

Geotechnische Charakterisierung der Linzer Sande – Starke Kompaktion oder Verfestigung mittels Bindemittel?

V. Noflatscher, B.Sc., geo.zt, Hall i. T.
Dr. G. Poscher, geo.zt, Hall i. T.
Prof. Dr. K. Thuro, Technische Universität, München

Die Linzer Sande wurden als transgressive, flachmarine und küstennahe Sande in der Molassezone von Oberösterreich im Großraum Linz im oberen Oligozän bis unteren Miozän abgelagert. Auf Grund der hohen Standfestigkeit der Linzer Sande in zahlreichen Untertagebauten kam die Frage auf, ob diese rein aus der Kompaktion resultiert oder ob evtl. auch ein Bindemittel vorhanden ist. Um die Frage eines etwaigen Bindemittels zu klären und noch geotechnische Kennwerte der Linzer Sande zu bestimmen, wurden Proben aus den Bohrkernen des Erkundungsprogramms des A 26-Projekts der ASFINAG für verschiedene Versuche herangezogen. Bei den hauptsächlich aus Quarz, Feldspat und z. T. Glimmerblättchen bestehenden Linzer Sanden handelt es sich um einen schwach feinsandigen, mittelsandigen Grobsand mit eckigen bis kantengerundeten Kornformen. Es konnten eine mittlere Trockendichte von 1,82 g/cm³ und einaxiale Druckfestigkeiten im Bereich von 0,23 bis 1,70 MPa ermittelt werden. An ungestörten Proben konnten ein Reibungswinkel von 43° und eine Kohäsion von 25,3 kN/m² bestimmt werden. Aus den Dünnschliffanalysen geht hervor, dass zahlreiche zerbrochene, scharfkantige Körner vorhanden sind und der Großteil der Körner unregelmäßige Umrandungen aufweist. Die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen zeigen angeätzte Quarzkörner und Quarzkörner und Feldspäte mit aufgewachsenen Tonmineralen. Mit Hilfe der gewonnenen Ergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass für die hohe Festigkeit der Linzer Sande mehrere Faktoren zusammenspielen: Einerseits die vorhandene Überkonsolidierung und die eckigen bis kantengerundeten Kornformen, welche die Kohäsion erhöhen, andererseits aber auch das Vorhandensein von Tonmineralen, welche durchaus eine bindende Wirkung haben können.

1 Einleitung

Im Großraum Linz sind sie immer wieder anzutreffen: die Linzer Sande. Zahlreiche Untertagebauten und weltberühmte Keller, wie der Cembrankeller, sind in den Linzer Sanden verankert.

Auf Grund ihrer hohen Festigkeit eignen sie sich ideal zur Herstellung großer Hohlräume, woraus allerdings die Frage resultiert, ob diese Festigkeit auf die starke Kompaktion bzw. Konsolidierung durch die überlagernden Sedimentgesteine zurückzuführen ist oder ob, wenn auch nur in geringem Ausmaß, evtl. ein Bindemittel vorhanden ist.

Um diese Frage zu klären, wurden die Linzer Sande ingenieurgeologisch und geotechnisch charakterisiert.

2 Geologischer Überblick

Die Linzer Sande sind, wie bereits aus dem Namen abzuleiten ist, in der Umgebung von Linz zu finden und sie können der Linz-Melk-Formation zugeordnet werden. Sie wurden in der Molassezone von Oberösterreich abgelagert und flankieren die südlichen Ausläufer der Böhmisches Masse (KRENMAYR & ROETZEL 2000).

Bei den Linzer Sanden handelt es sich um transgressive, flachmarine und küstennahe Ablagerungen des oberen Oligozäns und unteren Miozäns (PILLER et al. 2004). Im basalen Abschnitt der Linzer Sande sind zahlreiche kristalline Blöcke eingebettet, wobei es sich um Umlagerungsprodukte aus der Böhmisches Masse handelt (RUPP 2013).

Sie wurden zumeist direkt auf den zum Teil tiefgründig verwitterten Gesteinen des Böhmisches Massivs buchtenartig abgelagert. Mehrere Meeresbuchten sind so entstanden, wie z. B. die Linzer Bucht oder die Alhartinger Bucht. Das Liefergebiet der Linzer Sande war das Böhmisches Massiv und die durchschnittliche Mächtigkeit kann mit ca. 30–50 m angegeben werden (PESCHEL 1982).

