

Gefährdungseinschätzung natürlicher Hänge im Geschiebemergel als Aufgabe der Ingenieurgeologie

Stability assessment of naturally established till slopes as a task of engineering geology

Joachim Tiedemann¹

¹ Prof. Dr. J. Tiedemann, Fachgebiet Ingenieurgeologie, Technische Universität Berlin, tiedemann@tu-berlin.de

Zusammenfassung

Zu den geotechnisch nur schwer einschätzbaren Gesteinen gehören die eiszeitlich entstandenen Geschiebemergel Norddeutschlands. Sie bilden örtlich, vor allem im Bereich von Flüssen und Küsten, teilweise mehrere Dekameter hohe, oft sehr steile Böschungen. Werden solche natürlich in Geschiebemergeln angelegten Böschungen das Ziel von Einschätzungen ihrer Sicherheit gegenüber Böschungsbruch, dann stoßen die standardmäßigen Strategien und Verfahren zur geotechnischen Erkundung, Charakterisierung und erdstatischen Berechnung an Grenzen. Ursächlich dafür ist die geologische Entwicklungsgeschichte der Mergel als gemischtkörnige Böden mit einer extremen Bandbreite an strukturellen und stofflichen Merkmalen; im Großen wie im Kleinen. Vor diesem Hintergrund gewinnen in der Planungsphase ingenieurgeologische Plausibilitätsüberlegungen gegenüber schematischem Abbohren an Bedeutung, bei Bedarf ergänzt durch baubegleitende Untersuchungen. Die charakteristischen Scherparameter können nur durch sog. „Rückrechnungen“ ermittelt werden.

Schlüsselworte: Geschiebemergel, natürliche Böschungen, risikobasierte Erkundung, ingenieurgeologische Plausibilitätsprüfungen, charakteristische Scherparameter, Rückrechnung von Böschungen

Abstract

Tills of the Weichselian glaciation belong to the soils which cause difficulties for geotechnical estimation. Till slopes forming by coastal erosion and river incision often have heights in the order of few tens of metres. When the slope stability of such slopes is to be assessed, the procedures and strategies used as standard for the geotechnical reconnaissance, characterization and earth static analyses reach their limit. The reason for this can be found in the history of development of the tills into mixed particle soils with an extreme range of spatially disordered structural and material properties. Whereas till layers taken as a whole are relatively homogeneous on a scale of few metres, their characteristics can change totally. Thus, engineering geological plausibility checks during the planning phase have more relevance than expensive reconnaissance by means of grid shaped drilling patterns. If necessary during the construction phase, accompanying reconnaissance should be specifically applied.

In case undisturbed soil samples are available, the values of cohesion and friction angle determined by laboratory tests are widely varying. But in the majority of the cases, the obtaining of undisturbed representative samples is impossible. The only workaround in such cases to approximately determine characteristic values of the shear parameters is the inverse calculation of shear parameters from documented slope failures or from slopes in a “unstable equilibrium”.

Keywords: till, natural slopes, risk based approach of reconnaissance, engineering geological plausibility checks, characteristic values of shear parameters, back-analysis of slopes

1 Einleitung

Nach heutigem Erkenntnisstand sind die quartären Landschaften Nordmitteleuropas von drei großen Vereisungszyklen betroffen worden, denen sich mehrere Eisvorstoß- und Eiszerfallsphasen zuordnen lassen. Die großen Vereisungsphasen wurden von Warmzeiten mit z.T. höheren Jahresmitteltemperaturen als heute unterbrochen [1]. Infolge der Eisvorstöße von Skandinavien aus mit bis zu 1000 m mächtigen Gletschern wurden schichtungslöse Grundmoränenpakete abgesetzt, die anschließend ganz oder teilweise durch Schmelzwasser erodiert wurden. Wo die Grundmoränen heute als Geschiebemergeldecken, insbesondere der jüngsten Vereisungsphase (Weichsel), als sogenannte Hochflä-

chen erhalten geblieben sind, bilden sie mehrere Meter bis Dekameter mächtige lithologische Einheiten, die oft von Schmelzwasserablagerungen unterlagert werden.

