



Hängen oder Böschungen durch eine Verdübelung mit Bohrpfählen, die im Raster systematisch angeordnet zusätzliche haltende Schubkräfte in einer potentiellen Gleitfläche bereitstellen und so ein Standsicherheitsdefizit kompensieren. Der Schwerpunkt liegt dabei auf einem Baugrund aus geschichtetem Festgestein. Das Problem und der Wirkungsmechanismus einer solchen Verdübelung sind für einen Hang in geschichteten Gebirge in Bild 1 skizziert.

## Mechanisches Modell der Hangverdübelung

### Standsicherheitsanalyse

Die Standsicherheit eines Geländesprungs, hier einer Böschung, wird durch Vergleich der treibenden und haltenden Effekte beurteilt. Die treibenden entsprechen in der Sicherheitsphilosophie den Einwirkungen, die haltenden dem Widerstand. Im homogenen, durch Reibung und Kohäsion begabten Baugrund ist ein Versagen eines ebenen Gleitkörpers durch Rotation das am Häufigsten betrachtete Versagensmodell (Abb. 1). Das statisch unbestimmte System aus einzelnen Lamellen wird durch eine Annahme über Neigung oder Effekt der Erddruckkräfte zwischen den Lamellen auf ein statisch bestimmtes zurückgeführt. Die Standsicherheitsbedingung ergibt sich aus dem Momentengleichgewicht. Die treibenden und haltenden Momente,  $M_T$  und  $M_H$ , ergeben sich aus den Schnittkräften der einzelnen Lamellen und aus deren Radien bei einer Rotation des Gleitkörpers. Nach EC7 [1] und nationaler Auslegung [2] gilt:

$$R_d = \sum M_{H,d} \geq \sum M_{T,d} = E_d \quad (1)$$

$E_d$  ist der Bemessungswert der Summe aller treibenden Momente, der Bemessungswert  $R_d$  die Summe der haltenden Effekte. Im Fall der in Bild 2 dargestellten Rotation sind dies Momente der Gewicht- und der Scherkräfte, im Fall der reinen Translation, beim ebenen Gleiten des Bruchkörpers, wie dies in Bild 1 angedeutet ist, werden Kräfte als Einwirkung und Widerstand betrachtet.

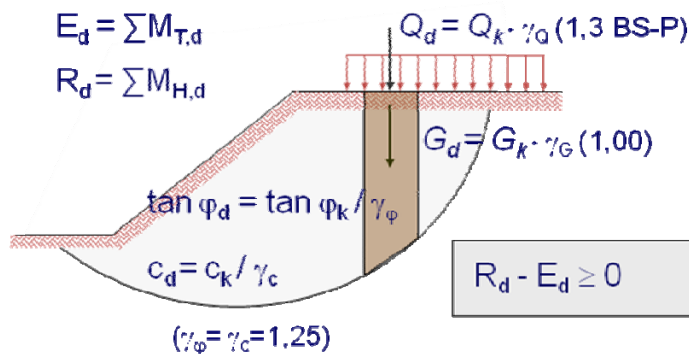


Bild 2: Sicherheitsdefinition zum Nachweis der Geländebruchsicherheit bei Rotation (Gleitkreisversagen)

Der Nachweis wird nach [2] im Grenzzustand GEO-3 geführt, bei dem die charakteristischen Scherwiderstände Reibung und Kohäsion durch die Teilsicherheitswerte  $\gamma_\varphi$  und  $\gamma_c$  abgemindert werden, während die Eigengewichtskräfte nicht faktorisiert werden ( $\gamma_G = 1,0$ ).

Der Ausnutzungsgrad  $\mu$  des Systems ergibt sich aus der Relation der Bemessungswerte von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit.



