

Vorbelasten mit der Ménard Vacuum Consolidation – Analytische und numerische Verformungsanalyse an einem norddeutschen Fallbeispiel

Ch. Tinat, M.-B. Dießelberg, J.-F. Kirstein, M. Rosenberg

ZUSAMMENFASSUNG Die Ménard Vacuum Consolidation (MVC) ist eine effektive und umweltschonende Methode zur Vorbelastung kompressibler Böden. Durch Erzeugen eines Unterdruckes wird temporär eine Vorbelastungsschüttung von circa 4 m ersetzt und damit die potentiellen Lastsetzungen des Bauwerkes vorweggenommen. Langfristige Kriechverformungen von organischen Böden werden bestmöglich durch die Entlastung nach dem MVC-Betrieb durch Abschalten der Pumpen reduziert. Die Vakuum-Methode weist gegenüber klassischen Auflastschüttungen den Vorteil auf, durch die isotrope Spannungserhöhung infolge des erzeugten Porenwasserunterdrucks keine Scherspannungen und damit Mitnahmesetzungen zu verursachen. Eine sofortige Grundbruch- und Standsicherheit ist somit auch bei breiigen Böden gewährleistet. Die Prognose und Abschätzung der im Rahmen des MVC-Verfahrens eintretenden Verformungen basiert bisher im Wesentlichen auf Erfahrungen, Beobachtungen und einfachen Konsolidationsberechnungen. Die vorliegende Untersuchung befasst sich damit, das MVC-Verfahren exemplarisch am Fallbeispiel der B202 in Schleswig-Holstein mit analytischen und numerischen Methoden unter Verwendung geeigneter Stoffmodelle nachzubilden, um deren Eignung für Verformungsberechnungen und -prognosen zukünftiger Projekte zu validieren. Die dafür erforderlichen Bodenparameter der norddeutschen Weichböden Torf und Klei wurden in Laborversuchen unter Berücksichtigung der spezifischen Besonderheiten organischer, kriechfähiger Böden ermittelt.

Preloading with Ménard Vacuum Consolidation – Analytical and numerical deformation analysis for a North German case study

ABSTRACT The Ménard Vacuum Consolidation Method (MVC) is an effective and environmentally friendly method of preloading compressible soils. Only by generating a vacuum, the surcharge load is equivalent to an embankment with a height of about 4 m. Long-term creep deformations of organic soils are best reduced by the unloading after vacuum preloading by switching off the pumps. Furthermore, the MVC method has the advantage, compared to conventional surcharging, of causing no shear stresses because of the isotropic stress increase induced by the applied vacuum. Thus, immediate stability is guaranteed even on very soft soils. The prediction and estimation of the deformations induced by the vacuum consolidation is still mainly based on experience, observations and simple consolidation calculations. The present study deals with the Ménard Vacuum project B202 in Schleswig-Holstein using analytical and numerical approaches and suitable material models to validate their suitability for deformation calculations and prognoses in future projects. The required soil and material parameters of northern German peat and organic clay were determined in laboratory tests taking the specific characteristics of organic and creeping soils into account.

STICHWÖRTER

Berechnung, Geotechnik, Spezialtiefbau, Bodenverbesserung

1 Einleitung

Die stetige Entwicklung neuer Techniken hat im Sektor der Baugrundverbesserungen zu einer Vielzahl neuer Anwendungsmöglichkeiten geführt. Nachhaltige Baugrundverbesserungsverfahren nutzen den vorhandenen Boden als Baustoff und genießen gegenüber Pfahlgründungen insbesondere bei großflächigen Bauwerken wirtschaftliche Vorzüge.

Bei Böden mit hohen Setzungsbeträgen werden häufig Bauverfahren angewendet, mit denen die Setzungen beschleunigt und vorweggenommen werden. Diese Vorbelastungsmaßnahmen wer-

den in klassischer Ausführung durch großvolumige Sand- oder Kiesschüttungen herbeigeführt. Insbesondere bei schwach durchlässigen Böden sind häufig lange Liegezeiten erforderlich, die mit konsolidationsbeschleunigenden Maßnahmen wie Vertikaldrains verkürzt werden.

Bei der Ménard Vacuum Consolidation (MVC) wird die Vorbelastung des Bodens durch den atmosphärischen Luftdruck ohne sichtbaren Belastungskörper erzeugt. Durch den Einsatz von speziellen Vertikal-Runddrains und das kurzfristige Erzeugen eines Unterdruckes wird der Vorbelastungsprozess des Bodens erheblich beschleunigt. Die sonst aufzubringende Sand- oder Kies-

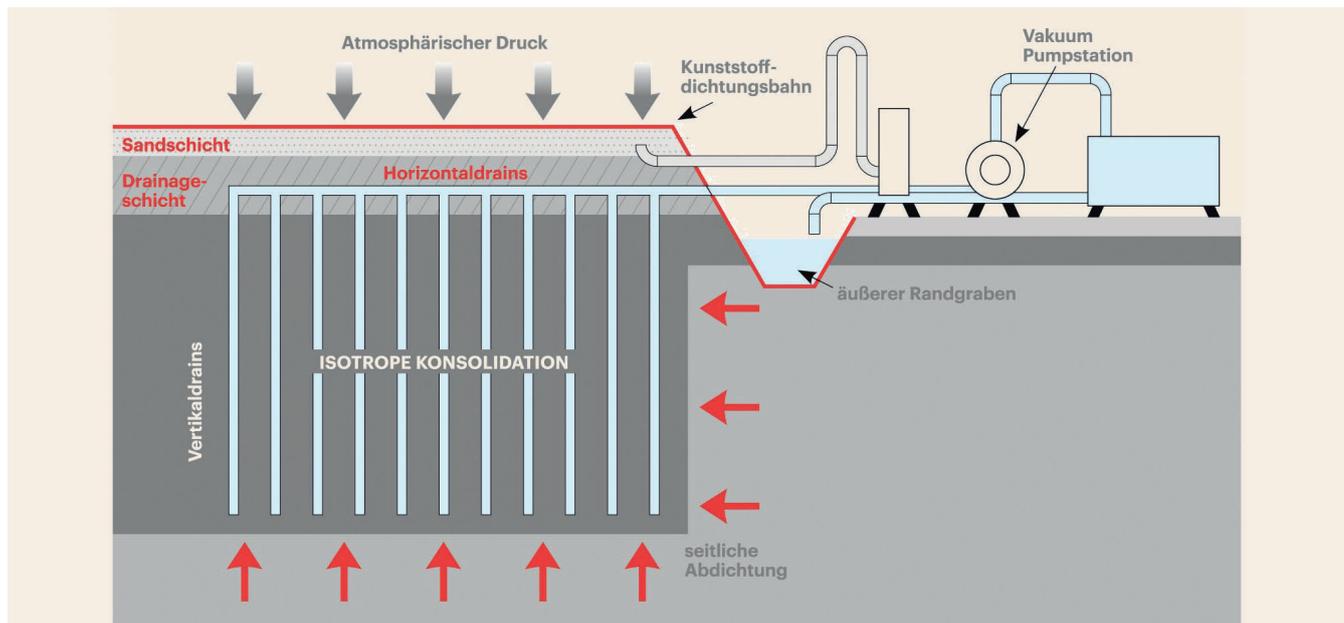


Bild 1. Prinzipskizze der Ménard Vacuum Consolidation Abb.: MENARD GmbH
 Fig. 1. Schematic diagram of Ménard vacuum consolidation Source: MENARD GmbH

schüttung sowie alle damit verbundenen Bodentransporte bleiben erspart.