Wo ausgeprägte Hochflächen infolge erosiver Vorgänge an Flussufern oder im Küstenbereich von Nord- und Ostsee angeschnitten wurden, bilden die Geschiebemergel steile, oftmals senkrechte natürliche Böschungen, die über lange Zeit standfest sind (Abb. 1). Standardstrategien zur geotechnischen Erkundung, Modellierung und rechnerischen Beurteilung solcher Böschungen führen meist zu unbefriedigenden Ergebnissen, da mit diesen die große Variabilität der Mergel nicht adäquat berücksichtigt werden kann. Im Vordergrund der folgenden Betrachtungen stehen die weichselkaltzeitlichen Geschiebemergel.



Abb. 1: Weichselkaltzeitlicher Geschiebemergel mit Geschiebe und steilstehenden Klüften (aus [2]).

Fig. 1: Weichselian till showing boulders and steep inclining joints (from [2]).

2 Substrat und Struktur

Das Substrat von Geschiebemergel ist das Ergebnis von mehreren geologischen Prozessen, die sich in dem heutigen Material überlagern. Gletscher transportieren Gesteinsmaterial auf ihrer Oberfläche in Form von Seiten- und Mittelmoränen. Ferner werden Komponenten im Inneren des Eises transportiert, indem sie z.B. von der Sohle ausgehend vom Eis aufgenommen und aufgearbeitet werden. Dabei kann es sich um quasi neu von diesem Eis mitgeschlepptes Material handeln oder z.B. auch um Ablagerungen älterer Vereisungsphasen. Alles gemeinsam wird in den Grundmoränen akkumuliert, die nach Abschmelzen des Eises zutage treten und im Falle kalkiger Bindung der Komponenten als Geschiebemergel bezeichnet werden.

Die Korngrößenverteilungen der Geschiebemergel haben einen typischen Verlauf, der vom Feinstkorn bis in den Kieskornbereich reicht mit Ungleichförmigkeitszahlen U , die meist zwischen 20 und 70 liegen und Krümmungszahlen C_c zwischen 0,6 und 7,5 [3, 4, 5]. Zu bedenken ist dabei, dass die meisten Korngrößenverteilungen an der beprobten Matrix von Geschiebemergel ermittelt wurden, die darin enthaltenen Grobbestandteile also nicht berücksichtigen. Gerölle und Findlinge können innerhalb der Mergelpakete in Form von Rinnen und Linsen aber auch einzeln vorkommen.

Die mineralogische Zusammensetzung von Geschiebemergeln lässt als Trend erkennen [3, 6], dass Quarz mit Mas-

senanteilen von 30% bis 50% vertreten ist, Feldspat mit 14% bis 18%, Calcit mit 7% bis 12%. Die restlichen Massenanteile entfallen auf die Tonminerale Kaolinit/Chlorit und Illit-Smektit-mixed layer sowie untergeordnet amorphe und andere Phasen. Der Anteil der quellfähigen Tonminerale an der Gesamtmenge der Tonminerale schwankt zwischen etwa 2% und 13%.

Typisch für Geschiebemergel ist die karbonatische Bindung der Bodenkörner, die allerdings im Bereich der Geländeoberfläche durch Lösung reduziert oder beseitigt worden sein kann. Dass die Lösung der Kalkzementation nicht tieferreichend ist, dürfte mit der geringen Wasserdurchlässigkeit der Mergel zu erklären sein. Inwieweit diese durch die weit verbreiteten Trennflächen in den Geschiebemergeln beeinflusst wird, kann hier anhand vorliegender Untersuchungen nicht beantwortet werden. Zahlreiche Schrägbohrungen im Zuge einer Bodenvernagelung in Oderberg haben keine Hinweise auf geöffnete oder wasserführende Trennflächen im Inneren des Geschiebemergels ergeben, obwohl darin offenbar steil stehende Trennflächen angelegt sind (s. Abb. 1). Dies wird hier auf nachweislich vorhandene quellfähige Tonminerale zurückgeführt. Die Trennflächensysteme in Geschiebemergeln erinnern bei glazitektonischer Verschuppung und Verfaltung infolge des Gletschervorschubs an diejenigen im Schiefergebirge. Fundamentale orthogonale Kluftsysteme infolge des glaziestatischen Drucks sind am ausgeprägtesten [7, 8, 9].

