parameters precut north of Tunnel Eierberge

	Wichte		Gesteinskennwerte		Kennwerte Felstrennfläche		Großtriaxialversuche	
	$\gamma / \gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi'$ [°]	$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]					
Hang-/Decklehm	21/11	22-25	5-10					
Lias $\delta$ VZ/VE	21/11	17,5-20	5-10					

Lias $\delta$	$\gamma / \gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi'_G$ [°]	$c'_G$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi'_F$ [°]	$c'_F$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi'$ [°]	$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi'_{r,0}$ [°]
VE/VA	23/13	30	100-300	17,5-20	5-10	42,1	54	33,6
VA/VU	24/14	30	$\geq 500$	20	10-15			

Die Standsicherheitsberechnungen wurden im Lockergestein mit gekrümmten Gleitflächen nach Krey/Bishop (Abb. 12, oben) und mit gebrochenen Gleitfugen nach Janbu (polygonale Gleitflächen) durchgeführt. Der Baugrund wurde als geschichteter Baugrund mit Gesteinskennwerten und Kennwerten auf Felstrennfläche abgebildet. Maßgebend für die Gesamtstandsicherheit der Böschungen sind die tiefer liegenden Gleitfugen im Fels.

Die Standsicherheiten der Böschungen wurden

- mit den Kennwerten des Gutachtens und
- den Ergebnissen aus den Großtriaxialversuchen

durchgeführt.

Die Ergebnisse und die Ermittlung der erforderlichen Defizitkräfte sind in Tab. 2 zusammengestellt. Die bahnseitig linke Böschung war damit ausreichend standsicher. Für die bahnseitig rechte Böschung konnte mit den Kennwerten des Gutachtens keine ausreichende Standsicherheit nachgewiesen werden. Hier wurde eine Sicherung mit Bohrpfählen (Hangdübel) erforderlich, um die Defizitkräfte aufzunehmen.

Tab. 2: Ergebnisse der Standsicherheitsberechnungen und Ermittlung der erforderlichen Defizitkräfte

Tab. 2: Results of stability analyses and determination of required deficiency forces

Kennwerte	Böschung seitlich der Trassenachse	Sicherheit $\square$ (DIN 1054: 1976/ DIN 4084: 1981)	Defizitkraft kN/m	Ausnutzungsgrad $\square$ (DIN 1054: 2010 / DIN 4084:2009)
gekrümmte Gleitkörper nach Krey/Bishop				
Gutachten	links	1,37	-	0,91
	rechts	1,23	64,4	1,02
gebrochene Gleitkörper nach Janbu				
Gutachten	links	1,40	-	0,83
	rechts	1,19	337,8	1,05
Großtriaxialversuch	links	1,72	-	0,73
	rechts	1,36	-	0,92

### 3.8.5 Böschungssicherung durch Dübel

Aufgrund der unzureichenden Kräfte wurden bahnseitig rechts zwei Reihen Dübel (Bohrpfähle) mit lateralem Abstand von 5 m und mit einem Durchmesser 1,5 m sowie Pfahllängen von 12 bis 17 m hergestellt. Die beiden Dübelreihen wurden somit auf eine Defizitkraft von 1689 kN (= 5 m x 337,8 kN/m) bemessen.

Mit den Kennwerten aus den Großtriaxialversuchen wäre eine wirtschaftlichere Bemessung der Dübel der rechten Böschung (Reduzierung der Anzahl, Vergrößerung der Abstände) möglich gewesen. Die Ergebnisse der Großtriaxialversuche lagen zum Zeitpunkt der Entwurfs- und Ausführungsplanung jedoch nicht vor, bestätigen die auf der sicheren Seite liegenden Kennwerte des Gutachtens.