Die Linzer Sande verzahnen gegen Süden hin mit dem zeitgleich abgelagerten Älteren Schlier, welcher heute der Ebelsberg-Formation zugeordnet werden kann (PESCHEL 1982). Auf Grund eines Anstiegs des Meeresspiegels kommt der Ältere Schlier auch transgressiv auf den Linzer Sanden zum Liegen (JACOBS 2007).

Im Hangenden der Linzer Sande bzw. des Älteren Schliers wurden diskordant die miozänen Phosphoritsande (Plesching-Formation) abgelagert, welche allerdings nicht flächendeckend zum Liegen kamen (JACOBS 2007; RUPP 2013).

Nach Rückzug des Meeres wurden im oberen Tertiär mächtige Schotterablagerungen über den Küstensedimenten abgelagert, welche bis in eine Höhe von 500 m über den heutigen Meeresspiegel reichten. Die Donau tiefte sich dann ca. 250 m in die damalige Landschaft ein, wodurch die tertiären Sedimente großteils erodiert wurden. Schlussendlich erreichte die Donau dann das heutige Niveau, welches bei ca. 260 m ü. NN liegt (PESCHEL 1982).

Aus diesen Erkenntnissen kann gefolgert werden, dass die ehemalige Überlagerung der Linzer Sande ca. 250–300 m betrug, woraus die starke Kompaktion und teils auch die schwache Verfestigung resultieren. Dieses Phänomen wird auch als Überkonsolidierung bezeichnet.

3 Methodik

Für eine aussagekräftige Charakterisierung wurden mehrere Kennwerte mit Hilfe der relevanten Normen bzw. Empfehlungen der DGGT ermittelt. Großteils wurden die Vorgaben der Normen eingehalten, allerdings war dies auf Grund der schwierigen Probengewinnung nicht immer möglich.

Es wurden für alle Versuche ausschließlich Proben aus den Bohrkernen des Erkundungsprogramms für das A 26-Projekt der ASFINAG entnommen. Bei diesem Projekt handelt es sich um die A 26 Linzer Autobahn, welche einen wesentlichen Beitrag zur Entlastung der Verkehrswege in der Stadt Linz und Umgebung leisten soll. Das Projekt umfasst drei Abschnitte: die bereits im Bau befindliche Donaubrücke, den Tunnel Freinberg und die Westbrücke (www-01).

Zusätzlich zu den Laborversuchen wurden auch einige Aufschlüsse im Gelände näher untersucht. Um mikroskopische Fragen zu klären, wurden u. a. Dünnschliffanalysen und Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahmen gemacht.

4 Ergebnisse

4.1 Beschreibung und Kornsummenanalyse

Die Linzer Sande haben eine weiße bis hellgraue, manchmal auch gelbliche Farbe. Manchmal sind rostfarbene Bereiche erkennbar. Den Hauptbestandteil bildet Quarz, ebenfalls sind Feldspäte und teilweise auch Glimmerblättchen vertreten. Die Kornformen sind eckig bis kantengerundet; zahlreiche Kornbruchstücke sind in Feinsandgröße vorhanden.

Zur Bestimmung der Korngröße wurden Korngrößenanalysen nach DIN EN ISO 17892-4 (2017) an insgesamt 18 Proben durchgeführt (Abbildung 4-1). Überwiegend bildet der Grobsand den Hauptbestandteil, der Mittelsandanteil schwankt zwischen

mittelsandig und stark mittelsandig. Ebenfalls variiert der Feinsandanteil etwas. Der Feinkornanteil erreicht maximal 6,8 %. Auch der Feinkiesanteil ist nicht nennenswert, der größte ermittelte Feinkiesanteil beträgt 4,8 %. In einer Probe konnte auch ein Mittelkiesanteil von 1,9 % festgestellt werden.