3 Bodenmechanische Charakterisierung

Die bodenmechanische Charakterisierung von Geschiebemergeln der Weichseleiszeit in Form von Bodengruppen nach DIN 18196 führt überwiegend zu den Einstufungen SU^* , ST^* , TL , UL , wobei es typisch ist, dass eine eindeutige Zuordnung infolge der vielfach nicht bestimmbarer Fließgrenze nicht möglich ist (z.B. [3], [4], [10]). Insofern fallen viele Mergel in die Zwischenbereiche TL/UL und vor allem SU^*/ST^* . Vom Feinkornanteil ausgehend werden in der Literatur (s.o.) die meisten weichselkaltzeitlichen Geschiebemergel den gemischtkörnigen Böden nach DIN 4022-1 zugeordnet, ein geringerer Anteil den feinkörnigen Böden. Wo Plastizitätszahlen bestimmt werden konnten, liegen die Werte für I_p größenordnungsmäßig im Bereich zwischen 2% und 10% [2, 5] mit einer deutlichen Häufung bei den schwach plastischen Mergeln. Die Konsistenzen der Geschiebemergel umfassen ein weites Spektrum zwischen weich und fest. Die Sättigungsgrade S_r der Mergel werden von [5] mit 80% bis 100% angegeben, von [4] mit rund 50% bis 100% und von [3] mit rund 80% bis 100%. Die Porenzahlen e schwanken bei [4] zwischen 0,2 und 0,7, bei [3] mit ca. 0,3 bis 0,4 in engeren Grenzen, wobei das von [3] beprobte Gebiet im Süden Berlins wesentlich kleiner ist als bei [4].

Die Ableitung von Scherparametern von den zustandsbeschreibenden Bodenparametern der Geschiebemergel ist eine für die geotechnische Praxis nach wie vor nicht zuverlässig gelöste Aufgabe. Entweder liegt den Korrelationen die von [11] als notwendige Voraussetzung für sinnvolle Clusterbildungen geforderte lithostratigraphische Analyse der Mergel nicht zugrunde oder die Cluster wurden nicht statistisch abgesichert oder die Datengrundlage ist zu ge-

ring. Insofern muss der Ansatz von [3], im Sinne von [11] von einer lithostratigraphischen Einheit ausgehend sowie von den hierfür bestimmten statistischen Momenten der bodenmechanischen Parameter multivariate Fuzzy-Clusteranalysen durchzuführen mit dem Ziel, korrelative Zusammenhänge zwischen zustandsbeschreibenden und Scherparametern aufzudecken, als Schritt in die richtige Richtung bewertet werden. Da aber auch innerhalb der Gruppe der weichselkaltzeitlichen Geschiebemergel eine große Variabilität vorhanden ist, ist dieser Ansatz zwar ein richtungsweisender wissenschaftlicher Beitrag mit praktischem Bezug, dessen Methodik jedoch auf Gebiete außerhalb des von [3] untersuchten Gebietes im Süden von Berlin erst angewandt werden müsste, um dort ähnliche Korrelationsmöglichkeiten nachweisen zu können.

Die Ermittlung charakteristischer Scherparameter von Geschiebemergel durch Scherversuche stößt ebenfalls auf multiple Probleme, die in der Literatur vielfach dokumentiert sind. Angesichts der veränderlichen Festigkeit der Mergel und der extremen Variabilität der Materialzusammensetzung im Kleinen sind veröffentlichte Mittelwerte größerer Versuchsreihen mit Reibungswinkeln zwischen 20° und 38° und Kohäsionswerten zwischen $0,2 \text{ kN/m}^2$ und 100 kN/m^2 nicht verwunderlich [3, 4, 12, 13]. Hierbei ist jedoch kritisch anzumerken, dass die in [3] und [11] geforderte geologische und statistische Absicherung der Datenpools mit Ausnahme von [3] unterblieben ist. Praxisnahe Beispiele, bei denen die Scherproben aus einem regional eng begrenzten Bereich ohne ausgeprägte Zementation der Mergel stammen, zeigen jedoch, dass auch hier die Scherparameter mit Werten zwischen $29,8^\circ/42,1 \text{ kN/m}^2$ und $35,7^\circ/16,7 \text{ kN/m}^2$ ein weites Spektrum umfassen [14].