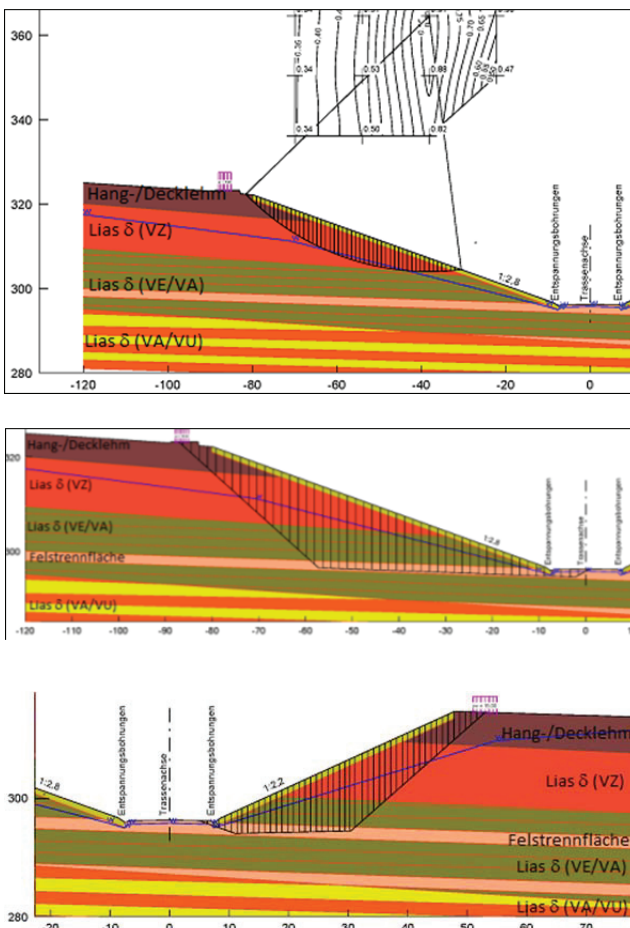


Abb. 12: Standsicherheitsberechnung links und rechts der Trassenachse mit Berechnungsverfahren nach Krey/Bishop (Bild oben) und nach Janbu mit gebrochenen Gleitflächen (Bilder mitte und unten)

Fig. 12: Stability analysis left and right of the route axis by method of Krey/Bishop (top) and by Janbu with fractured failure planes (centre and bottom)

### 3.8.6 Monitoring

Während und nach Auffahren des Einschnittes wurden die horizontalen Verformungen der Bohrpfähle messtechnisch an Setzungsmesspunkten überwacht; der Grundwasserspiegel wurde ebenfalls beobachtet.

Die horizontalen Verformungen der Bohrpfähle liegen im Bereich von wenigen mm und damit im unkritischen Bereich.

Die Absenkung des Grundwasserspiegels erfolgte zum Teil trotz des dichten Gebirges rasch mit Aushub des Einschnittes.

## 3.9 Einschnitt Nord Tunnel Lichtenholz

### 3.9.1 Entwurfsplanung

Die Böschungen wurden gemäß Planfeststellung beidseitig der Trasse mit einer Neigung von 1:2,3 geplant (Abb. 13). Der Voreinschnitt ist in Trassenachse bis zu 15 m tief.

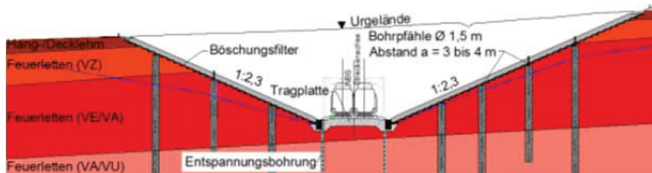


Abb. 13: Voreinschnitt Nord Tunnel Lichtenholz

Fig. 13: Precut north of Tunnel Lichtenholz

Beidseitig alternierend zur Trassenachse wurden zur Absenkung des gespannten Grundwassers Entspannungsbohrungen hergestellt.

Die Böschungen wurden mit einem 1 m mächtigen zweischichtigen Böschungsfiler abgedeckt.

