

Erfahrungen zur Festigkeitsbestimmung von Mergelgesteinen mit dem Nadelpenetrometer

Moritz Aderhold, M. Sc.

Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr.-Ing. Michael Alber

Alber GeoMechanik, Dortmund

Dr. Ralf J. Plinninger

Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried

Zusammenfassung

Die zutreffende Beurteilung der Einaxialen Druckfestigkeit stellt eine der Kernaufgaben der Geotechnik im Kontext der Planung und Ausführung von Tief-, Tunnel- und Spezialtiefbauarbeiten dar. Für viele geringfeste und veränderlich feste Gesteine, wie z. B. Tonsteine, Mergelsteine, Tuffe, oder stärker verwitterte Gesteine ist allerdings die Probengewinnung, der Erhalt des natürlichen Wassergehalts, die Probenpräparation und schließlich die Prüfung mit herkömmlichen Laborversuchsverfahren, wie dem Einaxialen Druckversuch, herausfordernd, wenn nicht gar unmöglich. Bereits 1980 wurde in Japan das Nadelpenetrometer als feldtaugliches Prüfverfahren zur Abschätzung der Einaxialen Druckfestigkeit derartiger Gesteine entwickelt. Obwohl das Verfahren in einer 2014 veröffentlichten ISRM Suggested Method verankert ist, ist der Einsatz des Nadelpenetrometers und der damit ermittelte Nadelpenetrometerindex (NPI) in Deutschland und Mitteleuropa im Fels eher unüblich. Dass das Verfahren sinnvoll und gewinnbringend einsetzbar ist, soll anhand umfangreicher Messdaten erläutert werden, die bei der Begleitung eines anspruchsvollen Spezialtiefbauprojekts in verschiedenen Mergelgesteinen der Münsterländer Kreidebucht erhoben wurden. Ausgehend von diesen Erfahrungen stellt der Beitrag eine Analyse des potentiellen Anwendungsbereichs vor und diskutiert die Ableitung von Schätzwerten der Einaxialen Druckfestigkeit

1. Herausforderung: Festigkeitsbestimmung geringfester und veränderlich fester Gesteine

Viele tonmineralführende Sedimentgesteine wie Tonsteine, Schluffsteine, Sandsteine, Mergelsteine oder stark verwitterte Gesteine sind veränderlich fest, d. h., sie zeigen die Eigenschaft, in einem bautechnisch relevanten Zeitraum auf Änderungen von Wassergehalt und/oder der Temperatur mit Festigkeitsreduzierung (bis hin zum Zerfall) zu reagieren. Die Probengewinnung, der Erhalt des natürlichen Wassergehalts, Probenpräparation und schließlich die Prüfung mit herkömmlichen Laborversuchsverfahren, wie dem einaxialen Druckversuch sind in derartigen Gesteinen herausfordernde, wenn nicht gar unmögliche Aufgaben.

Bei nicht fachgerechter Probennahme und -behandlung sind ausreichend Möglichkeiten für eine Veränderung des Feuchezustands gegeben, sodass eine Schwächung des Gesteinsgefüges vor der Prüfung (siehe Beispiel in Abb. 1) stattfinden kann und die ermittelten Parameter damit unzutreffend (d. h. meist zu niedrig) bestimmt werden.

Während dieser Umstand für statische Fragestellungen ggf. noch toleriert werden kann – die ermittelten Kennwerte liegen hierfür auf der „sicheren Seite“ – haben sich in der Vergangenheit zahlreiche Probleme bei Fragen der Bohrbarkeit und Lösbarkeit ergeben, bei denen zu niedrig ermittelte Festigkeitskennwerte zu optimistische Ansätz-

ze nach sich zogen (u. a. Plinninger, Spaun & Nickmann, 2012). Gerade für die Untersuchung derartiger geringfester und veränderlich fester Gesteine am Übergang zu Lockergesteinen kann daher die Weiterentwicklung der Versuchstechnik neue Möglichkeiten eröffnen.



