

Anwendung und Kalibrierung der Ménard Vacuum Consolidation (MVC®) bei sehr weichen und organischen Böden

Christopher TINAT & Jérôme RACINAIS
MENARD GmbH, Deutschland & MENARD, Frankreich

KURZFASSUNG

Die Ménard Vacuum Consolidation (MVC) ist eine effektive und umweltschonende Methode zur Vorbelastung kompressibler Böden mit hohen Wassergehalten. Durch das Erzeugen eines Unterdruckes wird eine isotrope Spannungserhöhung von bis zu 90 kN/m^2 als Vorbelastungsspannung erreicht. Langfristige Kriechverformungen im Rahmen der Sekundärkonsolidation werden durch die Entlastung nach dem MVC-Betrieb durch Abschalten der Pumpen reduziert. Dies ist auf das Ent- und Wiederbelastungsverhalten und den Einfluss des *Recompression Ratio* (RCR) zurückzuführen ist. Die Vakuum-Methode weist gegenüber der klassischen Auflastschüttung den Vorteil auf, dass durch die isotrope Spannungserhöhung infolge des erzeugten Porenwasserunterdrucks eine über die Tiefe konstante Vorbelastungsspannung erzeugt wird. Es werden keine Scherspannungen und damit Mitnahmesetzungen hervorgerufen, wie es bei konventionellen Vorbelastungen mittels Schüttkörper der Fall ist.

Eine bedeutende Aufgabe in der Planungsphase liegt darin das sich im Rahmen des MVC-Betriebes einstellende Zeit-Setzungsverhalten und die Restsetzungen nach der Vorbelastungsphase abzuschätzen. Die vorliegende Untersuchung befasst sich damit, das MVC-Verfahren exemplarisch an einem Fallbeispiel mit analytischen Methoden unter Verwendung geeigneter Modellansätze und -parameter abzubilden, um deren Eignung für Verformungsberechnungen und -prognosen zukünftiger Projekte zu validieren. Die für das Fallbeispiel relevanten Bodenparameter der norddeutschen Weichböden Torf und Klei wurden in umfangreichen Laborversuchen unter Berücksichtigung der spezifischen Besonderheiten organischer, kriechfähiger Böden ermittelt.

Die mit dem MVC-Verfahren induzierte Reduktion des hydrostatischen Porenwasserdruckes folgt den gleichen Gesetzmäßigkeiten wie ein Abbau des Porenwasserüberdruckes bei der klassischen Konsolidation. Mit einem abgestimmten Laborprogramm und nach einer Kalibrierung der im Labor ermittelten Bodenparameter an die Feldbedingungen kann der Konsolidationsverlauf auf Basis der eindimensionalen Konsolidationstheorie nach TERZAGHI sowie unter zusätzlicher Berücksichtigung der radialen Entwässerung in die Vertikaldrains berechnet werden.

Der Beitrag widmet sich dem Leitthema der ÖGT 2022 und zeigt die Bedeutung einer adäquaten Bestimmung von Bodenparametern, um die natürlichen Unwägbarkeiten von organischen Böden im Zuge von Vorbelastungsmaßnahmen zu minimieren und zu beherrschen.

1. EINLEITUNG

Bei Böden mit hohen Setzungsbeträgen werden häufig Bauverfahren angewendet, mit denen die Setzungen beschleunigt vorweggenommen werden. Diese Vorbelastungsmaßnahmen werden in klassischer Ausführung durch großvolumige Sand- oder Kiesschüttungen herbeigeführt. Insbesondere bei schwach durchlässigen Böden sind lange Liegezeiten erforderlich, die mit konsolidationsbeschleunigenden Maßnahmen wie Vertikaldrains, z.B. vorgefertigte Streifendrainen (PVD), verkürzt werden.

Bei der Ménard Vacuum Consolidation (MVC) wird die Vorbelastung des Bodens durch Wirkung des atmosphärischen Luftdrucks ohne sichtbaren Belastungskörper erzeugt. Durch den Einsatz von speziellen Runddrains und das temporäre Erzeugen eines Unterdruckes wird der Vorbelastungsprozess des Bodens beschleunigt. Die sonst aufzubringende Sand- oder Kiesschüttung sowie alle damit verbundenen Bodentransporte bleiben erspart. Dies trägt zu der positiven Ökobilanz des MVC-Verfahrens bei.