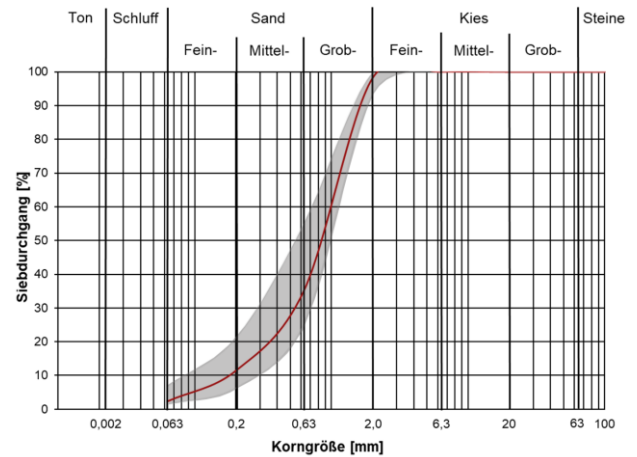


Abbildung 4-1: Kornsummendigramm der Linzer Sande. In Rot ist eine durchschnittliche Kornsummenkurve der Linzer Sande dargestellt. In Grau ist die Bandbreite aller Kornsummenkurven hinterlegt.

Insgesamt können die Linzer Sande als ein schwach feinsandiger, mittelsandiger Grobsand beschrieben werden. Für die Ungleichförmigkeitszahl C_u ergibt sich für eine repräsentative Durchschnittsprobe ein Wert von 5,4, die Krümmungszahl C_c kann mit 1,6 angegeben werden. Daraus kann laut DIN EN ISO 14688-2 (2018) ein eng gestufter Sand abgeleitet werden.

4.2 Dichtebestimmung mittels Tauchwägung und Wassergehaltsanalyse

Aus zehn Versuchen mit je drei Teilproben wurde die Dichte mittels Tauchwägung nach DIN EN ISO 17892-2 (2015) ermittelt. Daraus ergab sich eine mittlere Trockendichte von $1,82 \text{ g/cm}^3$. Die für Sande sehr hohe Dichte ist ein eindeutiger Hinweis auf eine Überkonsolidierung der Linzer Sande.

Im Zuge der Dichtebestimmung konnte auch der Porenanteil ermittelt werden. Die Porenanteile bewegen sich zwischen 29,1 und 34,7 %. Der Mittelwert kann mit 31,5 % angegeben werden.

Die bestimmten Wassergehalte nach DIN EN ISO 17892-1 (2015) der verschiedenen Proben variieren stärker, diese erreichen Werte zwischen 8,0 und 16,8 %. Der mittlere Wassergehalt beträgt 12,9 %. Es sei noch dazu zu sagen, dass nach der Bohrkerngewinnung keine besonderen Maßnahmen zur Erhaltung des natürlichen Wassergehalts ergriffen worden sind. Deshalb ist davon auszugehen, dass es sich bei den ermittelten Wassergehalten nur um annähernd natürliche Wassergehalte handelt.