Abb. 1: Haarrisse in einem Mergelstein. Das Vorhandensein derartiger Risse macht die Festigkeitsprüfung an einem solchen Probekörper obsolet (Foto: Plinninger).

2. Das Nadelpenetrometer

Beim Nadelpenetrometer (Abb. 2) handelt es sich um ein transportables (Gewicht rd. 700 g) und weitgehend zerstörungsfreies, indirektes Verfahren zur Festigkeitsbestimmung geringfester Gesteine. Das Versuchsverfahren wurde erstmals 1980 in Japan eingesetzt (JSCE-RMC, 1980). Obwohl mit der Veröffentlichung der entsprechenden ISRM Suggested Method (2014) eine internationale Prüfempfehlung vorliegt, wird das Verfahren in Deutschland und Mitteleuropa bis dato nach eigener Einschätzung eher selten eingesetzt.

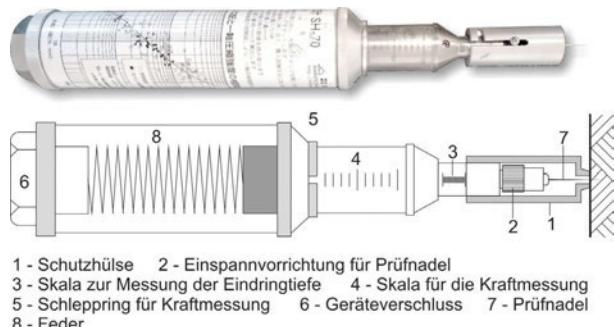


Abb. 2: Aufbau des Nadelpenetrometers gemäß ISRM Suggested Method (2014).

Der Nadelpenetrometerindex (engl. „Needle Penetration Index“, NPI) wird bestimmt, indem eine gehärtete Stahl-nadel definierter Geometrie mit einer Kraft (F) von 100 N in das Gestein eingedrückt wird, wobei die Eindringtiefe (D) ermittelt wird. Er ermittelt sich als 100 : D für Gesteine, bei denen die Kraft von 100 N nicht für ein vollständiges Eindringen ausreicht, bzw. als F : 10 für Gesteine, bei denen eine Eindringtiefe von 10 mm bei einer Kraft < 100 N erreicht wird. Der maximal ermittelbare Messwert beträgt NPI = 100.

3. Erfahrungen mit dem Einsatz des Nadelpenetrometers in Oberkreidemergeln

3.1 Geologische Verhältnisse

Die hier dargestellten Untersuchungsergebnisse stammen aus der geotechnischen Begleitung einer Spezialtiefbau-maßnahme im Ostteil der kreisfreien Stadt Münster in Westfalen (Land NRW). Für die Tieferlegung einer Bundesstraße war ein rd. 1 km langes Trogbauwerk aus überschnittenen Bohrpfählen im Durchmesserbereich von überwiegend \varnothing 1200 herzustellen. Die größte Pfahl-länge betrug rd. 16 m (Abb. 3).

Das Projekt liegt im Zentrum des sogenannten „Münsterländer Kreidebeckens“, einem Landschaftsraum, der sich durch einen Untergrund aus marinen Kalk- und Mergelgesteinen auszeichnet, die während der Oberkreide vor ca. 100 – 66 Mio. Jahren in einem flachen Schelfmeer unter subtropischen Klimaverhältnissen abgelagert wurden.

Im Projektareal werden die Kreidegesteine durch graue, teilweise schluffige Kalkmergel- und Tonmergelsteine und graue Kalksteinzwischenlagen aus der Zeit des obe-

ren Untercampans (ca. 83,6 – 72 Mio. Jahre) repräsentiert. Infolge großflächiger Erosion nach dem Rückgang des Meers (an der Grenze Kreide / Tertiär) finden sich derartig junge Sedimente lediglich noch im zentralen Münsterland und in den höheren Lagen der Beckumer Berge, wo sie die Grundlage der Beckumer Zementindustrie bilden.



Abb. 3: Herstellung der Bohrpahlwand (Foto: ARGE Geotechnik B51).