Eine bedeutende Aufgabe in der Planungsphase liegt darin, das sich im Rahmen des MVC-Betriebes einstellende Zeit-Verformungsverhalten des zu konsolidierenden Bodens abzuschätzen. Hieran werden Bauablaufplanungen sowie bauverfahrenstechnische Überlegungen ausgerichtet. Weiterhin ist ein ausreichender Konsolidationsgrad der maßgebende Parameter für das Ende der Vorbelastungsphase und damit das Kriterium für das Abschalten der Pumpen. Eine zuverlässige Prognose des zeitabhängigen Verformungsverhaltens im Vorfeld einer Maßnahme ist daher von besonderem Interesse für die Baupraxis.

2 Die Ménard Vacuum Consolidation

2.1 Allgemeines und Anwendungsgebiete

Die Ménard Vacuum Consolidation wird weltweit als Alternative zur konventionellen Vorbelastungsschüttung und anderen Sondergründungsmaßnahmen angewendet. Neben den technischen und wirtschaftlichen Vorteilen entfallen kostenintensive sowie umweltbelastende Bodentransporte, welche bei klassischen Auflastschüttungen erforderlich sind.

Das MVC-Verfahren wird üblicherweise in wassergesättigten, weichen bis breiigen Böden eingesetzt, die eine geringe Wasserdurchlässigkeit aufweisen. Auch organische Böden bis hin zu Torfen stellen ein typisches Anwendungsgebiet dar. In Deutschland wurde die Ménard Vacuum Consolidation in folgenden Projekten erfolgreich ausgeführt:

- Grundsanierung der B202 zwischen Erfde und Norderstapel, 23 300 m², 2013
- Streckenabschnitt Ortsumgehung Husum/Rödemis, 6 900 m², 2013
- Neubau Schweiburger Siel, 1 600 m², 2011
- Neubau Airbus Werksgelände Hamburg „Mühlenberger Loch“, 85 000 m², 2002

- Erweiterung Seehafen Wismar, 15 000 m², 1997
- Erweiterung Hafensfläche Lübeck, 22 500 m², 1994

2.2 Funktionsprinzip

Das wesentliche Merkmal des MVC-Verfahrens ist die zur Oberflächenabdichtung eingesetzte Kunststoffolie. Die seitliche sowie untere Abdichtung des Vakuum-Blockes wird durch die geringe Durchlässigkeit des Bodens und ein gesteuertes Absetzen der Vertikaldrains sichergestellt. Hierfür werden eine vollständige Wassersättigung des Bodens und die Herstellung eines äußeren, mit Wasser gefüllten Randgrabens vorausgesetzt. Alternativ können vertikale Dicht- oder Folienwände zur seitlichen Abschirmung eingepresst oder eingefräst werden, um eine Vorbelastung auch direkt neben Bestandstrassen ausführen zu können [1] oder um durchlässige Zwischenschichten bis in größere Tiefen zu unterbrechen. Das innerhalb dieser Umschließung installierte System aus speziellen Vertikal- und Horizontaldrainagen mit rundem Querschnitt fördert Luft und das infolge der Konsolidation ausgepresste Porenwasser mittels Pumpen aus dem Boden. Ein Prinzipschnitt mit den wesentlichen Verfahrens-Komponenten ist in **Bild 1** schematisch dargestellt.

2.3 Wirkungsweise nach Effektivspannungskonzept

Bei fast allen geotechnischen Fragestellungen wird im Rahmen von Spannungs-Verformungsberechnungen der atmosphärische Luftdruck vernachlässigt. Diese Vereinfachung beeinflusst die Berechnungsergebnisse nicht, da der Luftdruck keine variierende Größe bei üblichen geotechnischen Überlegungen darstellt. Um hingegen die Wirkungsweise des MVC-Verfahrens zu verstehen, ist eine Einbeziehung des Luftdruckes in das Effektivspannungskonzept erforderlich.

Der Luftdruck ist als diejenige Spannung definiert, welche die Atmosphäre unter dem Einfluss der Schwerkraft auf die Erdober-

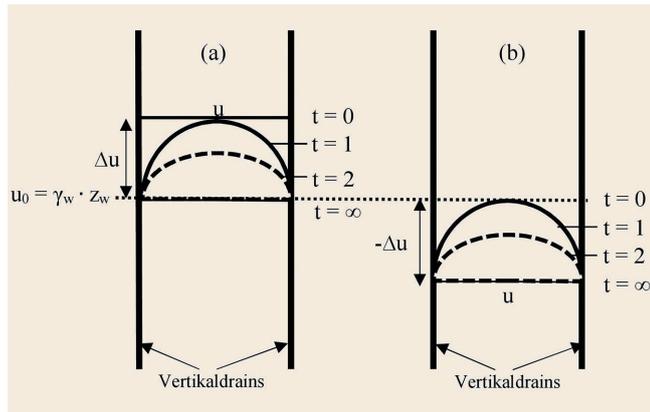


Bild 3. (a) Abbau des Porenwasserüberdruckes bei einer Oberflächenbelastung; (b) Reduktion des hydrostatischen Porenwasserdruckes bei der Vakuum-Konsolidation Abb.: C. Tinat
 Fig 3. (a) Degradation of pore water pressure due to a surcharge loading; (b) Reduction of hydrostatic pore water pressure during vacuum consolidation Source: C. Tinat

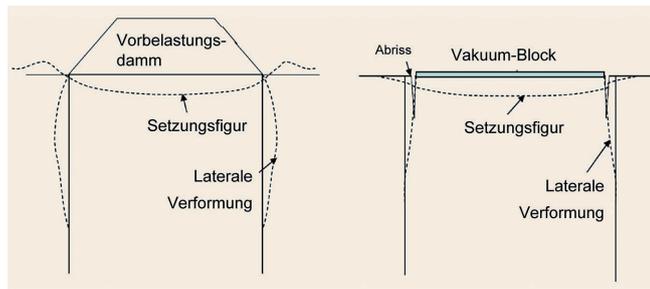


Bild 4. Untergrundverformungen bei Auflastschüttung und Vakuum-Konsolidation Abb.: [3] Chai, J. C. et al. (ins Deutsche übersetzt)
 Fig. 4. Deformation of soil under embankment surcharge and under vacuum consolidation Source: [3] Chai, J. C. et al. (translated to German)