Zur Vermeidung von unkontrolliertem Grundwasserzutritt zu den quellfähigen Feuerletten und zum Ausgleich von Setzungen/Hebungen wurde eine 1,5 m mächtige bindemittelstabilisierte Tragplatte hergestellt (Abb. 10).

### 3.9.2 Geologie und Grundwasser

Im Voreinschnitt des Tunnels Lichtenholz folgen unter einer Hang- bzw. Decklehmüberdeckung rote bis rotbraune Ton- und Schluffsteine des Mittleren Keupers (Feuerletten).

Diese sind im 3-4 m mächtigen Bereich zu bindigem Lockerboden bzw. stark mürbem Fels zersetzt. Die Felsersatzzone (VZ nach „Merkblatt Felsbeschreibung für den Straßenbau“ des FGSV) liegt als stark schluffiger bzw. stark toniger Schluff mit geringen Sandbeimengungen vor. Darunter folgen bis zu einer Tiefe von rd. 25 m unter GOK Urgelände völlig entfestigte, teilweise angewitterte Tonsteine mit schlechter bis mäßiger Kornbindung (VE/VA). Im Feuerletten wurden vereinzelt Harnische festgestellt.

Die Schichten sind 5-7° in Richtung SW geneigt. Die Klüfte sind orthogonal zueinander ausgebildet, mit Kluftabständen zwischen 5 und 30 cm.

Der natürliche Grundwasserspiegel steht im Ausgangszustand in Trassenachse bis etwa 2-3 m unter GOK Ausgangsgelände an und ist gespannt.

### 3.9.3 Bodenkenngrößen

Die charakteristischen Bodenkenngrößen wurden ebenfalls in herkömmlichen Laborversuchen und mit Großtriaxialversuchen sowie ergänzenden Rahmenscherversuchen ermittelt (Tab. 3). Die untere Grenze der Kennwerte der Großtriaxialversuche liegt hier etwa in der Größenordnung der Kennwerte des Gutachtens. Der über die Großtriaxialversuche ermittelte Zähigkeitsindex  $I_{v\alpha}$  des Feuerletten (VE/VA) beträgt 2,3 %.

Tab. 3: Bodenkenngrößen Voreinschnitt Nord Tunnel Lichtenholz

Tab. 3: Soil parameters precut north of Tunnel Lichtenholz

	Wichte	Gesteinskennwerte		Kennwerte Felstrennfläche		Großtriaxialversuche	
	$\gamma / \gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi'$ [°]	$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]				
Hang-/Decklehm	21/11	22-25	5-10				
Feuerletten VZ	20/10	20	15-20				
Feuerletten	$\gamma / \gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi'_G$ [°]	$c'_G$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\phi'_F$ [°]	$c'_F$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\phi'$ [°]	$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]
VZ/VE	21/11	22,5	50-75	15-17,5	5-10	24,6	49
VE/VA	22/12	22,5	100	17,5-20	10		

### 3.9.4 Standsicherheitsberechnung

Für die Standsicherheitsberechnungen wurde ein geschichtetes Baugrundmodell abgeleitet (Abb. 14). Innerhalb der Verwitterungsschichten wurden Schichten mit Gesteinskennwerten und mit Kennwerten auf Felstrennfläche gemäß Tab. 3 und des Gutachtens als Diskontinuum angesetzt. Für die Berechnungen mit den Kennwerten aus den Großtriaxialversuchen wurden für das gesamte Schichtpaket die Kontinuums-Kennwerte der Großtriaxialversuche in der steilen Fuge und die der Rahmenscherversuche in der flachen Gleitfuge angesetzt (Abb. 14 unten).

Im Lockerbodenbereich wurden die Standsicherheiten nach dem Verfahren von Krey/Bishop (Gleitkreisverfahren) berechnet (Abb. 14, oben). Die Standsicherheit im Fels wurde nach Janbu ermittelt (Abb. 14 Mitte und unten). Die Berechnungsergebnisse sind in Tab. 4 zusammengestellt. Bei den Böschungen sind sowohl mit den Kennwerten des Gutachtens als auch mit denen aus den Großtriaxialversuchen nicht ausreichend standsicher.