3.2 Überblick über das Untersuchungsprogramm

Der Einsatz des Nadelpenetrometers war Teil eines umfangreichen Dokumentations- und Untersuchungspro-gramms, das während der Bauausführung für das o.a. Projekt abgewickelt wurde. Grundlage der Untersuchung war die baubegleitende geologisch-geotechnische Dokumentation von Pfahlbohrungen gemäß DIN EN ISO 14688-1 und 14689.



Abb. 4: Eimerprobenahme aus dem Bohrgut (Foto: ARGE Geotechnik B51).

Zur näheren Untersuchung der Festigkeitseigenschaften wurden aus dem Bohrgut im Bereich der unverwitterten Kreidegesteine i.d.R. drei horizontierte Eimerproben je Pfahl entnommen (Abb. 4). Diese wurden entweder rück-gestellt oder innerhalb 48 Stunden vor Ort mittels Punktlast- und Nadelpenetrometer-Versuchen untersucht. Zu-sätzlich wurden größere Blockproben aus dem Bohrgut entnommen und der Ruhr-Universität Bochum (Abtei-

lung Ingenieurgeologie/Felsbau) für Einaxiale Druckversuche überstellt.

In Summe wurden für das Projekt 158 Serien Nadelpenetrometer-Tests (Abb. 5), 193 Serien Punktlastversuche („irregular lump tests“ gem. DGGT-Empfehlung Nr. 5; Abb. 6) und 36 Einaxiale Druckversuche gem. DGGT-Empfehlung Nr. 1 inklusive Bestimmung von Dichte, Wassergehalt und Kalkgehalt durchgeführt.



Abb. 5: Einsatz des Nadelpenetrometers auf der Baustelle (Foto: ARGE Geotechnik B51).



Abb. 6: Einsatz des Punktlastversuchs auf der Baustelle (Foto: ARGE Geotechnik B51).

3.3 Ergebnisse und Korrelationen

Für die Prüfungen wurde ein Nadelpenetrometer vom Typ Maruto SH-70 eingesetzt. Je Probe wurden 5 Einzeltests durchgeführt und zu einem Mittelwert verrechnet. Die ermittelten NPI-Werte decken eine Bandbreite zwischen $NPI = 2$ bis $NPI = 93$, bzw. rd. 1-35 MPa ab. Nachdem an ein und demselben Probenmaterial sowohl Nadelpenetrometer-Tests, als auch Punktlastversuche und ggf. Einaxiale Druckversuche durchgeführt wurden, las-

sen sich für die untersuchten Gesteine aussagekräftige Regressionsanalysen durchführen.

In Abbildung 7 sind die ermittelten NPI-Werte den Ergebnissen der entsprechenden Einaxialen Druckversuche gegenübergestellt, Abbildung 8 zeigt die Korrelation der NPI-Werte mit den aus den jeweiligen Punktlastversuchen abgeleiteten Schätzwerten der Einaxialen Druckfestigkeit UCS*.

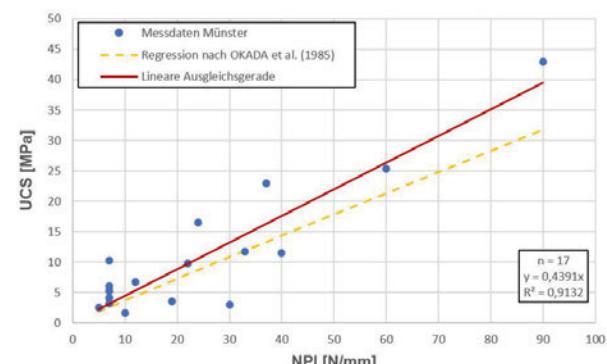


Abb. 7: Korrelation der im Einaxialen Druckversuchen direkt bestimmten Einaxialen Druckfestigkeit (UCS) und dem Nadelpenetrometerindex (NPI).