Bei geschichtetem Baugrund und speziell bei geschichtetem Fels, wie dies in Bild 1 angedeutet ist, scheint die Modellierung zunächst vergleichsweise einfach zu sein. Die Gleichgewichtsbedingungen entsprechen der Schiefen Ebene. Anstelle von Rotation ist der maßgebende Versagensmechanismus eine reine Translation mit einem Öffnen von orthogonalen oder zumindest anders geneigten Trennflächen.

Das Prinzip ist vereinfacht für eine ebene, böschungsparelle Gleitfläche und einer Porenwasserströmung in Bild 3 dargestellt.

Die Gleichgewichtsbedingungen lauten dann:

$$Z_d + \sum H_d \geq \sum T_d \quad (6)$$

$$\sum H_d = (G_k + P_k) \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi_d + c_d \cdot L + E_{p,d} \quad (7)$$

$$\sum T_d = (G_k \cdot \gamma_G + P_k \cdot \gamma_Q) \cdot \sin \beta + S_k \cdot \gamma_G \quad (8)$$

Für parallel zur Böschung verlaufende Gleitflächen vereinfacht sich die Grenzgleichgewichtsbedingung. Der Ausnutzungsgrad der Standsicherheit  $\mu$  ergibt sich dann nach Gl. 9

$$\mu = \frac{E_d}{R_d} = \frac{[(\gamma \cdot (1-m) + \gamma_r \cdot m) \cdot d + p_k \cdot \gamma_Q] \cdot \sin \beta}{[(\gamma \cdot (1-m) + \gamma' \cdot m) \cdot d + p_k] \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi_d + c_d + \frac{Z_d}{L} + \frac{E_{p,d}}{L}} \quad (9)$$

$\gamma$  = Wichte des die Gleitfläche überlagernden Gebirges

$\gamma'$  = Wichte des die Gleitfläche überlagernden Gebirges unter Auftrieb

$\gamma_r$  = Wichte des die Gleitfläche überlagernden wassergesättigten Gebirges ( $\gamma_r = \gamma' + \gamma_{Wasser}$ )

und hieraus der Bemessungswert des erforderlichen, auf die Tiefe 1 m bezogenen nach Gl. 10

$$Z_d \geq [(\gamma \cdot (1-m) + \gamma_r \cdot m) \cdot d + p_k \cdot \gamma_Q] \cdot L \cdot \sin \beta - [(\gamma \cdot (1-m) + \gamma' \cdot m) \cdot d + p_k] \cdot L \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi_d - c_d \cdot L - E_{p,d} \quad (10)$$

Bei dränierten Verhältnissen (keine Porenwasserströmung), Entfall der Stützkraft am Böschungsfuß ( $E_p = 0$ ) sowie ohne externe Auflast ( $p = 0$ ) gilt:

$$Z_d \geq \gamma \cdot d \cdot L \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \varphi_d) - c_d \cdot L \quad (11)$$

Da bei tiefen Gleitflächen mit hohem Spannungsniveau wie auch bei wasserführenden, offenen oder stark verwitterten Trennflächen die Kohäsion nur einen verhältnismäßig geringen Anteil zu den haltenden Kräften liefert, vereinfacht sich Gl (11) bei Vernachlässigung der Kohäsion zu

$$Z_d \geq \gamma \cdot d \cdot L \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \varphi_d) = G_{ges.} \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \varphi_d), \quad (12)$$

wobei  $G_{ges.}$  die Gewichtskraft der die Gleitfläche überlagernden Gebirgsmasse ist. Diese Gleichung veranschaulicht, dass der von den Dübeln aufzubringende erforderliche Scherwiderstand im Wesentlichen von der Relation des mobilisierbaren Reibungswinkels in der Gleitfläche zu deren Neigung und von der Tiefenlage der Gleitfläche abhängt. Eine Hangverdübelung ist als Maßnahme zur Erhöhung der Standsicherheit daher nur dann eine technisch und wirtschaftlich angemessene Maßnahme, wenn

- die Standsicherheit des Hanges oder der Böschung unter den gegebenen Bedingungen noch nicht im Grenzzustand ist und die Dübel lediglich eine zusätzliche Reserve zur Erhöhung der Standsicherheit bieten müssen,
- die Neigung der maßgebenden Gleitfuge flacher oder nur um wenige Grade steiler geneigt ist, als der mobilisierbare Reibungswinkel und
- die zu verdübelnde Gleitfläche nicht allzu tief unter Gelände verläuft.