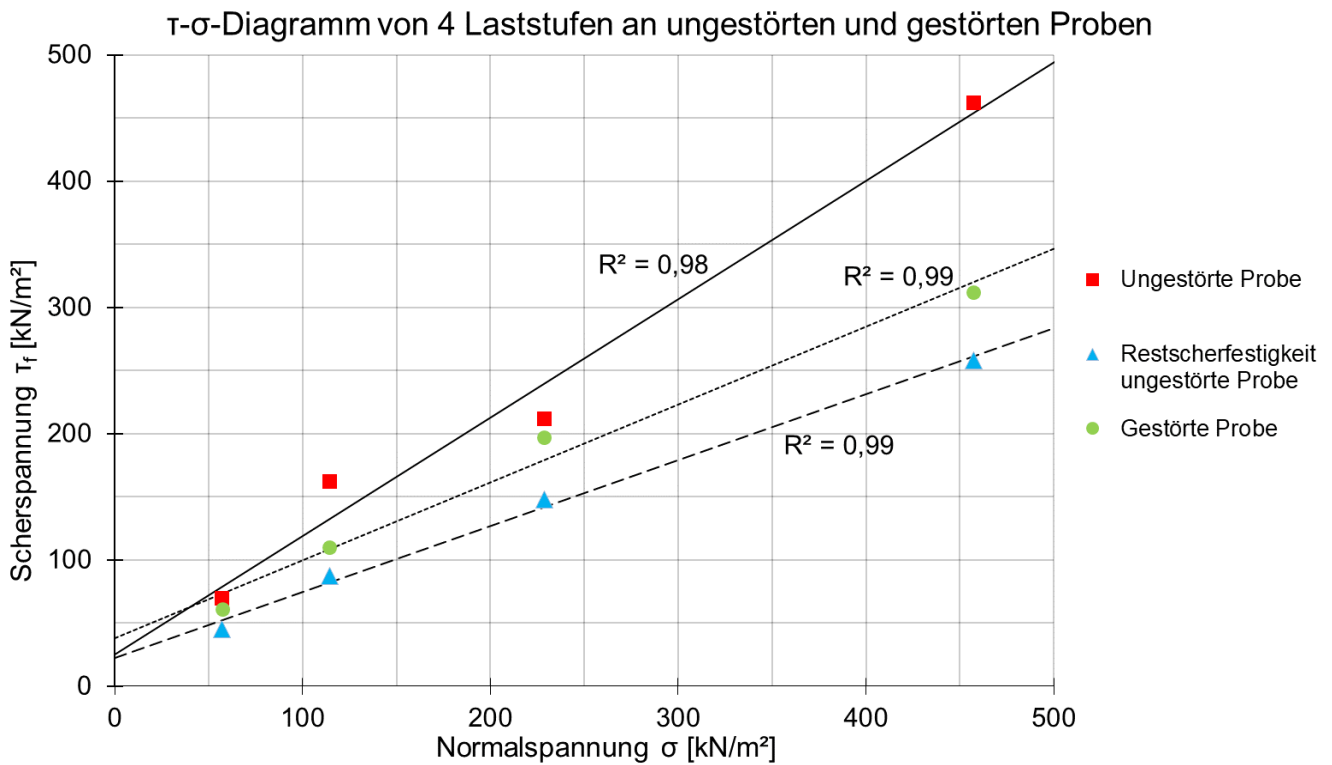


Abbildung 4-2: τ - σ -Diagramm der vier gefahrenen Laststufen der ungestörten Proben, der Restscherfestigkeit der ungestörten Proben und der gestörten Proben.

4.3 Einaxiale Druckfestigkeit

Für die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit nach DIN EN ISO 17892-7 (2018) wurden 18 Proben untersucht. Die einaxialen Druckversuche wurden außer an vier getrockneten Proben immer an Proben mit annähernd natürlichem Wassergehalt durchgeführt. Die Ergebniswerte bewegen sich zwischen 0,23 und 1,70 MPa und weichen teilweise stark voneinander ab. Der Mittelwert aller einaxialen Druckfestigkeiten kann mit 0,63 MPa angegeben werden. Der Mittelwert ist deshalb so hoch, da er durch die Ergebnisse der getrockneten Proben deutlich erhöht wird. Lässt man diese weg, würde der Mittelwert nur 0,51 MPa erreichen. Betrachtet man hingegen zum Vergleich nur den Mittelwert der vier getrockneten Proben, liegt dieser bei 1,04 MPa und somit deutlich über den Ergebniswerten der Proben mit annähernd natürlichem Wassergehalt.

Um weiters beurteilen zu können, wie die Werte der einaxialen Druckfestigkeiten verteilt sind, wurden Histogramme erstellt. Es ist eindeutig, dass die meisten Werte aller einaxialer Druckfestigkeiten im Bereich von 0,25 bis 0,75 MPa liegen. Bei Eliminierung der Werte der getrockneten Proben liegen die Ergebnisse noch eindeutiger im Bereich von 0,25 bis 0,75 MPa.

4.4 Scherfestigkeit

Die Scherfestigkeit wurde an ungestörten und gestörten Proben mit verändertem Wassergehalt nach DIN EN ISO 17892-10 (2019) ermittelt. Es wurden je vier Laststufen gefahren (Abbildung 4-2).

Der Reibungswinkel für die ungestörten Proben kann mit 43° und die Kohäsion mit $25,3 \text{ kN/m}^2$ angegeben werden. Beide Werte sind für Sande sehr hoch, was wiederum ein Hinweis auf eine Überkonsolidierung sein könnte.

Ebenfalls konnte aus den Versuchen mit den ungestörten Proben auch die Restscherfestigkeit bestimmt werden. Der hier ermittelte Reibungswinkel beträgt 28° und die Kohäsion $22,7 \text{ kN/m}^2$.