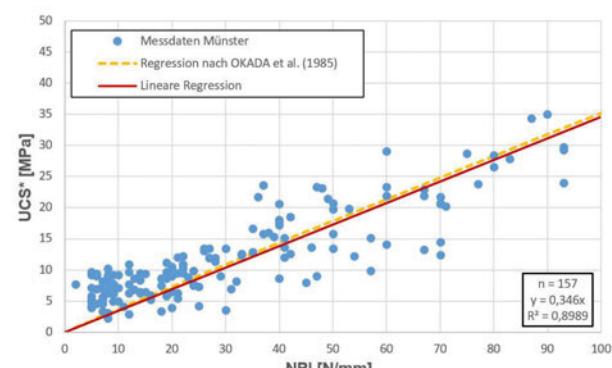


Abb. 8: Korrelation des aus den Punktlastversuchen abgeleiteten Schätzwerts der Einaxialen Druckfestigkeit (UCS*) und dem Nadelpenetrometerindex (NPI).

Obwohl die Korrelation mit dem Punktlastversuch auf einer deutlich höheren Anzahl an Messdaten ($n=157$) basiert, als die Korrelation mit den Einaxialen Druckversuchen ($n=36$), zeigen beide Diagramme vergleichbare Trends und eine sehr gute Bestimmtheit ($R^2 = 0,91$ bzw. $0,90$). Der durch die Steigung der Ausgleichsgerade determinierte mittlere Korrelationsfaktor beträgt für den Vergleich auf Basis der Einaxialen Druckversuche $k = 0,439$. Für den Vergleich auf Basis der Punktlastversuche beträgt der mittlere Korrelationsfaktor $k = 0,346$. Insbesondere die aus den Punktlastversuchen ermittelte Regression stimmt damit gut mit den in der ISRM Suggested Method dargestellten Ergebnissen von Okada et al. (1985) überein (strichlierte, gelbe Ausgleichsgerade in Abb. 7 und 8).

4. Bewertung des Verfahrens

4.1 Anwendungsbereich

Das Nadelpenetrometer ist sinnvoll nur innerhalb eines eng umrissenen Spektrums von Gesteinen und Festigkeiten einsetzbar. Neben den auch im vorliegenden Erfahrungsbericht dargestellten Mergelgesteinen (d. h. Tonmergelsteine, Mergelsteine und Kalkmergelsteine) werden in der Literatur positive Einsatzerfahrungen auch aus anderen Sedimentgesteinen, wie Tonsteinen, Schluffsteinen, Sandsteinen, Grauwacken, Konglomeraten, Kalksteinen, Tuffen, Bims und Braunkohle (Lignit) beschrieben.

Inwieweit bei den beschriebenen grobklastischen Gesteinen (Sandsteinen, Konglomeraten) tatsächlich eine zuverlässige Prüfung möglich ist, ohne dass die Versuche durch das Antreffen hochfester Klasten verfälscht werden, ist nach Überzeugung der Autoren kritisch zu hinterfragen. Derartige Probleme treten bei feinkörnigen Sedimenten, wie Ton-, Schluff- und Mergelsteinen i.d.R. nicht auf.

Die Einsatzerfahrungen aus dem Projekt Münster zeigen, dass dort ein Festigkeitsbereich bis ca. 35 MPa sinnvoll abgedeckt werden kann. Die ISRM Suggested Method (2012) gibt hinsichtlich des Einsatzspektrums folgende Empfehlung: „Obwohl das Verfahren bereits in Gesteinen mit einer Einaxialen Druckfestigkeit von bis zu 35 MPa verwendet wurde, wird allgemein empfohlen, es nur für Gesteine mit einer Festigkeit < 20 MPa zu verwenden. Um realistische Ergebnisse zu erhalten, sollte die Eindringtiefe der Nadel mehr als 1 mm betragen, ohne dass dabei Schäden an der Nadel auftreten.““

4.2 Vorteile des Verfahrens

Die maßgeblichen Vorteile des Nadelpenetrometers liegen in der Möglichkeit, das Verfahren problemlos im Gelände und auf der Baustelle einzusetzen (Bild 7). Die Prüfung selbst kann ohne weitere Probenvorbereitung an Handstücken und Bohrkernen, aber auch an Aufschlüssen (Böschungen, Tunnellaibung, etc.) durchgeführt werden. Durch die Prüfung werden die Proben nur minimal und lokal geschädigt, so dass weitere felsmechanische Untersuchungen an den Probestücken nicht von vorneherein ausgeschlossen sind.