Bei steil verlaufenden, tiefen Gleitflächen, die sich nahe dem Grenzzustand befinden, ist eine Verankerung mit Vorspannung das Mittel der Wahl. Im Gegensatz zu den nur auf Schub und Biegung belasteten Dübeln kann damit durch die Vorspannung in der Gleitfläche zusätzliche Reibung mobilisiert werden.

Bis hierhin scheint die Modellierung der Grenzbedingung und die Ermittlung des zusätzlich erforderlichen Schubwiderstandes  $Z$  einfach und unproblematisch zu sein. In der Praxis erheben sich jedoch zwei grundlegende Probleme

Der erste Punkt ist die vereinfachte Annahme einer konstanten oder zumindest gleichmäßigen Spannungsverteilung infolge des Überlagerungsdrucks in der Gleitfläche. Diese Annahme setzt zum Einen eine vertikal verlaufende größte Hauptspannung voraus, was unter einer geböschten Fläche nicht gegeben ist. Zum Anderen impliziert diese Annahme die Linearität von Spannungsniveau und Scherwiderstand, sowie einheitliche Verwitterungs- und Lagerungsverhältnisse, was gerade in Verwitterungshorizonten fraglich ist. Die in obigem Ansatz enthaltene Annahme einer gleichmäßigen Spannungsverteilung führt i. A. zu einer Überschätzung der Standsicherheit und damit zu einer Unterschätzung der erforderlichen zusätzlichen Schubkräfte.

Der zweite Punkt betrifft das ingenieurgeologische Modell, die Identifikation des ungünstigsten Gleitkörpers und der in den Gleitflächen mobilisierbaren Widerständen. Besonders bei stark und unregelmäßig geschichtetem Gebirge benötigt ein wirklichkeitsnahes ingenieurgeologisches Modell neben einer sorgfältigen Erkundung und Interpretation der Ergebnisse eine Betrachtung der möglichen Streuung der insitu mobilisierbaren charakteristischen Kenngrößen.

### **Modellierung der Hangverdübelung**

Der einfachste Ansatz der Wirkungsweise von Bohrpfählen als Hangverdübelung ist der einer einschnittigen Scher-/Lochleibungsverbindung der Schichten ober- und unterhalb der Gleitfläche in Analogie zu einer nicht vorgespannten Schraube. In einfachen Rechenprogrammen zur Ermittlung der Böschungsstandsicherheit wird die zusätzliche haltende Kraft als Schubwiderstand über den Querschnitt der Bohrpfähle angesetzt. Dieses einfache Modell ist aber weder bei homogenem Boden, noch bei geschichtetem Gebirge angemessen, da im Gegensatz zu Stahl in den an der Deformation beteiligten Schichten wie auch im Dübel i. A. sehr unterschiedliche Steifigkeiten vorliegen. Zur Bemessung der Dübel muss deren Wirkungsweise berücksichtigt werden, i. e. die sich aus der Einwirkung und den unterschiedlichen Steifigkeiten der beteiligten Materialien resultierende Verformung im Grenzstand. Bild 4 zeigt das Prinzip der möglichen Verformungen für verschiedene Steifigkeitsrelationen (vgl. [3]).

Bei einem schlanken, in Relation zum Baugrund biegeweichen Dübel entspricht das Verformungsbild einem duktilen Stab, bei dem an zwei übereinanderliegenden Stellen ober- und unterhalb der Gleitfläche der Grenzzustand der Biegefestigkeit in Form von Fließgelenken erreicht wird (Bild 4a).