### 3.9.5 Böschungssicherung durch Dübel

Als Böschungssicherung sind beidseitig der Trasse jeweils 3 Dübelreihen mit einem Durchmesser von 1,5 m im Abstand von 3 m bzw. 4 m erforderlich. Bei einer Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Großtriaxialversuchen bereits in der Entwurfsplanung hätten die Pfähle gegenüber dem Gutachten aufgrund der geringeren Defizitkräfte (zwischen 390 und 1.090 kN bei einer Einflussbreite von 4 m) wirtschaftlicher bemessen werden können (z.B. Pfahlreihe reduzieren, Pfahlabstand vergrößern).

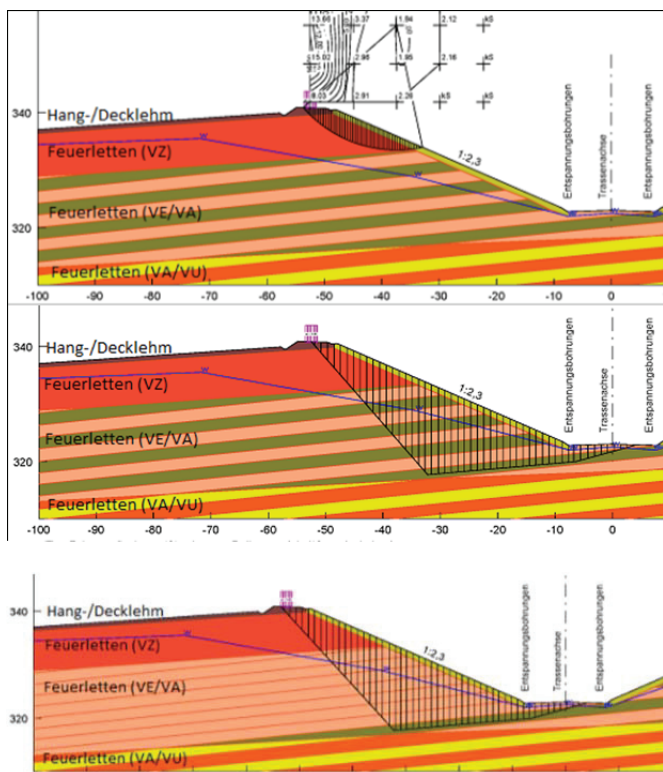


Abb. 14: Standsicherheitsberechnungen links der Trassenachse mit Berechnungsverfahren nach Krey/Bishop (Bild oben) und nach Janbu mit gebrochenen Gleitflächen (Bilder Mitte und unten)

Fig. 14: Stability analysis left of the route axis by method of Krey/Bishop (top) and by Janbu with fractured failure planes (centre and bottom)

Tab. 4: Ergebnisse der Standsicherheitsberechnungen und Ermittlung der erforderlichen Defizitkräfte

Tab. 4: Results of stability analyses and determination of required deficiency forces

Kennwerte	Böschung seitlich der Trassenachse	Sicherheit □ (DIN 1054: 1976/ DIN 4084: 1981)	Defizitkraft kN/m	Ausnutzungsgrad □ (DIN 1054: 2010 / DIN 4084:2009)
gekrümmte Gleitkörper nach Krey/Bishop				
Gutachten	links	1,94	-	0,65
	rechts	1,56	-	0,74
gebrochene Gleitkörper nach Janbu				
Gutachten	links	1,08	835,2	1,16
	rechts	0,89	1.981,7	1,41
Großtriaxialversuch	links	1,15	562,5	1,08
	rechts	0,91	1.884,1	1,37

Da die Großtriaxialproben erst beim Auffahren des Einschnittes entnommen werden konnten, war eine Optimierung der Bemessung im Zuge der Ausführungsplanung nicht mehr möglich.