Da bei der Restscherfestigkeit die Probe bereits durchgeschert wurde und nur mehr die Sandkörner aufeinander reiben, konnte daraus abgeleitet werden, dass der Reibungswinkel bei Versuchen an gestörten Proben ähnlich hoch sein müsste, wie der Wert der Restscherfestigkeit. Der bestimmte Reibungswinkel von gestörten Proben liegt bei 32° und die Kohäsion erreicht $37,5 \text{ kN/m}^2$. Die Ergebniswerte der Versuche an gestörten Proben sind somit sogar etwas höher als die ermittelte Restscherfestigkeit der ungestörten Proben.

4.5 Veränderlichkeit

4.5.1 Veränderlichkeit nach NICKMANN (2010)

Um die Veränderlichkeit der Linzer Sande zu bestimmen, wurde der Versuch nach NICKMANN (2010) durchgeführt. Wider Erwarten haben fünf von sechs Proben die Wasserlagerung nahezu unverändert überstanden. Der Versuch nach NICKMANN (2010) sieht nach den Wasserlagerungen einen Kristallisationsversuch nach DIN EN 12370 (2020) vor. In diesem sind die Proben dann spätestens nach dem dritten Zyklus zerfallen.

Schlussendlich konnte eine Probe der Veränderlichkeitsklasse 3 und alle anderen Proben der Veränderlichkeitsklasse 1 zugeordnet werden. Die Veränderlichkeitsklasse 1 bedeutet gering veränderlich, was allerdings als Beschreibung für die Linzer Sande nicht zutreffend ist, da diese sehr wohl veränderlich sind, wie Untersuchungen im Gelände zeigten.

Daher kann aus den Resultaten gefolgert werden, dass die Linzer Sande einer der wenigen Locker- und Festgesteine sind, für welche der Veränderlichkeitsversuch nach NICKMANN (2010) nicht geeignet ist, da dieser besonders auf den Feinanteil reagiert.

4.5.2 Siebtrommelversuch

Auf Grund der Erkenntnisse aus Kapitel 4.5.1 wurden noch zwei Siebtrommelversuche nach DGGT E20 (2002) mit je zwei Teilversuchen durchgeführt. Zusätzlich zur Wasserlagerung werden die Proben noch einer mechanischen Beanspruchung ausgesetzt, was erheblichen Einfluss auf das Veränderlichkeitsverhalten haben kann.

Aus beiden Versuchen lässt sich eine sehr niedrige Zerfallsbeständigkeit ableiten. Der Zerfallsbeständigkeitsindex kann im besten Fall mit 13 % angegeben werden.

4.6 Dünnschliffanalyse

Von sechs ausgewählten Proben wurden Dünnschliffe mit eingefärbtem Kunstharz hergestellt, um die Mineralzusammensetzung und den Verzahnungsgrad zu beurteilen.

In allen Dünnschliffen sind zahlreiche zerbrochene, scharfkantige Körner sowie viele Körner mit Rissen vorhanden (Abbildung 4-3). Die Kornformen der unterschiedlichen Minerale sind xenomorph; überwiegend weisen die Körner sehr unregelmäßige Kornformen auf. Der Rundungsgrad der Körner variiert stark; es gibt wenige gut gerundete Quarzkörner, ansonsten ist der Großteil der Körner eckig bis kantengerundet.

Zu den vorhandenen Mineralen zählen Quarz, Alkalifeldspat, Plagioklas, Biotit und Muskovit, wobei die Feldspäte häufig verwittert sind.

Auffällig ist, dass nahezu alle Quarzkörner eine unregelmäßige Umrandung aufweisen und teilweise auch aufgeraute Kornoberflächen sichtbar sind. Auch zeigen die Feldspäte oft unregelmäßige und unscharfe Umrandungen.