Der Dübel wird mit der Deformation auch axial auf Zug belastet, so dass zusätzlich zu den Schubwiderständen eine Mantelreibung im Sinne eines Herausziehwiderstandes aktiviert werden kann. Dieser Fall charakterisiert relativ dünne Pfähle im geschichteten Gebirge, in dem eine massive verwitterte Schicht abgleitet.

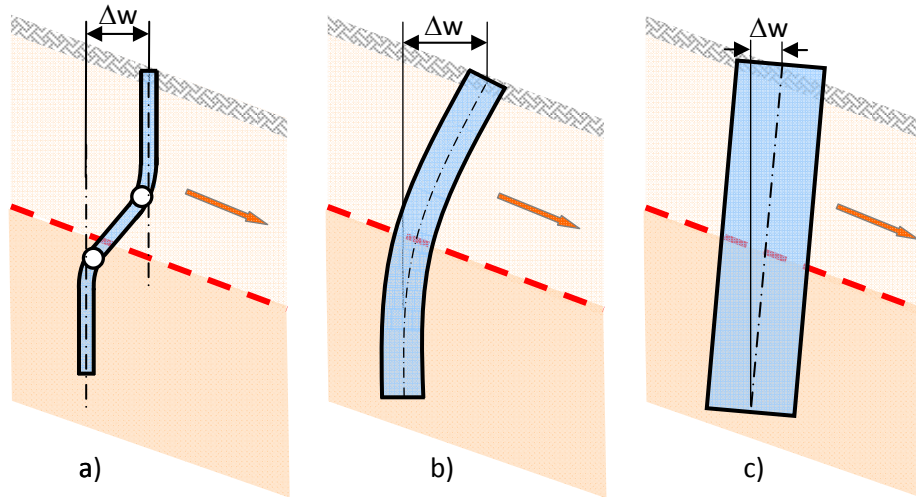


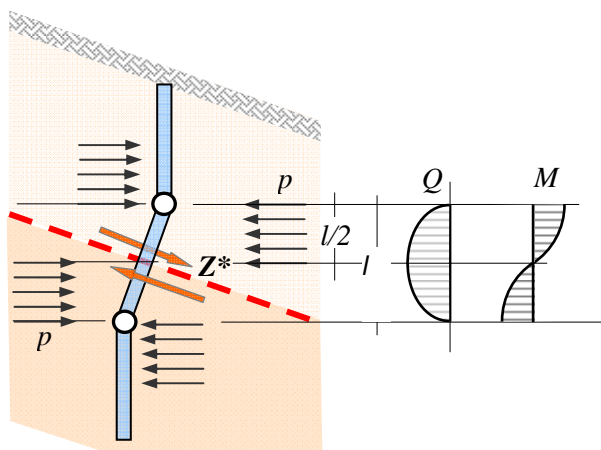
Bild 4: Wirkmechanismen einer Verdübelung a) schlank duktil, b) biegesteif, c) starr

Das Verformungsbild eines biegesteifen Pfahles ist charakteristisch für einen in das unbewegte Gebirge eingespannten Dübel, der oberhalb der Gleitfläche eine gleichförmige Querbelastung erhält, die er über die Einspannung abträgt (Bild 4b). Diese Bedingungen wird auch Dalben-Situation genannt. Das Verformungsbild ist charakteristisch für einen Hangschub infolge Kriechen einer Felsüberlagerung. Der Dübel wird mit dem Fließdruck der abgleitenden Überlagerung belastet. Im Gebirge unterhalb der Gleitfläche kann der Pfahl elastisch gebettet modelliert werden.

Eine Verformung des Dübels in der Art eines starren Pfahles, wie dies in Bild 4c skizziert ist, ist untypisch und ineffektiv für eine Hangverdübelung. Der Schubwiderstand kann so nur unvollkommen mobilisiert werden. Ein derartiges Verformungsbild stellt sich bei einer zu geringen Einbindetiefe eines gedrunenen Pfahles ein. Dies kann auch auftreten, wenn sich infolge der Verdübelung eines Hanges die Gleitschichten zur Tiefe hin verlagern.

