

Bestimmung geotechnischer Parameter von Tonsteinen mit dem Nadelpenetrometertest

Determination of geotechnical parameters of clay rocks using needle penetration test

Philipp Blum¹, Hagen Steger¹, Zeynal Ergüler^{1,2}

¹ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW), Karlsruhe, Deutschland

² Dumlupınar University, Department of Geological Engineering, Kütahya, Türkei

Zusammenfassung

Die Bestimmung geotechnischer Parameter wie beispielsweise der Druck- und Scherfestigkeit weicher Gesteine stellt oft eine technische als auch zeitliche Herausforderung bei der Probenahme und Bestimmung dieser Parameter im Labor dar. Eine innovative und alternative Methode, die hierfür eingesetzt werden kann, ist der sogenannte Nadelpenetrometertest (NPT). Ziel dieser Arbeit ist es den NPT und seine Anwendbarkeit darzulegen und kritisch zu bewerten. In dieser Studie wurde der Opalinuston aus dem Felslabor Mont-Terri in der Schweiz sowohl im Felslabor als auch im Labor an Gesteinsproben eingehend untersucht. Des Weiteren wurde der Boom Clay aus Belgien und der Impressamergel von der Schwäbischen Alb beprobt. Die mittels NPT bestimmte einaxiale Druckfestigkeit, die in Abhängigkeit vom Wassergehalt im Bereich von 6,5 bis 21,8 MPa liegt, zeigt mit herkömmlich bestimmten Laborwerten vergleichbare Ergebnisse. Des Weiteren wurden in dieser Studie auch die Kohäsion und der Reibungswinkel dieser Tone und Tonsteine mithilfe eines modifizierten Rahmenscherversuchs bestimmt. Dieser zeigt, dass eine Korrelation zwischen Nadelwiderstand und den beiden Scherparametern Kohäsion und Reibungswinkel vorliegt.

Schlüsselworte: Einaxiale Druckfestigkeit; Tonsteine; Tone; Kohäsion; Reibungswinkel.

Abstract

The determination of geotechnical parameters such as uniaxial compressive strengths and shear strengths of soft rocks is often a technical and time challenge due to sampling in the field and determination in the laboratory. Hence, an innovative and alternative method, is the so-called needle penetration test (NPT). The objective of this study is to critically evaluate the applicability of the NPT. In the present study Opalinus Clay from the underground research laboratory (URL) Mont-Terri in Switzerland is investigated in the URL and in the laboratory using samples. Furthermore, the Boom Clay from Belgium and the Oxford marls (Impressamergel) from the Swabian Alb are also sampled and studied. The determined uniaxial compressive strength (UCS) values using NPT range between 6.5 and 21.8 MPa depending on the water content, and showing comparable results with previously conventional performed laboratory tests. In addition, the cohesion and friction angle of the studied clays and clay rocks are determined using a modified direct shear box apparatus. The comparison shows that a correlation between needle penetration resistance (NPR) and both shear strength parameters, cohesion and friction angle, is identified.

Keywords: Uniaxial compressive strength (UCS); Clay stones; Clays; Cohesion; Friction angle.

1 Einleitung

Ton und Tonsteine werden derzeit in einigen europäischen Ländern, wie beispielsweise Frankreich, Belgien, Schweiz und Deutschland, als potentielle Wirtsgesteine für die Einlagerung von hochradioaktiven Stoffen eingehend untersucht (z. B. AKEND 2002; BOSSART et al. 2002; MAZUREK et al. 2008; TSANG et al. 2012). Diese weichen Gesteine und deren Eigenschaften sind jedoch überaus sensitiv auf Einflüsse wie z. B. Wasser- und Tongehalt (SANTI 2006).

Die Probennahme von repräsentativen Ton und Tonsteinen sind in Abhängigkeit der Aufschlussverhältnisse oft eine große Herausforderung, daher ist die Anzahl der untersuchten Proben oft sehr gering. Um dieser Problematik zu begegnen, wurde in Japan (MARUTO COOPERATION 2006), der sogenannte Nadelpenetrometertest (NPT) entwickelt.