Ein Anwendungsgebiet des MVC-Verfahrens stellen u. A. organogene Böden in flüssiger bis weicher Konsistenz wie Klei, Schlick, Mudde und Seeton bis hin zu Torfen dar. Diese Böden sind eine besondere Herausforderung für die Baupraxis. Der Grund ist eine vergleichsweise große Streubreite der Bodenparameter, die hohe Kompressibilität und insbesondere das ausgeprägte Langzeit-Verformungsverhalten nach dem Abschluss der Primärkonsolidation. Diese viskosen Verformungen werden als Sekundärsetzungen oder auch als Kriechsetzungen bezeichnet und erfordern besondere Berücksichtigung bei Verformungsanalysen.

Eine bedeutende Aufgabe der Planung liegt darin, das sich im Rahmen des MVC-Betriebes einstellende Zeit-Verformungsverhalten des zu konsolidierenden Bodens abzuschätzen. Neben bauverfahrenstechnischen Überlegungen 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 der organischen Böden während und nach der Vorbelastungsphase ist daher von besonderem Interesse.

2. MÉNARD VACUUM CONSOLIDATION (MVC®)

2.1. 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. Diese werden erforderlich, wenn die Vorbelastung direkt neben Bestandsbauwerken ausgeführt wird oder um durchlässige Zwischenschichten bis in größere Tiefen zu unterbrechen. Das innerhalb dieser Umschließung installierte System aus speziellen Vertikal- und Horizontal drainagen fördert Luft und das infolge der Konsolidation ausgepresste Porenwasser mittels Pumpen aus dem Boden. Ein Prinzipschnitt mit den wesentlichen Verfahrens-Komponenten ist in Abb. 1 schematisch dargestellt.

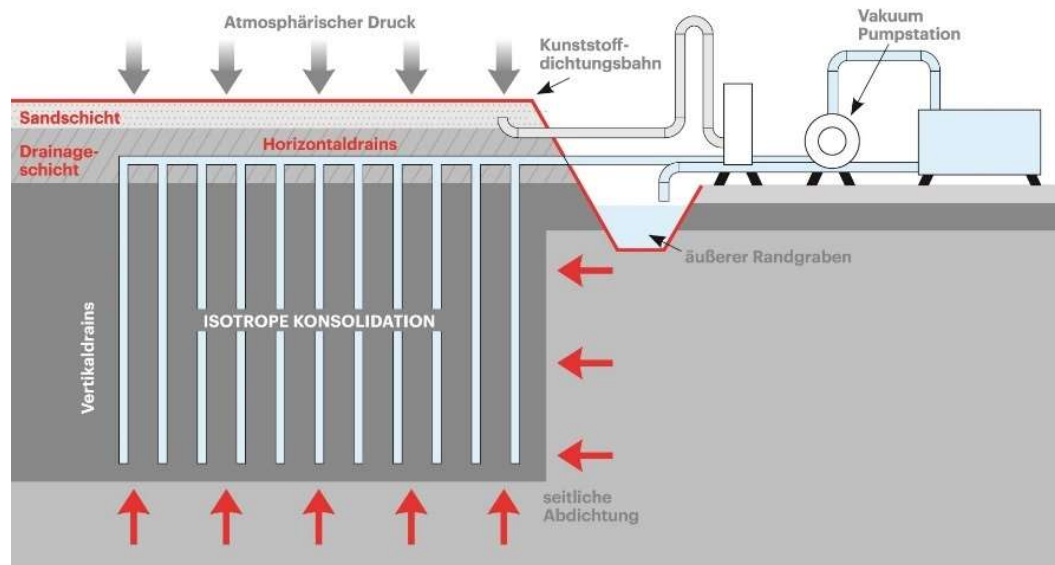


Abb. 1: Prinzipschnitt der Ménard Vacuum Consolidation (MVC®)

2.2. Wirkungsweise nach Effektivspannungskonzept

Der atmosphärische Luftdruck wird bei geotechnischen Berechnungen in der Regel vernachlässigt. Diese Vereinfachung beeinflusst die Berechnungsergebnisse nicht, da der Luftdruck keine variierende Größe bei üblichen geotechnischen Überlegungen darstellt. Im Fall des MVC-Verfahrens ist die Berücksichtigung elementar.