In der Ingenieurpraxis haben sich die in [3] dargestellte auf HUDER [4] zurückgehende Dübeltheorie und das Berechnungsmodell als elastisch gebetteter Pfahl mit Querkraftgelenken in der Gleitfläche durchgesetzt.

Die Dübeltheorie von HUDER [4] geht von einer gleichmäßigen Beanspruchung durch eine Auflagerspannung  $p$  zwischen den sich bildenden Gelenken aus (Bild 5). Der vom Dübel zu mobilisierende Schubwiderstand  $Z^*$  ist die maximale Querkraft im Zentrum der Gleitfläche.



Die größte Biegebeanspruchung beträgt

$$\max M = \frac{p \cdot l^2}{8} = \frac{Z^*^2}{2p} \quad (13)$$

Mit diesem groben Modell kann ein einfacher Zusammenhang zwischen dem auf den Dübel wirkenden Anteil des erforderlichen Schubwiderstand  $Z^*$  und der

Bild 5: Modell und Schnittkräfte Dübeltheorie [3,4]

Biegebanspruchung zur Bemessung des Pfahles hergestellt werden. Die Querbelastung  $p$  entspricht bei Lockergestein und zersetztem Fels der Spannung des räumlichen Erdwiderstandes  $spa e_p$ . Bei entfestigtem und zersetztem Fels, wie auch bei kriechfähigen, sich viskos verformenden Böden kann in Analogie zum Fließdruck auf Pfähle eine Querbelastung von ca.  $7 \cdot c_u$  ( $c_u$ = undrainierte Kohäsion) auf den axialen Pfahlquerschnitt im Bereich der Rutschmasse angesetzt werden, was mit einem kleinen Sicherheitszuschlag der 4-fachen einaxialen Druckfestigkeit  $q_u$  des Gebirges entspricht:

$$p \cong 4 \cdot q_u \leq spa e_p \quad (14)$$

Universeller und an die ingenieurgeologische Situation anpassungsfähiger ist die Modellierung des Dübels als beidseitig elastisch gebetteter Pfahl, der im Bereich der Gleitfläche ein Querkraftgelenk hat. Dieses auf SOMMER & BUCZEC [5] zurückgehende, auch in [6] vorgestellte Modell, das sich in der deutschen Ingenieurpraxis durchgesetzt hat, geht davon aus, dass das Gelenk durch den auf den Pfahl wirkenden Schubwiderstand  $Z^*$  blockiert wird. Der Pfahl erfährt oberhalb und unterhalb der Gleitfuge die gleiche Winkelverdrehung und Horizontalverschiebung. Das Prinzip der Belastung, Bettung und Verformung und die sich daraus ergebenden Schnittkräfte sind in Bild 6 dargestellt.