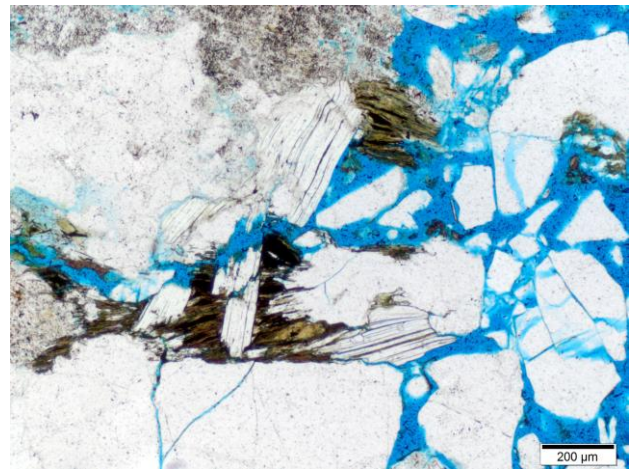


Abbildung 4-3: Dünnschliffaufnahme der Linzer Sande mit blau gefärbtem Kunstharz.

4.7 REM-Aufnahmen

Aus den REM-Aufnahmen wird ersichtlich, dass nahezu alle Quarzkörner angeätzte Oberflächen aufweisen, was auf eine deutlich erfolgte SiO_2 -Lösung hindeutet. Ebenfalls zeigen einige Quarzkörner zahlreiche Mikrorisse (Abbildung 4-4).

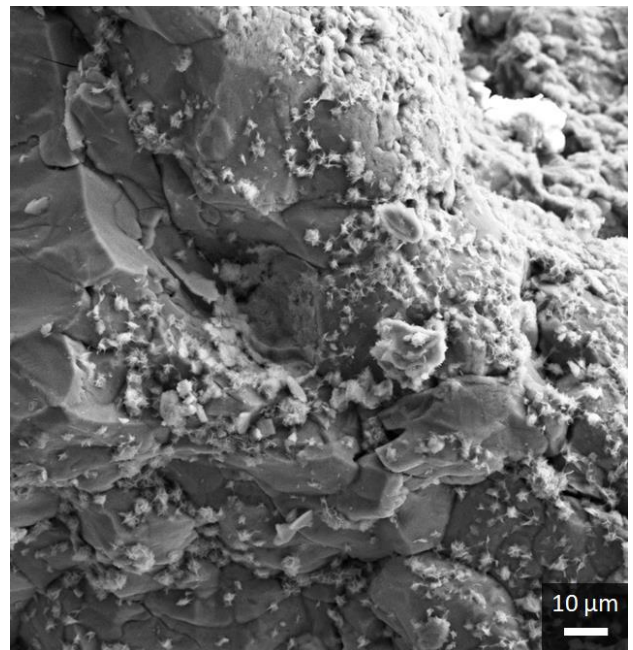


Abbildung 4-4: REM-Aufnahme eines rundlichen Quarzkorns mit sichtbaren Mikrorissen und aufgewachsenen Tonmineralen.

In weiteren Aufnahmen sind Quarzkörner und Feldspäte mit aufgewachsenen Tonmineralen zu sehen (Abbildung 4-4, Abbildung 4-5). Es ist davon auszu-

gehen, dass durch die vorhandene SiO_2 -Lösung im Porenwasser neue Tonminerale gebildet wurden. Die Tonminerale sollen noch mittels Röntgendiffraktometer analysiert werden.

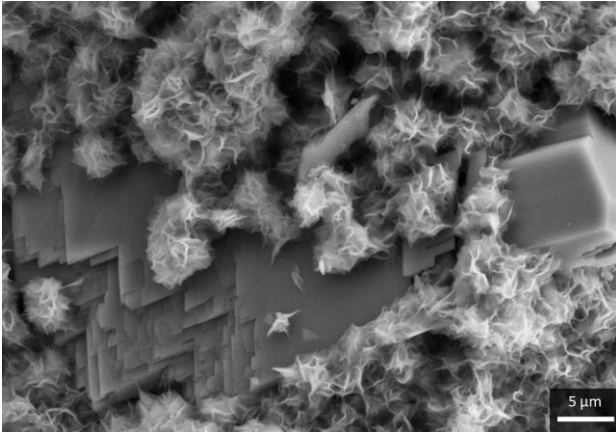


Abbildung 4-5: REM-Aufnahme eines Feldspatkorns mit gut sichtbarer Spaltbarkeit und zahlreichen aufgewachsenen Tonmineralen.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Aus den ermittelten Kennwerten kann abgeleitet werden, dass es sich bei den Linzer Sanden nicht um ein typisches Lockergestein handelt. Sie lassen sich sowohl anhand ihrer bodenmechanischen als auch ihrer felsmechanischen Eigenschaften charakterisieren. Damit lassen sie sich in die Gruppe der veränderlich festen Gesteine einordnen.