Der Luftdruck ist als diejenige Spannung definiert, welche die Atmosphäre unter dem Einfluss der Schwerkraft auf die Erdoberfläche ausübt. Er wirkt in allen Richtungen gleich, d.h. isotrop.

Die Primärspannungen können im Ausgangszustand eines Bodenelementes um den atmosphärischen Luftdruck p_a ergänzt werden [Cognon, 1991]. Der Index T macht die Einbeziehung des Luftdruckes kenntlich:

$$\sigma_T = \sigma + p_a \quad (\text{Gl. 1})$$

$$u_T = u + p_a \quad (\text{Gl. 2})$$

$$\sigma'_T = \sigma_T - u_T = \sigma + p_a - (u + p_a) = \sigma - u = \sigma' \quad (\text{Gl. 3})$$

Bei Anwendung des MVC-Verfahrens bleiben die totalen Spannungen unverändert, da keine äußeren Lasten aufgebracht werden. Die neutralen Spannungen des Porenwassers werden hingegen durch den Unterdruck im System im theoretischen Idealfall um den Betrag des atmosphärischen Luftdruckes abgemindert. Diese verringern sich in einem vollständigen Vakuum auf $p_a = 0$.

Im Gleichgewichtszustand, d.h. bei vollständiger Umlagerung der Spannungen auf das Korngerüst, werden die effektiven Spannungen nach den Modellvorstellungen von TERZAGHI um den Betrag des atmosphärischen Luftdruckes nach Gl. 4 erhöht.

$$\sigma'_{MVC} = \sigma_T - u_T = \sigma + p_a - (u + 0) = \sigma' + p_a \quad (\text{Gl. 4})$$

In Abb. 2 ist die Spannungsverteilung über die Tiefe für den Primärspannungszustand (schwarze Linie) und für den Gleichgewichtszustand der Vakuum-Konsolidation (rote Linie) dargestellt. Da der Luftdruck isotrop wirkt, ist auch die durch den Unterdruck hervorgerufene Spannungserhöhung in allen Richtungen gleich groß.

Unter Baustellenbedingungen wird ein Differenzdruck zwischen dem abgedichteten Bodenkörper und der Atmosphäre von durchschnittlich 0,7 bis 0,9 bar, also $\Delta\sigma'_{MVC} = 70$ bis 90 kN/m^2 erreicht. Dies entspricht einer flächigen Kies-Schüttung von rd. 4 bis 5 m Höhe, welche allein durch den erzeugten Unterdruck vollständig ersetzt wird und zusätzlich isotrop und über die Draintiefe konstant wirkt. Es findet keine Spannungsabnahme über die Tiefe statt. Eine zusätzliche Spannungserhöhung ist durch eine Kombination des MVC-Verfahrens mit der klassischen Oberflächenschüttung möglich.