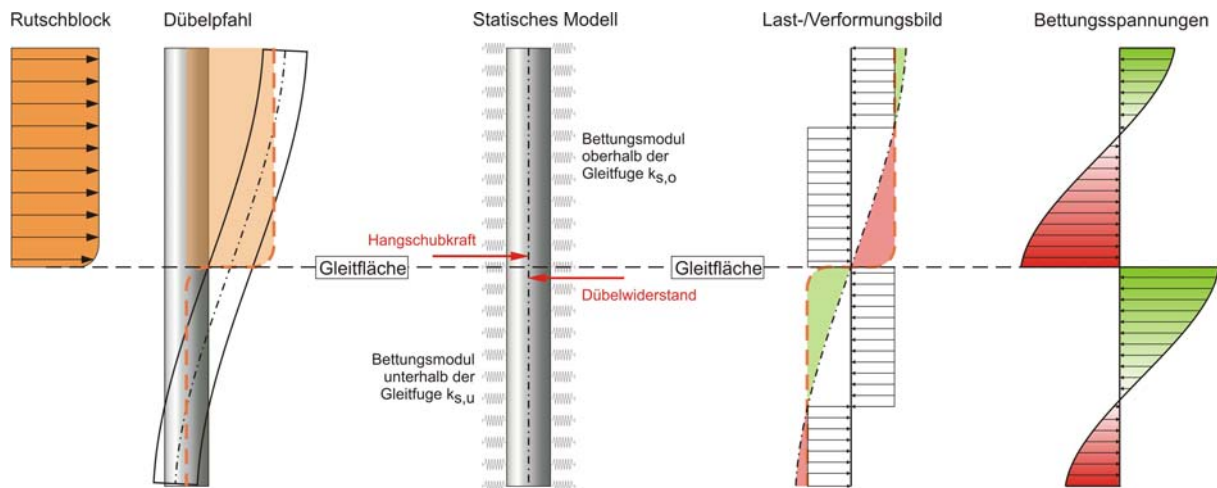


Bild 6: Belastungsfigur, Verformungsbild und Schnittkräfte des Dübelmodells nach [5], Quelle [6]

Die Schwierigkeit in der Anwendung dieses Modells wie auch des Dalbenmodells, bei dem der Pfahl nur unterhalb der Gleitfläche eingespannt ist, liegt in der Festlegung der Bettung. In Anlehnung an [8] wird der maximale Bettungsmodell  $k_s$  der einzelnen Schichten aus dem Steifemodul  $E_s$  ermittelt:

$$k_s = \frac{\sigma(z)}{s(z)} \cong \frac{E_s}{D} \text{ für } D \leq 1 \text{ m}$$

$\sigma(z)$  = Bettungsspannung in der Tiefe  $z$

$s(z)$  = horizontale Auslenkung in der Tiefe  $z$

$D$  = Durchmesser des Pfahles

Die Summe der Bettungsspannungen oberhalb bzw. unterhalb der Gleitfläche entspricht dem vom Pfahl mobilisierbaren Schubwiderstand  $Z^*$ . Bei der Bemessung des Dübels als querbelasteter, elastisch gebetteter Pfahl muss zum einen die Verträglichkeit der Spannungen

geprüft werden, zum anderen die Sinnhaftigkeit des Ansatzes der Bettung in Größe und Verlauf. Nach eigenen Erfahrungen sollte im Rutschkörper nur ein Teil der maximal mobilisierbaren Bettung angesetzt werden, da sich sonst unrealistische Verformungsbilder des Pfahles ergeben. Die Pfahlverformung selbst hängt zwar von einer möglichen Verformung des Gebirges ab, stimmt aber damit nicht überein, da ja theoretisch der Boden den Dübel umfließt und erst dadurch der Schubwiderstand geweckt wird.

Die Erfahrungen mit der Planung und Bemessung von Hangverdübelungen zeigt, dass i. A. eine mehrreihige Pfahlanordnung erforderlich ist. Die Pfahlabstände  $e$  liegen im Bereich von 5 bis 7 m. der Mindestabstand beträgt  $3D$ . Zweckmäßige Durchmesser der Pfähle liegen zwischen 1,2 und 1,5 m. Der Bewehrungsgrad ist aufgrund der Biegebelastung relativ hoch und liegt erfahrungsgemäß bei 200 -250 kg/m<sup>3</sup> [6].