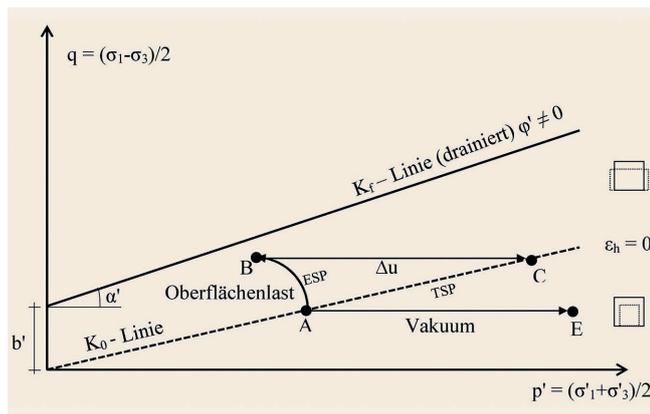


Bild 5. Vergleich der konventionellen Vorbelastung mit der Vakuum-Konsolidation im p-q-Diagramm basierend auf [2] Abb.: C. Tinat
 Fig. 5. Comparison of conventional preloading and Vacuum Consolidation in p-q-diagram based on [2] Source: C. Tinat

Auflastschüttung und Vakuum-Konsolidation wurde so in einigen praktischen Anwendungen eine vollständige gegenseitige Aufhebung der Randverformungen erreicht. Die typischen Untergrundverformungen einer Auflastschüttung im Vergleich zur Vakuum-Konsolidation werden in **Bild 4** schematisch dargestellt.

2.5.1 Idealierte Spannungspfade

Ein weiterer wesentlicher Vorteil des MVC-Verfahrens gegenüber der klassischen Auflastschüttung ist die Grundbruchsicherheit. Dieser Aspekt begründet sich mit dem Verhältnis der Hauptspannungen während des MVC-Betriebes.

Die Spannungspfade einer konventionellen Vorbelastung werden denen der isotropen Spannungszunahme bei Vakuum-Konsolidation im p-q-Diagramm in **Bild 5** gegenübergestellt.

Im Fall einer schnell aufgetragenen Auflastschüttung werden die zusätzlichen Totlastspannungen zunächst vom Porenwasser aufgenommen. Der Spannungspfad folgt der Linie A-B (Effektivspannungspfad – ESP). Dabei besteht die Gefahr, dass der Spannungszustand die charakteristische Bruchgerade des Bodens erreicht. Dies würde zu einem Versagen beziehungsweise einem Grundbruch führen. Erst mit dem Abfließen von Porenwasser baut sich der Porenwasserüberdruck ab (Pfad B-C) und erreicht den Totlastspannungspfad (TSP).

Die Spannungszunahme infolge einer Auflastschüttung mit $\Delta\sigma'_3 < \Delta\sigma'_1$ zieht demnach stets einen Zuwachs der Deviatorspannung nach sich. Aufgrund der beschriebenen Grundbruchgefahr klassischer Vorbelastungen müssen diese häufig mit mehreren Schüttstufen und mehrphasig langen Konsolidationszeiten ausgeführt werden. Bei schwach durchlässigen Böden vervielfacht jede Schüttstufe den Zeitbedarf und ist daher ein erheblicher Nachteil für die Baupraxis.

Die Spannungserhöhung im MVC-Betrieb erfolgt mit $\Delta\sigma'_1 = \Delta\sigma'_3$ isotrop. Die Deviatorspannung ändert sich dabei nicht (Pfad A-E). Demnach kann der Spannungszustand des Bodens die Bruchgerade zu keinem Zeitpunkt erreichen. Eine Grundbruchgefahr kann beim MVC-Verfahren damit ausgeschlossen werden. Die Konsolidationszeiten der Schüttstufen und die Zeit für die Schüttung der Vorbelastung entfallen.

3 Verformungsanalyse am Fallbeispiel

3.1 Projektbeschreibung

Die B202 verläuft von St. Peter-Ording nach Oldenburg (Holstein) und stellt eine bedeutende Verbindung zwischen der Nord- und Ostseeküste Schleswig-Holsteins dar. Ihr infrastrukturell wichtiger Streckenabschnitt zwischen Erfde und Norderstapel war lange bekannt für den desaströsen Zustand und musste im Jahr 2011 auf eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von nur 40 km/h begrenzt werden. Ursache für die erheblichen Schäden war die direkte Gründung des Dammkörpers auf den für die regionale Moorregion typischen organischen Weichschichten aus Torf und Klei. Diese liegen entlang des genannten Streckenabschnittes in Wechsellagerung mit einer Mächtigkeit von bis zu 12 m vor und überlagern die pleistozänen Sande.

Das Schadensbild der Fahrbahn erforderte eine Straßenerneuerung mit besonderen Gründungsmaßnahmen, welche im Zeitraum 2012 bis 2013 realisiert wurde und in [1] umfassend vorgestellt wird. Der baugrundtechnisch kritische Untergrund wurde für die zur Hälfte im Altbestand liegende Neutrassse mit der Ménard Vacuum Consolidation vorbelastet. Dabei traten während des dreimonatigen MVC-Betriebes Setzungen von im Mittel 1,5 m bis zu 2 m im Maximum auf. Die baubetriebliche Besonderheit war, dass die Vorbelastung der Neubautrassse direkt neben der zur Hälfte verbliebenen Bestandsstraße erfolgte und der Verkehr dauerhaft aufrechterhalten werden musste (**Bild 6**) [1].

Für die in diesem Beitrag behandelte Verformungsanalyse wird exemplarisch der Bau-km 1+170 als Modellquerschnitt zugrunde gelegt. Während des MVC-Betriebes wurden hier die vertikalen Verformungen (Setzungspegel), horizontalen Verformungen (Vertikalinklinometer) und die Unterdruckwerte im System mittels Piezometer aufgezeichnet. Der Unterdruck war innerhalb von zehn Tagen vollständig aufgebaut und betrug bis zum Betriebsende nach 103 Tagen 0,7 bar, das heißt $\Delta u = 70 \text{ kN/m}^2$. Das Baugrundmodell des Querschnittes vor der Maßnahme ist in **Bild 7** dargestellt. Oberflächennah steht Torf mit einer Schichtmächtigkeit von 4,0 m an. Darunter folgt eine Kleischicht mit einer Mächtigkeit von 3,5 m. Ab 7,5 m unter Geländeoberkante (GOK) sind mitteldicht bis dicht gelagerte Sande anzutreffen. Der Grundwasserspiegel liegt in der Torfschicht bei circa 1,5 m unter GOK.

Die Entnahme der Bodenproben erfolgte nach der Baumaßnahme im Zuge wissenschaftlicher Nachuntersuchungen gemäß [4] und [5]. Die Entnahmestelle der Proben befindet sich in direkter Nähe zum analysierten Messquerschnitt, aber mit ausreichendem Abstand im ungestörten Bereich.