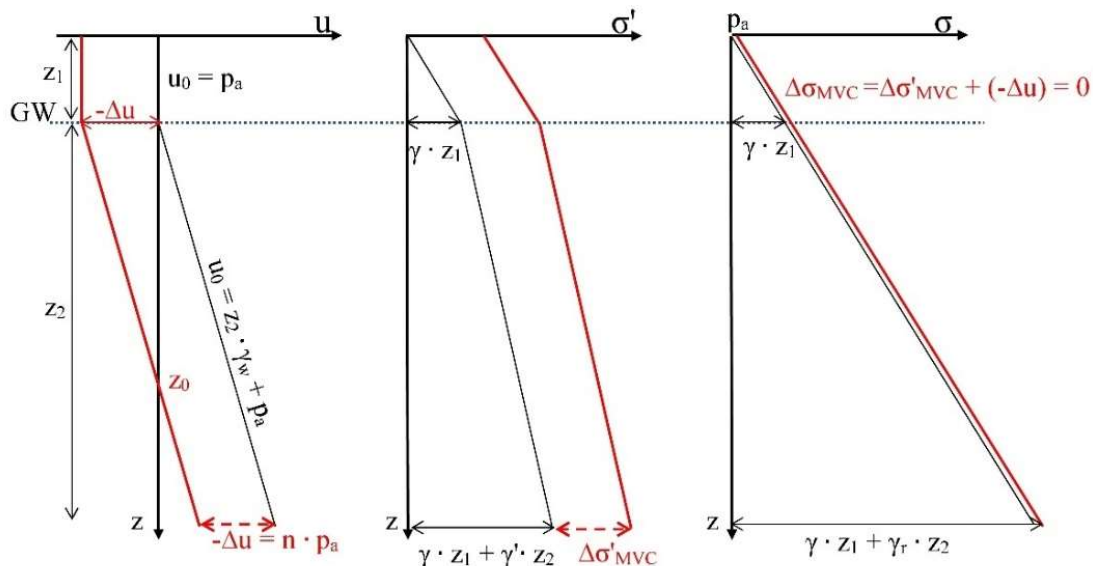


Abb. 2: Primärspannungszustand (schwarze Linien) und Spannungen im Gleichgewichtszustand der Vakuum-Konsolidation (rote Linien)

2.3. Beschreibung der zeitabhängigen Konsolidation

Die Reduktion des Porenwasserdruckes im Bodengefüge erfolgt auch bei der Vakuum-Konsolidation zeitverzögert. In den Sickerkernen der Drains wird unmittelbar nach dem Anschalten der Pumpen eine Reduktion des hydrostatischen Wasserdruckes erzeugt. In der Nähe der Drains wird der Porenwasserdruck aufgrund des kürzeren Entwässerungsweges weitaus schneller abgemindert als in größerer Entfernung. Die Konsolidation schreitet von den Vertikaldrains ausgehend ins Innere des zwischen den Drains befindlichen Bodens fort. Somit entsteht zwischen den Drains und umgebenden Boden eine Druckdifferenz im Porenwasser, welche im Zuge des Konsolidationsprozesses ausgeglichen wird. Die nach Konsolidationstheorie parabelförmige Porenwasserdruckverteilung zwischen zwei Vertikaldrains bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes ist gemäß Abb. 3 bei der Vakuum-Konsolidation identisch der Oberflächenbelastung – aber entgegengesetzt gerichtet.

Bei einer Auflastschüttung (Abb. 3a) wird der Porenwasserdruck gegenüber dem Primärspannungszustand zunächst erhöht (Porenwasserüberdruck) und nimmt dann im Zuge der Konsolidation bis auf die Ausgangswerte des hydrostatischen Druckes wieder ab. Bei der Vakuum-Konsolidation (Abb. 3b) wird hingegen der hydrostatische Porenwasserdruck des Ausgangszustandes direkt abgemindert, ohne dass zuvor ein Überdruck aufgebaut wird. In beiden Fällen erfolgt die Erhöhung der effektiven Spannungen auf das Korngerüst parallel und im gleichen Betrag zur Porenwasserdruckreduktion.

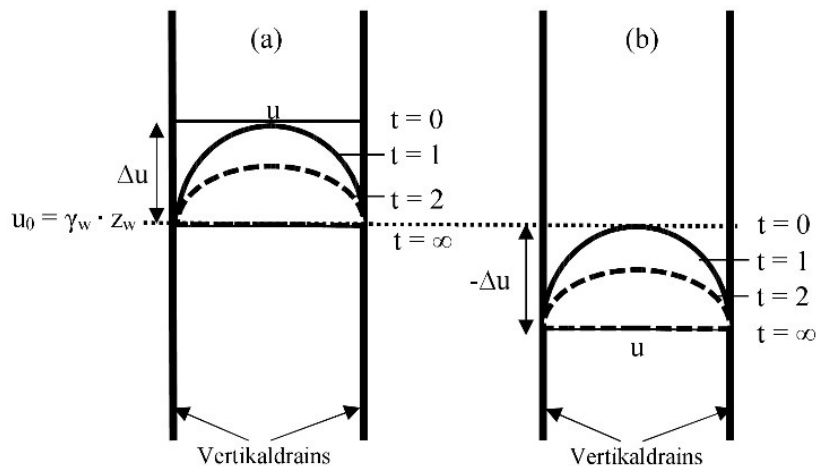


Abb. 3: Konsolidation zwischen Vertikaldrains: (a) Abbau des Porenwasserüberdruckes bei einer Oberflächenbelastung (Auflastschüttung); (b) Reduktion des hydrostatischen Porenwasserdruckes bei der Vakuum-Konsolidation

2.4. Spannungs-Verformungsverhalten im Vergleich zur klassischen Auflast

Bei einer Oberflächenbelastung werden Scherspannungen im Untergrund mobilisiert, wodurch sich die Vertikalspannungen auch seitlich ausbreiten (Lastabstrahlung). Durch die Spannungsausbreitung nimmt die Erhöhung der vertikalen Spannungen entsprechend den Modellvorstellungen von BOUSSINESQ mit zunehmender Tiefe ab. Eine konstante Spannungserhöhung über die gesamte Mächtigkeit einer Bodenschicht wäre lediglich bei weit ausgedehnten Flächenlasten (unter ödometrischen Bedingungen) gegeben.