Gegenüber dem Prallhammer nach Schmidt ist das Nadelpenetrometer (Messprinzip „Eindringen eines Indenters in das Gesteinsgefüge“) bei vergleichbarer Größe und Transportfähigkeit mutmaßlich besser in der Lage, den festigkeitsdeterminierenden Grad der Kornbindung zu ermitteln, als der Prallhammer (Messprinzip: „Elastisches Rückfedern bei dynamischem Schlag“). Gegenüber dem Punktlastverfahren zeichnet sich das Nadelpenetrometer durch eine deutlich bessere Transportfähigkeit und noch geringere Anforderungen an das Probenmaterial aus. Im Gegensatz zum Punktlastverfahren kann der Nadelpenetrometer-Test sogar direkt und in-situ eingesetzt werden.

4.3 Ableitung von Festigkeitskennwerten

Die in Absatz 3.3 dargestellten Korrelationen lassen den Schluß zu, dass mit dem Verfahren plausible Schätzwerte der Einaxialen Druckfestigkeit (UCS*) gewonnen werden können. Die Korrelation zwischen NPI und Einaxialer Druckfestigkeit ist abhängig von den Eigenschaften der getesteten Gesteine und ggf. auch den eingesetzten Prüfgeräten.

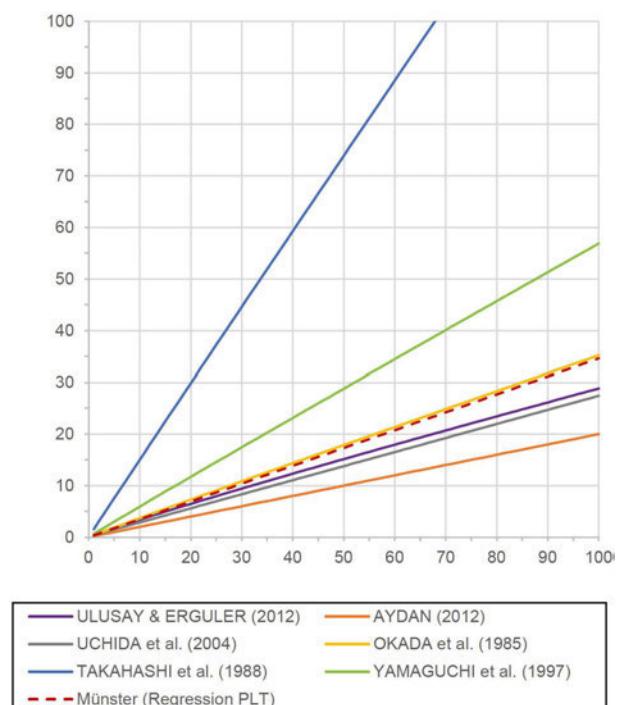


Abb. 9: Gegenüberstellung der sechs in der ISRM Suggested Method (2014) angeführten Umrechnungsformeln und der in den Oberkreidemergeln des Projekts Münster ermittelten Regression.

Die Vielzahl der in der Fachliteratur vorgeschlagenen Umrechnungsformeln - alleine in der ISRM Suggested Method (2012) werden 6 verschiedene Gleichungen dargestellt (Abb. 9) - und die geringe Erfahrungsbasis, die in Deutschland mit dem Verfahren existiert, lassen es auf absehbare Zeit unabdingbar erscheinen, für derartige Bewertungen ausschließlich statistisch belastbare, projekt- und gesteinsspezifische Vergleichsuntersuchungen heranzuziehen.

Dem Nachteil der nur indirekten Kennwertermittlung steht dabei der Vorteil gegenüber, derartige Kennwerte auch für Gesteine zu gewinnen, die aufgrund der starken Veränderlichkeit nicht oder nur mit großem Aufwand im direkten Druckversuch prüfbar sind. Zudem lässt sich mit dem Verfahren verhältnismäßig einfach eine entsprechend größere und statistisch ggf. besser belastbare Datenbasis generieren.