Weiters wird ersichtlich, dass auf Grund der ehemals hohen Überlagerung die Linzer Sande deutlich überkonsolidiert sind und auch die eckigen bis kantengerundeten Kornformen ihren Beitrag zur Festigkeit der Linzer Sande leisten. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse aus den REM-Aufnahmen ist davon auszugehen, dass aber vor allem die vorhandenen Tonminerale eine bindende Wirkung im Korngerüst ausüben und zu den relativ hohen einaxialen Druckfestigkeiten führen. Um bestimmen zu können, um welche Tonminerale es sich genau handelt, sollen im weiteren Verlauf des Projekts noch Röntgendiffraktometeranalysen durchgeführt werden. Die Gewinnung der Proben gestaltet sich allerdings wegen des sehr geringen Tonanteils in den Linzer Sanden als sehr schwierig.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass mehrere Faktoren zusammenspielen und für die hohe Festigkeit der Linzer Sande verantwortlich sind. Das Rätsel um die Festigkeitseigenschaften der Linzer Sande dürfte jedoch grundsätzlich geklärt sein.

Literaturverzeichnis

DGGT E20 (2002): Empfehlung Nr. 20 des Arbeitskreises 3.3 - Versuchstechnik Fels - der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik – Zerfallsbeständigkeit von Gestein – Siebtrommelversuch. – Bautechnik, 2/2002.

DIN EN 12370 (2020): Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Widerstandes gegen Kristallisation von Salzen. – Berlin (Beuth).

DIN EN ISO 14688-2 (2018): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen. – Berlin (Beuth).

DIN EN ISO 17892-1 (2015): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 1: Bestimmung des Wassergehalts. – Berlin (Beuth).

DIN EN ISO 17892-2 (2015): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 2: Bestimmung der Dichte des Bodens. – Berlin (Beuth).

DIN EN ISO 17892-4 (2017): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung. – Berlin (Beuth).

DIN EN ISO 17892-7 (2018): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 7: Einaxialer Druckversuch. – Berlin (Beuth).

DIN EN ISO 17892-10 (2019): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 10: Direkte Scherversuche. – Berlin (Beuth).

JACOBS, S. (2007): Bericht 2006 über geologische Aufnahmen im Paläogen und Neogen auf Blatt 32 Linz. – Jb. der GBA, 147: 624–625; Wien.

KRENMAYR, H.G. & ROETZEL, R. (2000): Die lithostratigraphische Formalisierung der Melker- und Linzer Sande: Die „Linz-Melk-Formation“. – Ber. Inst. Geol. Paläont., K.-F.-Univ. Graz, 2: 10; Graz.

NICKMANN, M. (2010): Abgrenzung und Klassifizierung veränderlich fester Gesteine unter ingenieur-geologischen Aspekten. – Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Bd. 12: 148; München (Pfeil Verlag).

PESCHEL, R. (1982): Erläuterungen zur „Geologischen Karte von Linz und Umgebung“. – Naturkundl. Jb. der Stadt Linz, 28: 181–236; Linz.

PILLER, W.E., EGGER, H., ERHART, C.W., GROSS, M., HARZHAUSER, M., HUBMANN, B., VAN HUSEN, D., KRENMAYR, H.G., KRYSSTYN, L., LEIN, R., LUKENEDER, A., MANDL, G.W., RÖGL, F., ROETZEL, R., RUPP, C., SCHNABEL, W., SCHÖNLAUB, H.P., SUMMESBERGER, H., WAGREICH, M. & WESSELY, G. (2004): Die stratigraphische Tabelle von Österreich 2004 (sedimentäre Schichtfolgen). – Wien (Österr. Akad. d. Wiss.).

RUPP, C. (2013): Bericht 2011–2012 über geologische Aufnahmen auf Blatt 4319 Linz. – Jb. der GBA, 153: 442–443; Wien.

www-01: <https://www.asfinag.at/verkehrssicherheit/bauen/bauprojekte/a-26-linzer-autobahn-knoten-linz-hummelhof/>, abgerufen am 08.03.2021.