### 3.9.6 Monitoring

Die Grundwasserstände im Einschnitt wurden während des Aushubes über die Entspannungsbohrungen und neu hergestellte bzw. vorhandenen Grundwassermessstellen beobachtet. Die Absenkung des Grundwasserspiegels erfolgte zum Teil trotz des dichten Gebirges rasch mit Aushub des Einschnittes.

Die horizontalen Verformungen der Bohrpfahlköpfe liegen im Bereich von wenigen mm und im unkritischen Bereich.

## 4 Zusammenfassung

An zwei Einschnitten der NBS Ebenfeld – Erfurt konnte beispielhaft aufgezeigt werden, dass die erforderlichen Sicherungsmaßnahmen auf der sicheren Seite liegend geplant wurden.

Die dauerhafte Sicherung der Böschungen aus verwitterungsempfindlichen Ton- und Schluffsteinen konnte erfolgreich mit Dübeln, BöschungsfILTER und Entspannungsbohrungen durchgeführt werden.

Die Abdeckung der abgetrepten Böschungen mit einem BöschungsfILTER als Verwitterungsschutz führt Oberflächen-, Schicht- und Grundwasser unterhalb der Frosteinwirkungszone gezielt ab. Dadurch behalten die Ton- und Schluffböden ihre natürliche Scherfestigkeit.

Die gespannten Grundwasserverhältnisse werden durch Entspannungsbohrungen dauerhaft abgesenkt, so dass die Tonböden durch den Wasserzufluss und Strömung am Böschungsrand nicht weiter aufweichen oder erodiert werden können.

Für die Übergangszone zwischen Felsersatz und angewittertem Fels machen die Vorschriften für den Standsicherheitsnachweis von Böschungen keine ausreichenden Vorgaben. Mit Großtriaxial- und ergänzenden Rahmenscherversuchen können realistische Kontinuums-Gebirgskennwerte für ein Baugrundmodell abgeleitet werden. Damit ist es möglich Standsicherheiten zu überprüfen und erforderliche Sicherungsmaßnahmen wirtschaftlicher zu planen.

Die Großtriaxialversuche sind besonders bei einem geschichteten Baugrund mit intensiver Wechselfolge aus Ton-/Schluff- und Sandsteinen geeignet um Kontinuums-Kennwerte abzuleiten.

Es wird empfohlen, für die Herstellung von Böschungen in verwitterungsanfälligem Gestein die beschriebenen Großversuche bereits in einer frühen Planungsphase (Entwurfsplanung) durchzuführen, um alle Möglichkeiten für eine wirtschaftliche Bemessung der Sicherungsmaßnahmen zu nutzen.

### Literatur

DIN1054 (2010): Baugrund – sicherheitsnachweise im erd- und Grundbau – ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1, 2010-12.

DIN 4084 (1981): Gelände – und Böschungsbruchberechnungen, 1981-07.



- DIN 4084 (2009): Baugrund – Geländebruchberechnungen, 2009-01.
- DIN 1045 (2008): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, 2008-08.
- DIN EN 1536 (2010): Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Bohrpfähle, 2010-12.
- RIL 836 (2008): Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instandhalten, 2008-10.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN UND VERKEHRSWESEN (1996): RAS-Q, RAS-Q - Richtlinien für die Anlage von Straßen - Teil: Querschnitte, Heft 295, 1996-09.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN UND VERKEHRSWESEN (1992): Merkblatt zur Felsbeschreibung für den Straßenbau - Heft 543.
- DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON E. V. (1979): Bemessung von Beton- und Stahlbetonbauteilen nach DIN 1045, Biegung mit Längskraft, Schub, Torsion - Nachweis der Knicksicherheit, Heft 220.
- EL-MOSSALLAMY, Y.; DÜRRWANG, R. (2006): Bauwerke in instabilen Hängen – Fallbeispiele. - Veröff. 16. Baugrundtagung, Bremen, 6.-9. April 2006, S. 49–53.