Zahlreiche Studien haben sich mit der Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit mithilfe des NPT beschäftigt (OKADA et al. 1985; ERGULER & ULUSAY 2009, NGAN-TILLARD et al. 2011). Mithilfe von 725 Datensätzen zur einaxialen Druckfestigkeit und zum Nadelwiderstand konnten ULUSAY & ERGULER (2012) folgende empirische Formel entwickeln:

$$UCS = 0.402 NPR^{0.929} \quad (1)$$

mit der einaxialen Druckfestigkeit (UCS) in MPa und Nadelwiderstand (*needle penetration resistance*, NPR) in N/mm.

Ziel dieser Arbeit ist es, diese empirische Formel auf die untersuchten Gesteinsproben anzuwenden und kritisch zu beurteilen. Des Weiteren wurden mithilfe eines modifizierten Rahmenscherversuchs die Kohäsion und der Reibungs-



winkel der Proben bestimmt, welche wiederum mit dem Nadelwiderstand (NPR) verglichen wurde.

2 Material und Methode

2.1 Material

2.1.1 Opalinuston, Schweiz

Der Opalinuston im Felslabor Mont-Terri in der Schweiz wird grundsätzlich in drei verschiedene Faziestypen untergliedert: (1) tonige Fazies, (2) sandige Fazies und (3) karbonatreiche sandige Fazies. Der Opalinuston besteht aus rund 65 % an Tonmineralien und 35 % anderen Mineralien wie z. B. Quarz (20 %) und Kalzit (7 %).

Typische und mittlere Eigenschaften des Opalinustons als auch der weiteren Proben sind in Tab. 1 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 1: Typische und mittlere physikalische, hydraulische und mechanische Eigenschaften der untersuchten Proben (aus BOCK 2000, FRANCOIS et al. 2009 und ERGULER et al. 2013).

Tab. 1: Typical average physical, hydraulic, and mechanical properties of the collected samples (from BOCK 2000, FRANCOIS et al. 2009 and ERGULER et al. 2013).

Probe	Opalinuston	Boom Clay	Impressamergel
Physikalische Eigenschaften			
Rohdichte (kg/m ³)	2450	2000	2330
Wassergehalt (%)	6,1	27,3	9,4
Porosität (%)	14	35	21
Hydraulische Eigenschaften			
k _r -Wert (m/s)	6 × 10 ⁻¹⁴	2,5 × 10 ⁻¹²	-
Mechanische Eigenschaften ¹			
UCS (MPa)	16,0	0,4	4,9
Kohäsion (MPa)	5,5	0,8	1,1
Reibungswinkel (°)	25,0	15,3	28,5
E-Modul (GPa)	4,0	300	-
Poisson Zahl (-)	0,24	0,29	-

¹ Orthogonal zur Schichtung.

Die Untersuchungen wurden sowohl im Felslabor Mont-Terri als auch im eigenen Labor durchgeführt. Eine typische Untersuchung mithilfe des Nadelpenetrometers im Felslabor ist in Abb. 1 dargestellt.

2.1.2 Boom Clay, Belgien

Beim sogenannten *Boom Clay* handelt es sich um eine überkonsolidierte marine Tonablagerung aus dem Oligozän in Belgien, der aus ungefähr 60 % Tonmineralien besteht. Die Proben in dieser Untersuchung stammen von zwei Standorten in Belgien, (1) aus einem Steinbruch bei Burcht und (2) aus Kernbohrungen aus dem Felslabor in Mol. Die wichtigsten Eigenschaften des Boom Clays sind in Tab. 1 zusammengefasst. Im Vergleich zum Opalinuston und Impressamergel hat der Boom Clay die geringste einaxiale Druckfestigkeit.

2.1.3 Impressamergel, Schwäbische Alb

Bei der dritten Probe handelt es sich um den Impressamergel des Weißen Juras α (ox1). Die Probe wurde am Bergsturz in Mössingen bei Tübingen gewonnen. Dieser mit einer Fläche von 0,6 km² ereignete sich im April 1983 nach einem Starkniederschlagsereignis (BIBUS 1986). Im Gegensatz zu den zwei vorherigen Proben besteht der Impressamergel nur aus 18 % Tonmineralien und mit 74 % überwiegend aus Kalzit. Die weiteren typischen Eigenschaften sind in Tab. 1 aufgeführt.



Abb. 1: Bestimmung der Druck- und Scherfestigkeiten des Opalinustons mithilfe des Nadelpenetrometertests im Felslabor Mont-Terri, Schweiz.