## Zusammenfassung

Eine Hangverdübelung mit Bohrpfählen ist eine bewährte und effektive Methode, um einen zusätzlichen Schubwiderstand in Böschungen und natürliche Hänge einzubringen. Die Methode eignet sich besonders bei potentiellen Gleitflächen, die in nicht allzu großer Tiefe, i. a. nicht tiefer als 15 m unter Gelände verlaufen. Bei einer viskos kriechenden Felsüberlagerung reduziert der Pfahlwiderstand die Kriechrate. Bei geschichtetem Gebirge wird ein zusätzlicher Schubwiderstand in die weicheren, verformungswilligen Schichten eingetragen, die als dünne oder auch massive Gleitschicht wirken können. Die Wirkungsweise der Dübel besteht nur in der Aufnahme von Horizontalkräften in den rutschgefährdeten Schichten und deren Abtrag in tiefer, unbewegte Horizonte. Eine Vorspannung normal zu potentiellen Rutschflächen und damit ein zusätzlicher Reibungswiderstand wird damit nicht erreicht.

Schon aus Gründen der Herstellbarkeit sollte sich der Hang auch ohne Verdübelung zumindest noch im Grenzzustand befinden, da sonst zusätzlich temporäre Sicherungsmaßnahmen erforderlich werden. Dieses Verfahren ist damit überwiegend eine präventive Maßnahme zur Erhöhung des Sicherheitsniveaus oder dient zur Verlangsamung von periodischen Kriechverformungen eines Hanges.

Die Planung und Bemessung setzen eine zutreffende Beschreibung der ingenieurgeologischen Situation, die Kenntnis der Lage potentieller Gleitflächen und der insitu mobilisierbaren Scherparameter des Gebirges voraus. Dies gilt in besonderem Maße bei stark geschichtetem Gebirge, da hier die Tiefenlage und Mächtigkeit potentieller Verwitterungsschichten räumlich streuen.

Zur Bemessung der Verdübelung wird auf der Grundlage des ingenieurgeologischen Modells und des angestrebten Sicherheitsniveaus zunächst der erforderliche zusätzliche Schubwiderstand in Form einer in der Gleitfläche mobilisierten tangentialen Widerstandskraft ermittelt. Je nach Tragmodell und Gebirge wird der auf den Einzeldübel entfallende Widerstand als Querkraft und Bettungsspannung zur Bemessung der inneren Standsicherheit des Bohrpfahles herangezogen.



## Literatur

- [1] DIN EN 1997-1:2009-09, Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004+AC:2009
- [2] HANDBUCH EUROCODE 7: Geotechnische Bemessung. Band 1: Allgemeine Regeln. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1. Auflage 2011
- [3] BRANDL, H., 2009: Stützbauwerke und konstruktive Hangsicherungen. In Witt, K. J. 2009: Grundbau-Taschenbuch, Teil 3: Gründungen und geotechnische Bauwerke, Ernst & Sohn, Berlin, 2009
- [4] HUDER, J., 1983: Stabilisierung von Rutschungen mittels Ankern und Pfählen. Schweizer Ingenieur u. Architekt, H. 16/1983
- [5] SOMMER, H., BUCZEK, H. 1987: Zur Stabilisierung von Rutschungen in Tonhängen mit biegesteifen Elementen – Berechnung nach dem Hyperbelansatz. Mitteilungen des fachgebietes Grundbau, Boden- und Felsmechanik, GH Kassel, Heft 1, 1987
- [6] EL MOSALLAMY, Y., DÜRRWANG, R., 2006: Bauwerke in instabilen Hängen – Fallbeispiele. Vorträge der Baugrundtagung 2006 in Bremen. Tagungsband DGGT, S. 343-348
- [7] WITT & PARTNER GEOPROJEKT GMBH, 2011: BAB A4 Eisenach-Görlitz, Böschungssanierung mit Dübelpfählen , Statische Berechnungen, unveröffentlichter Projektbericht DEGES, Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GMBH, Berlin
- [8] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK, DGGT [Hrsg.], 2012: Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle. Verlag Ernst & Sohn 2012"

## Autor

Prof. Dr. Ing. Karl Josef Witt  
Professur Grundbau  
Bauhaus-Universität Weimar  
Coudraystraße 11c  
99425 Weimar

[kj.witt@uni-weimar.de](mailto:kj.witt@uni-weimar.de)