3.2 Ergebnisse des Laborprogramms

Zur Bestimmung der Eingangswerte und Stoffparameter für die analytische und numerische Verformungsanalyse wurde ein umfangreiches Laborprogramm unter Berücksichtigung der spezifischen Besonderheiten der hoch organischen, in breiiger Konsistenz befindlichen Böden durchgeführt. Neben einer Klassifizierung umfasste das Untersuchungsprogramm zahlreiche Kompressionsversuche zur Analyse des Spannungs-Verformungsverhaltens sowie Versuche zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in Triaxialzellen. Für die Durchlässigkeits- und Kompressionsversuche wurden Sonderproben der Güteklasse 1 verwendet. Die Ergebnisse der Kompressionsversuche am Klei werden in [4] und [5] umfassend vorgestellt. Ein Großteil der Kompressionsversuche wurde als Langzeitversuche in mechanischen Ödometerständen mit inkrementeller Laststeigerung bei Erst- und Wiederbelastung ausgeführt. Die einzelnen Laststufen wurden teilweise mehrere Tage bis Wochen aufrechterhalten. Die Ausgangsprobenhöhe betrug bei allen Kompressionsversuchen lediglich 14 mm, um einen möglichst schnellen Abschluss der Primärkonsolidation, das heißt einen vollständigen Abbau des Porenwasserüberdruckes, je Laststufe zu erreichen. Für die Bestimmung der Steifigkeit wurde der Konsolidationstheorie entsprechend, der Anteil der Verformungen bis zum Ende der Primärkonsolidation, hier Porenzahländerung (Δe^p) berücksichtigt. Teilweise sind nach wenigen Stunden bereits nennenswerte Kriechsetzungen und damit eine weitere Porenzahlverringering (Δe^v) eingetreten. Als Steifigkeitsparameter wurde der international gebräuchliche und für die verwendeten Stoffmodelle erforderliche Kompressionsbeiwert nach Gleichung (6) ermittelt.

$$C_c = \Delta e^p / \Delta \log \sigma' \quad (6)$$

Der Kompressionsbeiwert steht über die Porenzahl e des Bodens in direkter Beziehung zum in Deutschland üblicherweise verwendeten Steifemodul E_s . Im Zuge der Versuchsreihe wurde ein weitestgehend konstanter, also spannungsunabhängiger Kompressionsbeiwert C_c in den relevanten Spannungsbereichen festgestellt. Bei den Torfproben nahm der Kompressionsbeiwert mit zunehmenden Vertikalspannungen $> 150 \text{ kN/m}^2$ ab. Diese Beob-



Bild 6. Vakuum-Fläche direkt neben der Bestandsstraße B202
Abb.: MENARD GmbH
Fig. 6. Vacuum area directly next to existing road B202
Source: MENARD GmbH

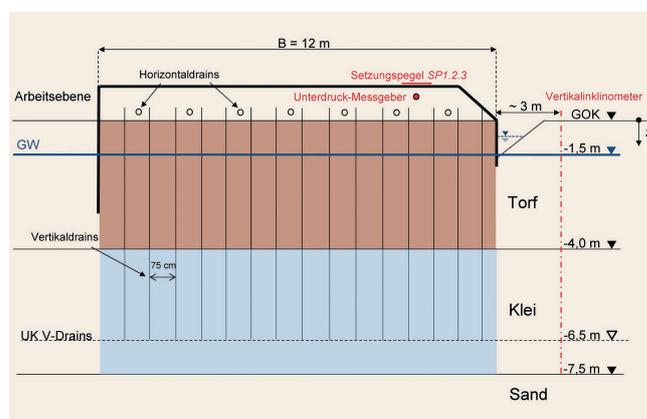


Bild 7. MVC-Modellquerschnitt Bau-km 1+170 mit Darstellung der Messtechnik
Abb.: C. Tinat
Fig. 7. MVC model of station 1 + 170 with measuring technique
Source: C. Tinat

achtungen entsprechen den Untersuchungsergebnissen an vergleichbar sensitiven Böden [6], [7].

Insbesondere bei Erstbelastung wurde sowohl für den Torf als auch für den Klei ein ausgeprägtes Kriechverhalten im Zuge der Sekundärkonsolidation beobachtet. Der Sekundärsetzungsbeiwert nach Gleichung 7 wurde erwartungsgemäß als weitestgehend spannungsunabhängig identifiziert und ist auch über die Dauer einer Kriechphase bei Erstbelastungsbedingungen nahezu konstant.

$$C_{\alpha} = \Delta e^v / \Delta \log t \quad (7)$$

Bei Rekompensation wurde eine erhebliche Verminderung der Kompressibilität und der Kriechneigung nachgewiesen, welche im direkten Zusammenhang mit der Vor-, Ent-, und anschließenden Wiederbelastung steht. Es besteht eine Korrelation mit dem sogenannten Recompression Ratio (RCR), das heißt mit dem Quotienten aus der Spannungsdifferenz der Wiederbelastung und der Spannungsdifferenz der Entlastung [4], [5]. Weiterhin wurde eine Zeit- sowie Spannungsabhängigkeit des Kriechbeiwertes bei Wiederbelastung ($C_{\alpha r}$) nachgewiesen [4], [5]. Das Gesetz von Mesri [6], welches einen konstanten Quotienten aus Kompressionsbeiwert und Sekundärsetzungsbeiwert $C_{\alpha}/C_c = \text{const.}$ beschreibt, konnte in der für organische Böden üblichen Bandbreite

Tabelle 1. Bodenparameter
Table 1. Soil parameters

	e_0 [-]	w [%]	v_{gl} [%]	γ [kN/m ³]	k_h/k_v [-]	C_α [-]	C_c [-]	C_α/C_c [-]	c_v [m ² /s]
Torf	10,3	700	90	10	0,52	0,302	4,82	0,063	1,1010 ⁻⁷
Klei	3,6	140	12	13	0,90	0,076	1,35	0,056	1,0710 ⁻⁸

von $C_\alpha/C_c = 0,05 \pm 0,01$ sowohl bei Erst- als auch Wiederbelastungsbedingungen mit $C_\alpha/C_c = C_{\alpha r}/C_{cr} = \text{const.}$ bestätigt werden.

Ein Auszug der für diesen Beitrag maßgebenden Bodenkennwerte ist in **Tabelle 1** zusammengefasst.

Beide Versuchsböden sind dem Durchlässigkeitsbereich „sehr schwach durchlässig“ zuzuordnen. Das in den Laborversuchen ermittelte Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Wasserdurchlässigkeit k_h/k_v liegt unter 1. Dies widerspricht der häufig getroffenen Annahme von $k_h/k_v \geq 2$ und ist auf die starke Probenkompression infolge des Zeldruckes in den Triaxialzellen zurückzuführen.