Fig. 1: Determination of the uniaxial compressive strength and shear strength parameters of the Opalinus Clay using the needle penetration test in the underground research laboratory at Mont-Terri, Switzerland.

2.2 Methode

2.2.1 Nadelpenetrometer

Der Nadelpenetrometer (NPT) wurde in Japan entwickelt und dort auch bereits vielfach zur Bestimmung der Druckfestigkeiten eingesetzt (OKADA et al. 1985). Die Penetrationskraft liegt zwischen 10 und 100 N und hat eine Eindringtiefe von 0 bis 10 mm. Er kann typischerweise bis zu einer einaxialen Druckfestigkeit von maximal 30 MPa eingesetzt werden. Der Nadelwiderstand (*needle penetration resistance*, NPR) wird in N/mm ausgedrückt und ermittelt sich aus dem Verhältnis der Penetrationskraft F (N) und der Eindringtiefe D (mm) wie folgt:

$$\text{NPR} = F/D \quad (2)$$

Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Nadelwiderstand und der einaxialen Druckfestigkeit besteht (Gleichung 1). In dieser Untersuchung wird diese Gleichung ebenfalls zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit verwendet.

2.2.2 Modifizierter Rahmenscherversuch

Zur optimalen Bestimmung der Scherparameter Kohäsion und Reibungswinkel wurde in dieser Studie ein modifizierter Rahmenscherversuch eingesetzt (Abb. 2). Die weiteren

Details dieses Versuchsaufbaus und der Durchführung sind detailliert in ERGULER et al. (2013) beschrieben.

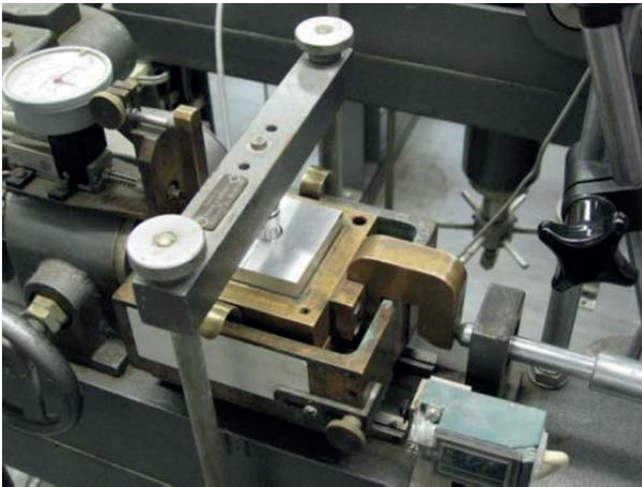


Abb. 2: Modifiziertes Rahmenscherversuchsg r t zur Bestimmung der Scherparameter.

Fig. 2: Modified direct shear box device for the determination of the shear strength parameters.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die mittels NPT bestimmten einaxialen Druckfestigkeiten für den Opalinuston liegen in Abhängigkeit vom Wassergehalt im Bereich zwischen 6,5 bis 21,8 MPa (Abb. 3). Der mittlere natürliche Wassergehalt des Opalinuston im Felslabor Mont-Terri beträgt 6,1 % (Tab. 1). Ein Vergleich mit vorherigen Untersuchungen (BOCK 2000; NAGRA 2002) zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus dieser Studie (Abb. 3b).

Für den Boom Clay aus Burcht, der einen natürlichen Wassergehalt von 19,6 % bis 34,2 % aufweist, liegt der Nadelpenetrationswiderstand zwischen 0,3 N/mm und 1,9 N/mm. Mithilfe der Gleichung 1 ergeben sich somit einaxiale Druckfestigkeiten von 0,1 bis 0,7 MPa und mit einem Mittelwert von 0,4 MPa bei einem Wassergehalt von 27,3 % (Tab. 1). Diese liegen ebenfalls im Bereich der von bereits ermittelten Druckfestigkeiten für den Boom Clay (FRANCOIS et al. 2009).