Einschränkend hinsichtlich der Repräsentativität der veröffentlichten Scherparameter aus Laborversuchen an weichselkaltzeitlichen Geschiebemergeln ist der Umstand, dass ungestörte Proben aus kalkig zementierten Mergeln kaum gewinnbar sind, und die Grobanteile in den Mergeln nicht angemessen berücksichtigt werden können. Im Fall, dass die Scherwiderstände auf Trennflächen berücksichtigt wer-

den müssten, stoßen die versuchstechnischen Möglichkeiten ebenfalls an Grenzen. Dies alles ist bereits 1985 in [15] dargelegt worden.

Vor diesem komplexen Hintergrund stellen sich die Probleme einer angemessenen ingenieurgeologischen Erkundung solcher Geschiebemergel, der Festlegung charakteristischer erdstatischer Rechenwerte und Rechenansätze; hier in Bezug auf natürliche Böschungen.

4 DIN-gemäße ingenieurgeologische Erkundung und Ermittlung erdstatischer Rechenwerte als risikobasierte Annäherung

Vorhandenes geologisches Wissen und die Geländeaufnahme lassen die stoffliche und strukturelle Variabilität von Geschiebemergeln im Bereich natürlicher Böschungen qualitativ meist zutreffend einschätzen. Diese engräumige Variabilität, die innerhalb der Mergelpakete an keine Sedimentationshorizonte gebunden ist, durch direkte und indirekte Erkundungsmaßnahmen räumlich erfassen zu wollen, ist auch mit großem Erkundungsaufwand nicht möglich. Einzelne Kernbohrungen sollten deshalb vornehmlich auf die Erkundung der Grundwasserverhältnisse und den Abschluss bzw. die Verifikation vermuteter Ablösungsflächen angesetzt werden. Demgegenüber bieten Schürfe bessere räumliche Einblickmöglichkeiten und bessere Chancen für die Gewinnung ungestörter Proben unter Erhaltung der Kalkzementation.

Der Aufbau vieler natürlicher Böschungen im Geschiebemergel folgt einem Muster, bei dem die obersten Böschungsbereiche von steil bis senkrecht einfallenden Trennflächen gebildet werden, hinter denen sich in unmittelbarer Nähe zur Böschungsschulter weitere Trennflächen öffnen. Durch Lösung der Kalkbrücken zwischen den Bodenkörnern ebenso wie durch Spaltenfrost kommt es immer wieder zu Ablösungen von Mergel. Die mobilisierten Mergelpartien werden im unteren Teil der Böschungen akkumuliert, wo sie niederschlags- und vegetationsabhängig Böschungswinkel bis zu etwa 50° bilden können (Abb. 2).



Abb. 2: Sicherung einer natürlichen Böschung im Geschiebemergel mit verankerten Spritzbetonpfählern und Drainagebohrungen in Oderberg/Ostbrandenburg (Photo J. Scherschel)

Fig. 2: Stabilization of a natural till slope by means of anchored shotcrete pillars and drainage boreholes (photo: J. Scherschel).