3.3 Analytische Nachrechnung

3.3.1 Verformungen im Gleichgewichtszustand nach der Primärkonsolidation

Die Berechnung der Gesamtverformungen im Gleichgewichtszustand der Vakuum-Konsolidation erfolgt nach [8]. Die vertikale Stauchung (ϵ_v) infolge der Spannungssteigerung im Vakuumbetrieb ($\Delta\sigma'_{vac}$) wird auf Basis eindimensionaler Spannungs-Verformungsbeziehungen gemäß Gleichung 8 ermittelt.

$$\epsilon_v = \alpha \cdot \frac{C_c}{1+e} \cdot \log\left(1 + \frac{\Delta\sigma'_{vac}}{\sigma'_{v0}}\right) \quad (8)$$

Der Koeffizient α erfasst die Abminderung der vertikalen Dehnung aufgrund der lateralen, nach innen gerichteten Kompression des Vakuum-Blockes. Dieser stellt folglich den Anteil der vertikalen Dehnung an der volumetrischen Gesamtdehnung dar. Die horizontalen Verformungen sind nicht konstant, sondern nehmen mit größer werdender Tiefe ab. Der Koeffizient α ist demnach eine tiefenabhängige Größe, welche eine Funktion des Primärspannungszustandes darstellt und von den horizontalen Spannungszuständen abhängt [8]. Oberflächennah beträgt $\alpha_{min} = 0,9$ und nimmt im vorliegenden Beispiel bis 5,8 m unter GOK auf $\alpha_{max} = 1$ zu.

Bei der Ermittlung der Primärspannungen wurde die geologische Alterung der kriechfähigen Böden unter Eigenlast berücksichtigt und eine der Porenzahl äquivalenten Spannung angesetzt. Weiterhin wurde ein Erdwiderstand infolge der Eigenlast des Bodens mit 75 % des passiven Erddruckes im Inneren des MVC-Blockes angesetzt. Diese Annahme begründet sich mit den vergleichsweise großen lateralen Verformungen und wurde anhand der Größe der Formänderungen an den Grenzflächen begründet. Für den Modellquerschnitt 1+170 ergeben sich rechnerische Vertikalverformungen von $s_1 = 1,76$ m als Primärsetzungsmaß. Die tiefenabhängig berechneten lateralen Verformungen sind in **Bild 8** dargestellt und den Messwerten des Vertikalinklinometers gegenübergestellt.

Das Berechnungsergebnis weist eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen lateralen Verformungen ab 1 m unter GOK auf. Oberflächennah werden die Verformungen mit der analyti-

schen Berechnung zu groß abgeschätzt. Dies wurde in zahlreichen Vergleichsrechnungen festgestellt und ist im Wesentlichen auf die vereinfachte Berechnungsmethodik zurückzuführen, da die horizontalen Scherspannungen aus der Auffüllung der Arbeitsebene vernachlässigt werden, welche den nach innen gerichteten Vakuum-Verformungen entgegenwirken [8].

Zudem sind Ungenauigkeiten der Messergebnisse aus einer gestörten Interaktion zwischen MVC-Grenzfläche und Vertikalinklinometer infolge des oberflächennahen Randgrabens zu vermuten.

Das Verhältnis der mittleren einseitigen Randverformung zu der vertikalen Primärsetzung beträgt etwa $\delta_{1h}/s_1 \approx 2\%$ im Torf und $\delta_{1h}/s_1 \approx 1\%$ im Klei und ist damit vernachlässigbar gering.

Das vertikale Setzungsmaß wird gegenüber ödometrischen Bedingungen lediglich um etwa 2 % abgemindert. Bei Ansatz von Erdruhedruckbedingungen im Inneren des MVC-Blockes würde dies einem über die Tiefe gemittelten Wert von $\alpha \approx 0,98$ in Gleichung (8) entsprechen. Für überschlägige Spannungs-Verformungsabschätzungen würde der Ansatz einer eindimensionalen Kompression demnach ausreichend genaue Ergebnisse zur Bestimmung des MVC-Primärsetzungsmaßes liefern. Der Einfluss weiterer Faktoren wie die oben genannte Ungenauigkeit der analytischen Herangehensweise sowie die Streuung der bodenmechanischen Parameter ist insbesondere bei organischen Böden größer.

3.3.2 Analyse des zeitabhängigen Verformungsverhaltens

Für die zeitabhängige Beurteilung des Konsolidationsprozesses wurde auf die Ansätze von Barron [9] unter Berücksichtigung des Schmiereffektes nach Hansbo [10] zurückgegriffen. Diese erweitern Terzaghis eindimensionale Konsolidationstheorie um den radialen Wasserzufluss in die vertikalen Drainkörper. Folglich wurde auf allgemeingültige und konventionell gebräuchliche Konsolidationsmodelle für die Berechnungen zurückgegriffen.

Die Schmiereffekt-Theorie beschreibt den Einfluss der durch die Draininstallation gestörten und dadurch weniger durchlässigen Zone im umgebenden Boden. Dieser Effekt ist je nach Herstellung und Bodenart unterschiedlich stark ausgeprägt und gilt als nicht eindeutig nachgewiesen.

Die berechneten Zeit-Setzungsverläufe sind in **Bild 9** dargestellt. Darin ist ebenfalls der tatsächlich im Vakuum-Betrieb eingetretene Zeit-Setzungsverlauf des örtlichen Setzungspegels enthalten.

Der Zeit-Setzungsverlauf, welcher unter Einbeziehung des Schmiereffektes ermittelt wurde (blaue Linie), unterschätzt die Konsolidationsrate. Möglicherweise ist der Schmiereffekt bei stark organischen, faserigen Torfböden nicht so stark ausgeprägt wie bei den mineralischen Tonböden, die den Untersuchungen von [10] zugrunde liegen.

Die ohne Schmiereffekt berechnete Zeit-Setzungskurve (rote Kurve) weist eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten

insbesondere ab 50 Tagen Konsolidationszeit auf. Im frühen Zeitabschnitt bis 50 Tage ist der in situ gemessene Vakuum-Konsolidationsprozess gegenüber der analytischen Lösung beschleunigt. Diese beim MVC-Verfahren typische Beobachtung ist auch in [11] beschrieben. Eine Ursache für die in der frühen Phase beschleunigte Konsolidationsrate stellt eine durch die Vakuum-Konsolidation hervorgerufene Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit gegenüber den Laborversuchen dar. Nach [11] werden durch den im Vakuum-Verfahren erzeugten Unterdruck die Gasbläschen schneller aus dem Porengefüge getrieben, als es bei der klassischen Konsolidation der Fall ist. Der im Vergleich zum Zweiphasenfluss beschleunigte Einphasenfluss zieht die gegenüber der Berechnung größeren Konsolidationsraten insbesondere in den ersten Tagen nach sich.