Für die Impressamergel mit einem natürlichen Wassergehalt von 9,4 % wurde eine einaxiale Druckfestigkeit 4,9 MPa ermittelt. Da es jedoch noch keine anderen Untersuchungsergebnisse zur Druckfestigkeit gibt, ist ein Vergleich in diesem Fall nicht möglich. Unabhängig davon bestätigen unsere Ergebnisse zur einaxialen Druckfestigkeit die grundsätzliche Anwendbarkeit und Genauigkeit der von ERGULER & ULUSAY (2012) empirischen Beziehung zwischen NPR und UCS.

In einem weiteren Schritt wurden auch die Scherparameter der drei Gesteinstypen mithilfe des NPT und des modifizierten Rahmenscherversuchsg r t untersucht (Abb. 2). Diese Ergebnisse zeigen, dass der NPR sowohl mit der Kohäsion (Abb. 4) und dem Reibungswinkel korreliert. Der Zusammenhang zwischen NPR und Kohäsion für die untersuchten 8 Proben zeigen ein hohes Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,98$ und lassen vermuten, dass auch wie für die einaxiale Druckfestigkeit ein Zusammenhang besteht.

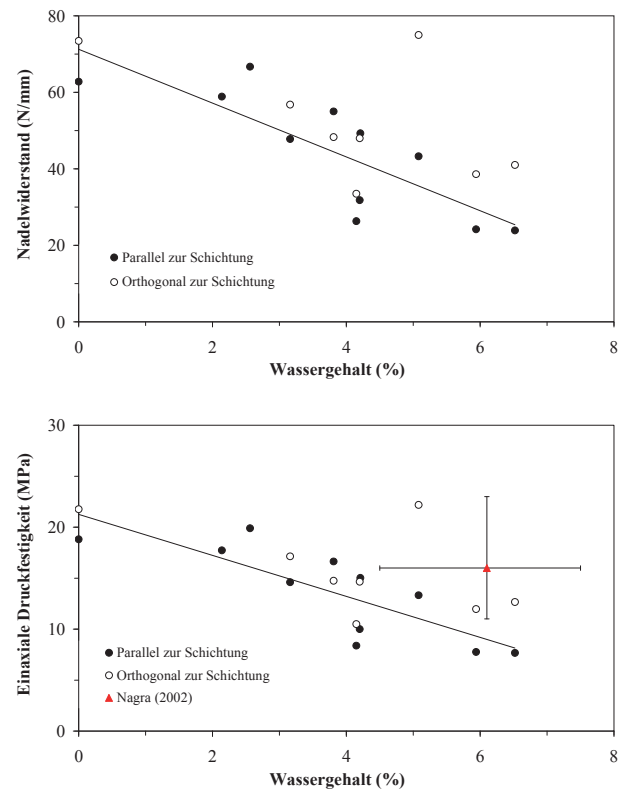


Abb. 3: a) Nadelpenetrationswiderstand (NPR) und b) die berechnete einaxiale Druckfestigkeit (UCS) in Abhängigkeit vom Wassergehalt für den untersuchten Opalinuston. UCS wurde mithilfe der empirischen Formel (Gleichung 1) berechnet.

Fig. 3: Needle penetration resistance (NPR) and uniaxial compressive strength (UCS) versus water content for the studied Opalinus Clay. UCS was determined using the empirical formula (Equation 1).

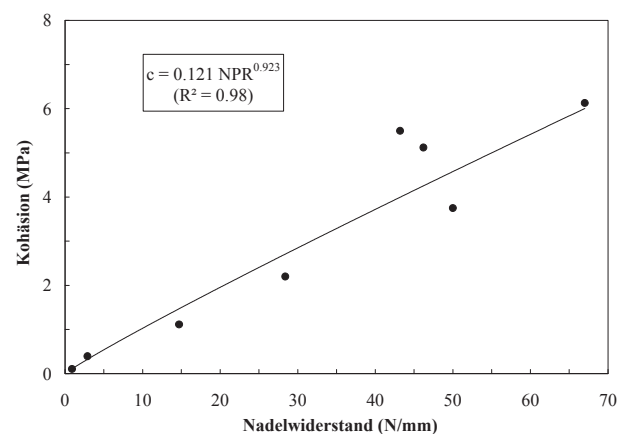


Abb. 4: Nadelpenetrationswiderstand (NPR) und mithilfe des modifizierten Rahmenscherversuchsg r t bestimmte Koh sionswerte.

Fig. 4: Needle penetration resistance (NPR) and with the modified direct shear box device determined cohesion values.