5. Ausblick

Indirekte Festigkeitsprüfverfahren, wie das Nadelpenetrometer können die direkte Festigkeitsprüfung im Einaxialen Druckversuch nie restlos ersetzen. Mit seinem stark begrenzten Einsatzbereich von bis zu maximal rd. 40 MPa ist das Nadelpenetrometer auch nicht in der Lage, in globale Konkurrenz zu etablierten Feldprüfverfahren, wie dem Punktlastversuch zu treten. Für die meisten magmatischen und metamorphen Gesteine ist das Verfahren *a priori* ungeeignet.

Die Untersuchung geringfester und veränderlich fester Gesteine ist eine geotechnische Herausforderung, die bis heute nichts an Relevanz verloren hat. Aufgrund der geringen Anforderungen an das Probenmaterial und die Möglichkeit, das Verfahren *in situ* in „bergfrischem“ Gestein mit annähernd natürlichem Wassergehalt einzusetzen, stellt das Nadelpenetrometer in diesem Anwendungsbereich daher ein interessantes Hilfsmittel dar, das die etablierten Verfahren sinnvoll ergänzen kann.

Gerade zum Punktlastversuch stellt das Nadelpenetrometer eine passende Ergänzung dar, das Kennwerte für diejenigen Gesteinen liefern kann, die aufgrund ihrer geringen Festigkeit selbst bei diesem Verfahren problematisch in Formatierung und Prüfung sind – z. B. aufgrund (zu) tiefen Eindringens der kegelförmigen Prüfspitzen des Punktlastgeräts.

Die in Absatz 4.3 gegenübergestellten Regressionskurven verdeutlichen allerdings, dass es für eine zutreffende Ableitung von Schätzwerten der Einaxiale Druckfestigkeit bis auf Weiteres unabdingbar sein wird, statistisch aussagekräftige, projekt- bzw. gesteinsspezifische Korrelationen zu erarbeiten - ähnlich, wie es beispielsweise auch in der geltenden DGGT-Empfehlung Nr. 5 (2010) für das Punktlastverfahren gefordert wird.

Literatur

- [1] DGGT – Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (2004): Neufassung der Empfehlung Nr. 1 des Arbeitskreises 3.3 „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern, Bautechnik, 81, 10: S. 825 – 834, Berlin (Ernst & Sohn).
- [2] DGGT – Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (2010): Empfehlung Nr. 5 des Arbeitskreises 3.3. „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.: Punktlastversuche an Gesteinsproben, Bautechnik, 87, 6: S. 322 – 330, Berlin (Ernst & Sohn).
- [3] DIN – Deutsches Institut für Normung e.V. (2018): DIN EN ISO 14688-1: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels - Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14689-1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14688-1:2018, Berlin (Beuth).
- [4] DIN – Deutsches Institut für Normung e.V. (2018): DIN EN ISO 14689: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels (ISO 14689:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14689:2018, Berlin (Beuth).
- [5] Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen (1990): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:100000, Blatt C 4310 Münster mit Erläuterungen, 2. Auflage, Krefeld.
- [6] ISRM – International Society for Rock Mechanics (2014): ISRM Suggested Method for the Needle Penetration Test.- Journal of Rock Mechanics & Rock Engineering, 47, S. 1073-1085, New York (Elsevier).
- [7] JSCE-RMC (1980): A suggested method for investigation and testing of soft rocks. in: Japan Society of Civil Engineers, Rock Mechanics Committee, The 4th Sub-committee, Tokyo (in japanischer Sprache).
- [8] Plinninger, R.J., Spaun, G. & Nickmann, M. (2012): Geotechnische Aspekte der Beprobung und Untersuchung veränderlich fester Gesteine.- in: Vogt, C. & Moormann, C. (Hrsg., 2012): Tagungshandbuch zum 8. Kolloquium „Bauen in Boden und Fels“ der TA Esslingen, 17. und 18. Januar 2012, S. 425-432 (Technische Akademie Esslingen).