3.4 Numerische Verformungsanalyse

3.4.1 Allgemeines

Seit 2014 ist im FE-Programm PLAXIS die Eigenschaft „vacuum“ für Vertikaldrains implementiert, mit welcher eine Modellierung der Vakuum-Konsolidation ermöglicht wird [12]. Eine direkte Simulation des Unterdruckes findet jedoch nicht statt, da der atmosphärische Luftdruck im Programm grundsätzlich als konstant definiert ist. Über die Zuweisung der Eigenschaft „vacuum“ wird nach [12] jedem Drain vielmehr ein eigener, vom globalen Wasserstand unabhängiger Wasserstand zugeordnet. Ist dieser Wasserstand niedriger als der globale, so entsteht eine Druckdifferenz in den Drainagen. Aufgrund der daraus resultierenden Sogwirkung wird das Porenwasser im Modell aus dem Vakuum-Block abgeführt und es kommt zu einem Absinken des Grundwasserspiegels. Diese Grundwasserabsenkung ist ein von der Realität abweichender Modell-Effekt. Beim MVC-Verfahren wird die Höhenlage des Grundwasserspiegels nicht beeinflusst, sondern lediglich der hydrostatische Wasserdruck im abgedichteten System abgemindert. Um die Nebeneffekte dieser von der Realität abweichenden Modellbildung aufzuheben, werden gemäß Benutzerhandbuch folgende regulierende Modelleinstellungen erforderlich:

- Die Bodenporen im Vakuum-Block werden weiterhin als vollständig gesättigt definiert.
- Es findet eine Anpassung der Bodenwichte statt, um zusätzliche Lasten aus der fehlenden Auftriebswirkung infolge der sich einstellenden Grundwasserabsenkung auszuschließen.

3.4.2 Modellbildung

Der oben dargestellte Messquerschnitt von Bau-km 1+170 wird gemäß **Bild 10** in ein vereinfachtes symmetrisches 2D-Modell von Plaxis übertragen. Hierin ist der im Modell abgesenkte Grundwasserhorizont während der FE-Vakuum-Phase dargestellt.

Der unter realen Bedingungen radiale Wasserzufluss in die Vertikaldrains wurde über Anpassung des horizontalen Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes in das 2D-Modell überführt. Hierfür wurde das iterative Verfahren nach [13] angewendet, mit welchem ein für die Konsolidationsberechnung äquivalenter Durchlässigkeitsbeiwert für eine zweidimensionale Drainagewand ermittelt wird. Das Raster der Draineelemente bleibt dabei unverändert. Der in Abschnitt 3.3.2 beschriebene Schmiereffekt bei Drainherstellung wurde nicht berücksichtigt.

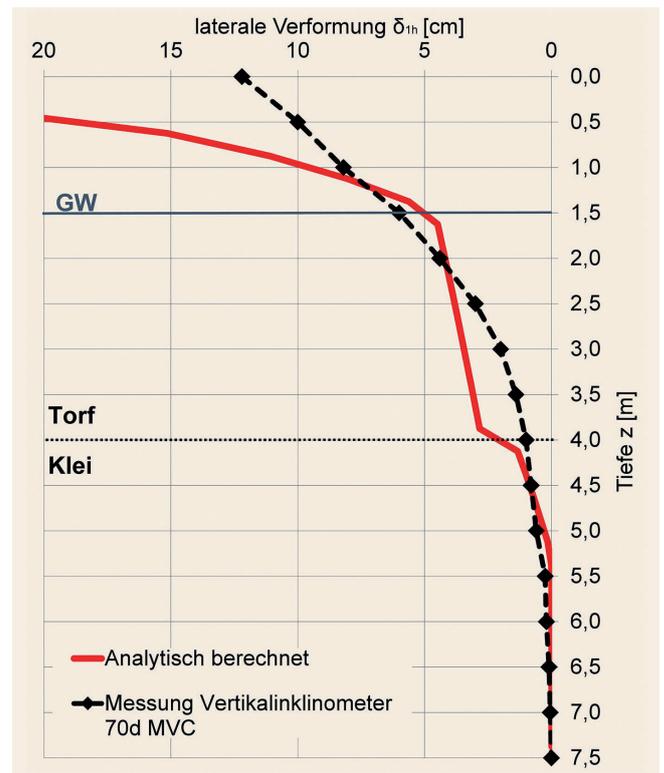


Bild 8. Horizontalverformungen im MVC-Modellquerschnitt *Abb.: C. Tinat*
 Fig. 8. Lateral deformations of the MVC model *Source: C. Tinat*

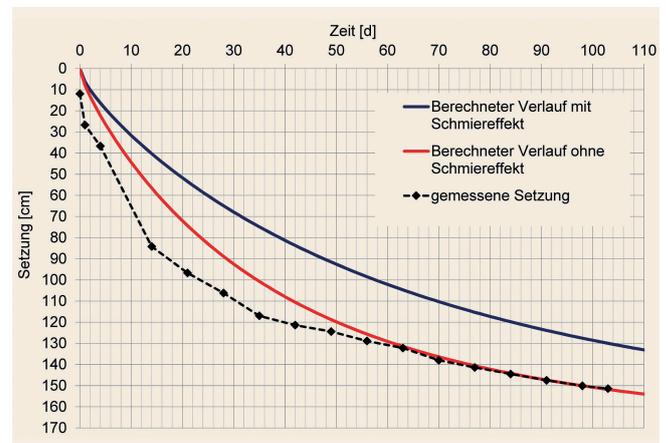


Bild 9. Analytische Berechnungsergebnisse für den Modellquerschnitt *Abb.: C. Tinat*
 Fig. 9. Analytical calculation results for the model *Source: C. Tinat*

Die einzelnen Bauzustände und der rund 100-tägige Vakuum-Betrieb wurden in einzelnen Berechnungsphasen modelliert. Die Berechnung wurde wie in [12] als fully-coupled flow-deformation analysis ausgeführt, das heißt als zeitabhängige Betrachtung der Verformungen in Abhängigkeit der Strömungsverhältnisse und resultierenden Porenwasserdrücke.

3.4.3 Verwendete Stoffmodelle

Bei den FE-Berechnungen wurde das Soft-Soil-Creep-Modell zur Abbildung der organischen Weichböden Klei und Torf angewendet. Das Stoffmodell eignet sich speziell für weiche, stark ver-

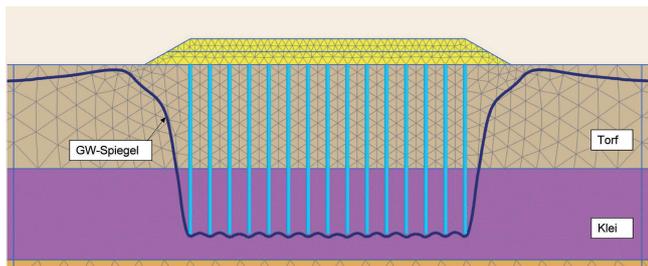


Bild 10. 2D-FE-Modell des Messquerschnittes 1+170 Abb.: M.-B. Dießelberg
 Fig.10. 2D FE model of station 1+170 Source: M.-B. Dießelberg