Die Mergelkegel, die den intakten Mergel bis in Höhen von ca. 50-80% der gesamten Böschungshöhe stützen, sind wegen ihrer geringen Plastizität meist in Kriechbewegung begriffen, wie der Sichelwuchs der auf ihnen wachsenden Bäume vielfach anzeigt [2]. Da dadurch den intakten Mergelpfeilern die talwärtige Stützung sukzessive entzogen wird, geraten auch sie in Bewegung, wobei die vertikalen Trennflächen die bergwärtigen Ablösungsflächen bilden. Die sich ablösenden Mergelpfeiler belasten die unteren vorgelagerten Massen zusätzlich und können dadurch den Übergang der Kriech- in eine Gleitbewegung entlang einer kombinierten Gleitfläche oder mehrerer aufgelöster Gleitflächen verursachen. Für solche Systeme mit engräumigen Material- und Strukturwechseln sowie nicht ausreichenden Möglichkeiten der Bestimmung erdstatischer Rechenwerte auf experimentellem Weg empfiehlt die DIN 4020:2010-12 unter „Charakteristische Kenngrößen von Böden“

„(A3) Für das Kontinuum dürfen charakteristische Werte der Scherparameter nur dann unmittelbar aus Versuchen abgeleitet werden, wenn es keine Trennflächen enthält oder diese nicht wirksam werden können. Anderenfalls müssen die Scherparameter anhand von Modellvorstellungen über das Zusammenwirken von Gestein und Trennflächen oder über Rückrechnung von bestehenden Böschungen ermittelt werden.“

Folgt man diesem Passus, dann empfiehlt es sich, im Fall des Geschiebemergels, die mit der sog. „Rückrechnung“ verbundenen Parametervariationen für die bei diesem Boden extrem streuende Kohäsion unter Festlegung eines mittleren Reibungswinkels durchzuführen. Die notwendige Voraussetzung für diese Vorgehensweise müssen äußere, z.B. geodätische Anhaltspunkte für ein labiles Kräftegleichgewicht innerhalb der betreffenden Böschung sein.

Für die Tragwerksplanung zur Böschungssicherung sollte vom drainierten Zustand des Hangmaterials ausgegangen werden können, indem z.B. Entwässerungsbohrungen vorgesehen werden. Zu schlecht kalkulierbar wären anderenfalls mögliche Wasserdrücke auf Trennflächen oder innerhalb von sandigen oder groben Horizonten.

Während der Bauausführung (Abb. 2) sollte der betreffende Hang geodätisch überwacht werden, zumindest aber in engen Intervallen auf äußere Hinweise auf Hangdeformationen untersucht werden, und es sollten alle zusätzlichen Informationen, die sich aus Aushubmaßnahmen, Pfahlbohrungen, Pfahlversuchen etc. ergeben, zur Überprüfung des entwickelten ingenieurgeologischen Modells herangezogen werden bzw. Anlass zu baubegleitenden Erkundungsmaßnahmen geben.

Eine solche Vorgehensweise, die hier als „risikobasierte Annäherung der Untergrunderkundung“ bezeichnet wird, findet sich in der DIN 4020:2010-Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2 unter Absatz 2.2 „Abfolge von Baugrunduntersuchungen“:

(2) „Baugrunduntersuchungen sollten normalerweise in Etappen, abhängig von Fragen, durchgeführt werden, die sich während der Planung, des Entwurfs und der Bauaus-

führung des aktuellen Projektes ergeben. Die folgenden Etappen werden einzeln in Abschnitt 2 behandelt:

- Voruntersuchungen
- Kontrolluntersuchungen und baubegleitende Messungen“

5 Zusammenfassung

Zusammengefasst sollten die ingenieurgeologischen Modelle für die hier behandelten natürlichen Böschungen im Geschiebemergel in der Planungsphase vor allem auf Böschungsaufnahme in Verbindung mit generellem geologischen Wissen über den strukturellen Bau und die stoffliche Zusammensetzung der Geschiebemergel sowie auf zustandsbeschreibenden und petrographischen Analysen von Bodenproben aus der betreffenden Böschung und Schürfen basieren.

Sollten sich dann bei der Ausführung von böschungssichernden Maßnahmen Informationen ergeben, die der Plausibilität des zuvor entwickelten ingenieurgeologischen Böschungsmodells widersprechen und dadurch die Tragwerksplanung in Frage stellen, müssen baubegleitende Untersuchungen stattfinden. Dadurch kann sich der Schwerpunkt der geotechnischen Erkundungsmaßnahmen, ähnlich wie im Untertagebau, von der Planungs- in die Ausführungsphase verschieben, jedoch erst bei Bedarf.