Weiterführende Untersuchungen mit Gesteinsproben aus der Türkei überprüfen derzeit die Genauigkeit und Anwendbarkeit der aus dieser Arbeit entwickelten Beziehung zwischen NPR, Kohäsion und Reibungswinkel (ERGULER et al. 2013).



4 Zusammenfassung und Fazit

Die Anwendung des Nadelpenetrometertests (NPT) für die untersuchten Tone und Tongesteine zeigt, dass mithilfe des NPT die einaxiale Druckfestigkeit bis maximal 30 MPa hinreichend genau bestimmt werden kann. Der Vorteil im Vergleich zu herkömmlichen Methoden, wie beispielsweise Punktlastindex- oder Druckfestigkeitsversuch, ist die direkte und schnelle Anwendung im Feld bzw. Aufschluss.

Weitere Untersuchungen zeigen, dass der NPT grundsätzlich auch zur Bestimmung der Scherparameter Kohäsion und Reibungswinkel eingesetzt werden kann. Die Scherparameter für die drei Gesteinsproben von Opalinuston, Boom Clay und Impressamergel wurden mit einem modifizierten Rahmenscherversuchsgesetz bestimmt. Es zeigt sich, dass die Kohäsion für die untersuchten Gesteine mithilfe des Nadelwiderstands mit einer hohen Bestimmtheit abgeschätzt werden kann. Der Zusammenhang zwischen Nadelwiderstand und Reibungswinkel ist hingegen nicht so eindeutig und wird daher noch anhand weiterer Proben eingehend untersucht.

Literatur

- AKEND (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. 45 S., 8 Tab.; Köln.
- BIBUS, E. (1986): Die Rutschung am Hirschkopf bei Mössingen (Schwäbische Alb): Geowissenschaftliche Rahmenbedingungen, Geoökologische Folgen. – *Geoökodynamik*, 7: 333-360.
- BOCK, H. (2000): RA experiment, rock mechanics analyses and synthesis: data report on rock mechanics. Mont Terri Consortium Technical Report TR 2000-02.
- BOSSART, P., MEIER, P.M., MOERI, A., TRICK, T., MAYOR & J.C. (2002): Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory. – *Engineering Geology*, 66: 19-38.
- ERGULER, Z.A. & ULUSAY, R. (2009): Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46: 355-370.
- ERGULER, Z.A., HAGEN, S. & BLUM, P. (2013). Estimating shear strength parameters of clay and weak rocks by needle penetration test. – *Rock Mechanics and Rock Engineering*. (in Begutachtung)
- FRANÇOIS, B., LALOUI, L. & LAURENT, C. (2009): Thermo-hydro-mechanical simulation of ATLAS in situ large scale test in Boom Clay. – *Computers and Geotechnics*, 36: 626-640.
- MARUTO CORPORATION (2006): Penetrometer for Soft Rock: Model SH-70. – Instruction Manual. Tokyo, Japan. [japanisch]
- MAZUREK, M., GAUTSCHI, A., MARSCHALL, P., VIGNERON, G., LEBON, P. & DELAY, J. (2008): Transferability of geoscientific information from various sources (study sites, underground rock laboratories, natural analogues) to support safety cases for radioactive waste repositories in argillaceous formations. – *Physics and Chemistry of the Earth*, 95–105.
- NAGRA (2002): Projekt Opalinuston – Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungen. Technischer Bericht, NTB 02-03.
- NGAN-TILLARD, D.J.M., VERWAAL, W., MULDER, A., ENGIN, H.K. & ULUSAY, R. (2011): Application of the needle penetration test to a calcarenite, Maastricht, the Netherlands. – *Engineering Geology*, 123: 214-224.
- OKADA, S., IZUMIYA, Y., IIZUKA, Y. & HORIUCHI, S. (1985): The estimation of soft rock strength around a tunnel by needle penetration test. – *Journal of Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 33, 2: 3538. [japanisch]
- SANTI, P.M. (2006): Field methods for characterizing weak rock for engineering. – *Environmental and Engineering Geoscience*, 12, 1: 1-11.
- ULUSAY, R. & ERGULER, Z.A. (2012): Needle penetration test: Evaluation of its performance and possible uses in predicting strength of weak and soft rocks. – *Engineering Geology*, 149-150: 47-56.