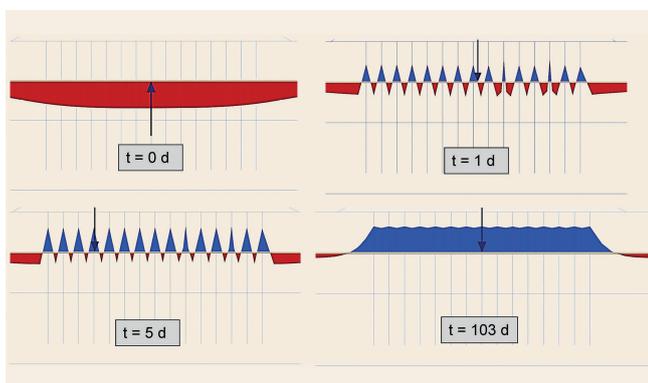


Bild 11. Porenwasserdruckentwicklung im Horizontalschnitt
 Abb.: M.-B. Dießelberg
 Fig. 11. Pore pressure development in a horizontal section
 Source: M.-B. Dießelberg

formungsfähige Böden mit hohen Dehnungsraten. In Ergänzung zum Soft-Soil-Modell berücksichtigt Soft-Soil-Creep als elastoviskoplastisches Stoffmodell das viskose Kriechen nach Abschluss der Primärkonsolidation und ist daher insbesondere für Langzeitanalysen unter Berücksichtigung der Sekundärkonsolidation geeignet. Die Ermittlung der Dehnungen basiert auf der logarithmischen Beziehung zwischen der Porenzahländerung und der effektiven Spannung (C_c) beziehungsweise der Porenzahländerung und der Kriechdauer (C_a). Es wurden die Stoffparameter gemäß Tabelle 1 angesetzt.

Der unterlagernden Sandschicht wurde das Stoffmodell Mohr-Coulomb unter Ansatz von üblichen Erfahrungswerten für miteldichtgelagerte Sande zugeordnet.

3.4.4 Spannungen und Verformungen im Vakuum-Betrieb

Die Spannungszustände im FE-Modell entsprechen der in Abschnitt 2.3 und 2.4 beschriebenen Wirkungsweise des MVC-Verfahrens. Während die Totspannungen in der FE-Vakuum-Phase unverändert bleiben, nimmt der Porenwasserdruck ausgehend von den Drains gemäß **Bild 11** ab. In den Drainkörpern ist mit Beginn der Vakuum-Phase eine Reduktion des Porenwasserdruckes erkennbar, der im FE-Programm als negativer Porenwasserdruck (blau) dargestellt wird. Zum Ende des Vakuum-Betriebes (103 Tage) herrscht ein konstanter Verlauf innerhalb des Vakuum-Blockes, das heißt im dargestellten Schnitt in der Torfschicht ist die Primärkonsolidation abgeschlossen (Gleichgewichtszustand). Außerhalb des modellierten Vakuum-Blockes

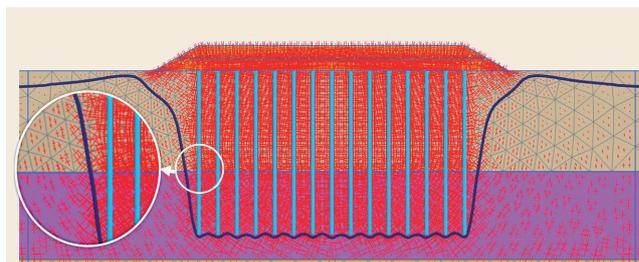


Bild 12. Hauptspannungstrajektorien (Effektivspannungen) nach 103 Tagen Vakuum-Betrieb Abb.: M.-B. Dießelberg
 Fig. 12. Effective principal stresses after 103 days of vacuum operation
 Source: M.-B. Dießelberg

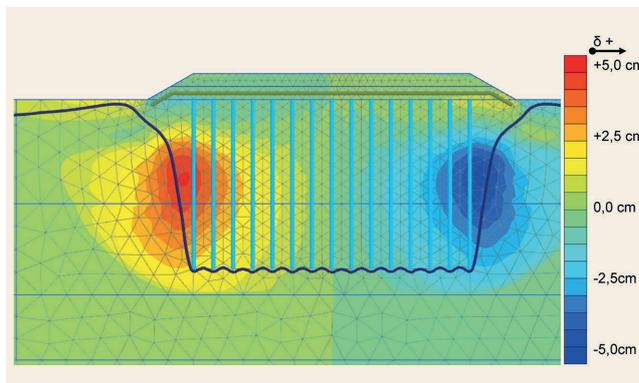


Bild 13. Horizontalverformungen (qualitativ) nach 103 Tagen Vakuum-Betrieb Abb.: M.-B. Dießelberg
 Fig. 13. Lateral displacements (qualitatively) after 103 days of vacuum operation
 Source: M.-B. Dießelberg

herrscht über die gesamte Vakuum-Phase ein konstanter hydrostatischer Porenwasserdruck des Grundwassers, welcher lediglich im nahen Grenzbereich zum MVC-Block geringfügig beeinflusst ist.

Bild 12 zeigt die aus der Reduktion des Porenwasserdruckes resultierenden, effektiven Hauptspannungstrajektorien nach 103 Tagen MVC-Betrieb. In **Bild 13** sind die die horizontalen Verformungen qualitativ dargestellt.

Innerhalb des Vakuum-Blockes kommt es zu einer konzentrierten Erhöhung der vertikalen und horizontalen Spannungen. Die isotrope Spannungserhöhung wird zutreffend abgebildet. Bereits wenige Dezimeter außerhalb der modellierten vacuum Drains findet keine nennenswerte Zunahme der effektiven Spannungen statt. Die Spannungstrajektorien verlaufen gegenüber dem Primärspannungszustand nahezu unverändert. Lediglich oberflächennah bewirkt die Auflast aus der Arbeitsebene eine plausible Mobilisierung von Scherspannungen und nach außen gerichtete Horizontalverformungen (**Bild 13**). Mit zunehmender Tiefe findet eine Verformungsumkehr statt. Ab circa 2 m unter GOK sind die Horizontalverformungen nach innen gerichtet und nehmen mit der Tiefe den theoretischen Vorstellungen entsprechend ab.

3.4.5 Analyse des zeitabhängigen Verformungsverhaltens

Der mittels FE-Analyse berechnete Zeit-Setzungsverlauf ist in **Bild 14** dargestellt und den tatsächlich im Vakuum-Betrieb eingetretenen Setzungen gegenübergestellt.

Das Ergebnis der FE-Berechnung weist eine sehr gute Übereinstimmung mit dem gemessenen Verlauf auf. Im frühen Zeitabschnitt bis circa 60 Tage wird die gegenüber dem späteren Verlauf erhöhte Konsolidationsrate nahezu exakt abgebildet. Die Abweichung zwischen FE-Berechnung und Messwerten beträgt nach 103 Tagen Vakuum-Betrieb lediglich 5% der gemessenen Gesamtsetzung.