Literatur

- [1] LIPPSTREU, L., SONNTAG, A. & STACKEBRANDT, W. (1996): Quartärgeologische Entwicklung des Berliner Stadtgebietes. – Geowissenschaften, H 3-4, 100-107, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [2] STACKEBRANDT, W., HERMSDORF, H., SCHLAAK, N. & SIMON, A. (2009): Zur geologischen Beurteilung der Hangrutsche in Oderberg (Ostbrandenburg) – ein Geländereport. – Branderburg. geowiss. Beitr. 16, 95-105, Cottbus
- [3] KRUSE, B. (2009): Fuzzy-Technologie versus multivariate Statistik versus univariate Statistik – Ein Verfahrenvergleich am Beispiel der geotechnischen Datenanalyse von Geschiebemergel, 145 S., (Mensch und Buch Verlag)
- [4] DEGEBO – DEUTSCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR BODENMECHANIK. (2001): Ermittlung charakteristischer Boden Kenngrößen für gemischtkörnige und organische Böden als Grundlage für Bauvorschriften, Schlußbericht zum Forschungsvorhaben des Deutschen Institutes für Bautechnik DIBT und der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik Degebo, 51 Seiten, 118 Anlagen, Frankfurter IRB Verlag Stuttgart
- [5] KADO, H., REUTER, F. & BACHMANN, G. (1966): Die ingenieurgeologischen Eigenschaften der wichtigsten Lockergesteine der DDR unter Berücksichtigung ihrer Genese und physikalischen Kennzahlen – Abhandlungen des Zentralen Geologischen Institutes, H 2, 134 S.
- [6] PREUBNER, J. (2012): Ingenieurgeologische Charakteristik des weichselkaltzeitlichen Geschiebemergels bei Oderberg, 71 S., unveröff. Masterarbeit, Fachgebiet Ingenieurgeologie, TU Berlin

- [7] CHRISTY, A. D. et al (2000): The use of test pits to investigate subsurface fracturing and glacial stratigraphy in tills and other unconsolidated materials. – Ohio Journal of Science, 100 (3-4), 100-106
- [8] MCGOWN, A. et al. (1974): Fissure patterns and slope failures in till at Hurlford, Ayrshire. – Quaterly Journal of Engineering Geology, Vol. 7, 1-26
- [9] PETERS, K. (1989): Schlußfolgerungen aus tektonischen Analysen von Lockergesteinen im Norden der DDR. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, 17, 12, 1099-1107
- [10] GRUBE, F. (1985): Geotechnik der Moränen, Abschlußbericht des DFG-Schwerpunktforschungsprogramms „Ingenieur-geologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen, 449-467., Hrsg. K.-H. Heitfeld, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo
- [11] NIEDERSTASSER, H. (1975): Bodenmechanische Kennwerte und die aus ihnen abzuleitenden Schlußfolgerungen für Geschiebemergel im Bereich des Großblattes Finsterwalde, - pers. Mitt., unveröffentlicht
- [12] WEISS, K. (1978): Die Hauptbodenarten im Raum Berlin als Baugrund – Vorträge der Baugrundtagung 1978 in Berlin, 503-528, Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau
- [13] KIEKBUSCH, M. (2003): Realistische Scherparameter durch methodische Auswertung von Datenbanken, Beiträge zum Workshop „Stochastische Prozesse in der Geotechnik“ – Schriftenreihe Geotechnik im Bauwesen, H 1, 135-148, RWTH Aachen
- [14] KRUSE, B., R & TIEDEMANN, J. (2003): Die Festlegung charakteristischer Werte von Bodenkenngrößen – Empirie oder Statistik? – Berichte 14. Tagung Ing.-Geol., Kiel 2003, Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität, S. 247-252, Selbstverlag
- [15] HEITFELD, K.-H. (1985): Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen – 434-477, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo (Springer Verlag)
- [16] DIN 4020:2010: Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2, Beuth-Verlag Berlin