Sensitivitätsanalysen mit Variation der Eingabeparameter im Bereich festgestellter Streubreiten der Laborversuche haben gezeigt, dass Abweichungen in dieser Größenordnung alleine mit Ungenauigkeiten des Kriechbeiwertes vom Torf beziehungsweise des Kompressionsbeiwertes vom Klei begründet werden können. Die Torfschicht befindet sich bereits nach 60 Tagen MVC-Betrieb in der Sekundärkonsolidation.

4 Fazit und Ausblick

Die am Fallbeispiel der B202 vorgestellten analytischen und numerischen Berechnungsverfahren ermöglichen eine zuverlässige Verformungsprognose und Bemessung der Ménard Vacuum Consolidation bei den sensitiven und hoch organischen Böden Klei und Torf.

Die im FE-Programm PLAXIS für Vertikaldrains anzusetzende Eigenschaft *vacuum* bildet nach Regulierung der Modelleinstellungen die isotrope Spannungserhöhung und den Konsolidationsprozess weitestgehend zutreffend ab. Aufgrund der genannten, von der Realität abweichenden Modell-Effekte werden weitere Vergleichsrechnungen zur abschließenden Validierung angestrebt.

Voraussetzung für eine qualitative Abbildung des zeitabhängigen Verformungsverhaltens ist in jedem Fall eine Auswertung der Laborversuche in Hinblick auf die hohe Kompressibilität und ausgeprägte Kriechneigung der norddeutschen Weichböden. Sensitivitätsstudien haben gezeigt, dass die bodenmechanischen Eingangsparameter größeren Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse haben als die Berechnungsmethodik oder Stoffmodelle an sich.

Für Langzeit-Setzungsprognosen bei Wiederbelastung erhalten weiterhin analytische Berechnungsmethoden den Vorzug, da die Verminderung der Kriechsetzungen bei Rekompensation durch die Entlastung bei Abschalten der Vakuum-Pumpen [5] derzeit nicht in den gängigen Stoffmodellen von FE-Programmen implementiert ist.

Literatur

[1] Brandt, V.; Kirstein, J.-F.; Nörenberg, G. et al.: Sieger Deutscher Ingenieurpreis Straße und Verkehr Kategorie Innovation: „Aus Moorboden wird tragfähiger Baugrund einer Bundesstraße mit Hilfe des Vakuum-Verfahrens“. In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.): Beiträge zur 33. Baugrundtagung, Berlin, 2014, S. 281-288.

[2] Cognon, J. M.: La consolidation atmosphérique. In: *Révue Française Géotechnique*, Vol. 57 (1991), pp. 37-47.

[3] Chai, J.-C.; Hayashi, S.; Carter, J. P.: Characteristics of vacuum consolidation. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, 2005, pp. 1167-1170.

[4] Tinat, Ch., Rosenberg, M.: Einfluss der Überkonsolidation auf das Sekundärsetzungsverhalten von Klei bei Wiederbelastung. In: *Geotechnik* 39 (2016), Heft 3, S. 175-183.

[5] Tinat, Ch., Kirstein J.-F., Rosenberg, M.: Positive influence of unloading after Ménard Vacuum Consolidation on long-term creep behavior of soft soils. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, 2017, pp. 525-528.

[6] Mesri, G.; Godlewski, P. M.: Time- and stress-compressibility interrelationship. In: *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 103 (1997), Iss. 5, pp. 417-430.

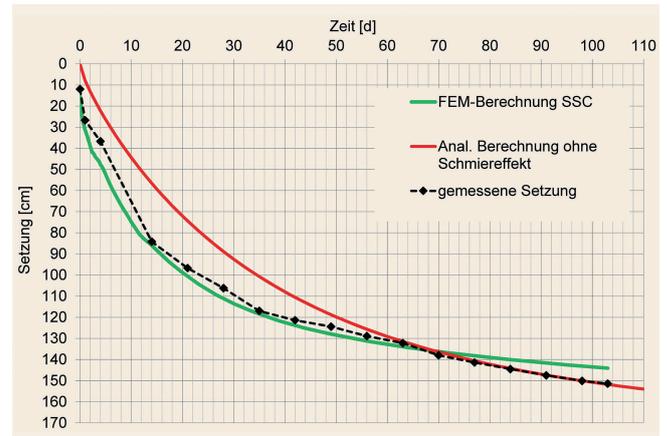


Bild 14. FE-Berechnungsergebnisse im Vergleich zu den Messwerten für den Modellquerschnitt Abb.: M.-B. Dießelberg, C. Tinat
 Fig. 14. FE calculation results compared to the measurements for the model section Source: M.-B. Dießelberg, C. Tinat

[7] Krieg, St.: *Viskoses Bodenverhalten von Mudden, Seeton und Klei*. Karlsruhe, Universität Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Dissertation, 2000.

[8] Chai, J.-C.; Carter, J. P.; Hayashi, S.: Ground Deformation Induced by Vacuum Consolidation. In: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131 (2005), Iss. 12, pp. 1552-1561.

[9] Barron, R. A.: Consolidation of fine-grained soils by drain wells. In: *Transactions of ASCE*, Vol. 113 (1948), pp. 718-742.

[10] Hansbo, S.: Consolidation of clay by bandshaped prefabricated drains. In: *Ground Engineering*, Vol. 12 (1979), Iss. 5, pp. 16-25.

[11] Qian, J. H.; Zhao, W. B.; Cheung, J. K. et al.: The theory and practice of vacuum preloading. In: *Computers and Geotechnics*, Vol. 13 (1992), Iss. 2, pp. 103-118.

[12] Witasse, R.; Racinais, J.; Maucotel F. et al.: Finite Element Modeling of Vacuum Consolidation using Drain Elements and Unsaturated Soil Conditions. In: *Proceedings of the International Symposium on Ground Improvement*, Brüssel, 2012.

[13] Chu, J.; Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, Ch.: Soft soil improvement through consolidation: An overview. In: *Proceedings of the International Conference on Ground Improvement and Ground Control*, Wollongong, 2012, pp. 251-280.



Christopher Tinat, M.Sc.

ctinat@menard.gmbh
 MENARD GmbH
 Hittfelder Kirchweg 2, 21220 Seevetal

Abb.: C. Tinat

Marc-Brian Dießelberg, M.Sc.

Technische Universität Braunschweig
 Institut für Geomechanik und Geotechnik
 Beethovenstraße 51b, 38106 Braunschweig

Dipl.-Ing. Johannes Kirstein

jkirstein@menard.gmbh
 MENARD GmbH
 Hittfelder Kirchweg 2, 21220 Seevetal

Dr.-Ing. Matthias Rosenberg

m.rosenberg@tu-braunschweig.de
 Technische Universität Braunschweig
 Institut für Geomechanik und Geotechnik
 Beethovenstraße 51b, 38106 Braunschweig