Insbesondere bei schmalen, langgestreckten Bauwerken wie Straßen- oder Eisenbahndämmen ist aufgrund von örtlichen Zwängen die seitliche, über die Bauwerksgrenze hinausgehende Ausdehnung der Auflastschüttung häufig nicht größer als die Schichtdicke der zu konsolidierenden Bodenschicht. In diesen Fällen ist bei einer konventionellen Auflastschüttung die aufgebrachte Last nur direkt unter der Geländeoberkante und mittig des Schüttkörpers voll wirksam, siehe Abb. 4 (links).

Aufgrund der isotropen Spannungserhöhung ruft die Ménard Vacuum Consolidation im Gegensatz zur Auflastschüttung Verformungen der vertikalen Grenzfläche nach innen hervor. Die Zunahme der effektiven Spannungen ist bei der Vakuum-Konsolidation über die Tiefe konstant, da keine Spannungsausbreitung im Untergrund stattfindet, siehe Abb. 4 (rechts). Durch eine gezielte Kombination aus Auflastschüttung und Vakuum-Konsolidation wurde so in einigen praktischen Anwendungen eine vollständige gegenseitige Aufhebung der Randverformungen erreicht.

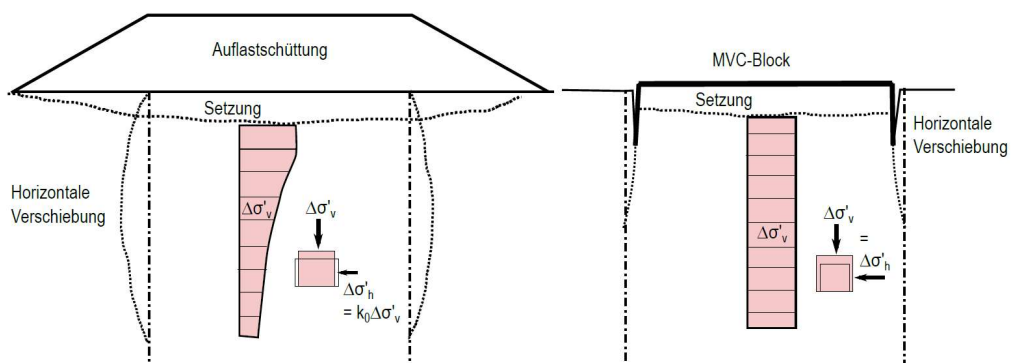


Abb. 4: Untergrundverformungen und Spannungsverlauf bei der Auflastschüttung (links) und bei der Vakuum-Konsolidation (rechts)

3. ANWENDUNG DES MVC-VERFAHRENS BEI ORGANISCHEN BÖDEN AM PROJEKTBEISPIEL EINER BUNDESSTRASSE

3.1. Projektbeschreibung der B202 Norddeutschland

Die B202 stellt eine infrastrukturell bedeutende Verbindung in Norddeutschland zwischen der Nord- und Ostseeküste Schleswig-Holsteins dar. Ihr infrastrukturell wichtiger Streckenabschnitt zwischen Erfde und Norderstapel war vor der Sanierung bekannt für den desaströsen Zustand mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf 40 km/h. Ursache für die erheblichen Straßenschäden 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. Die im Rahmen der Sanierung errichtete Neutrasse wurde im Jahr 2012 mit dem MVC-Verfahren 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 Neubautrasse direkt neben der zur Hälfte verbliebenden Bestandsstraße erfolgte und der Verkehr dauerhaft aufrechterhalten wurde, siehe Abb. 5 [BRANDT et al., 2014].



Abb. 5: Vakuum-Block kurz nach Inbetriebnahme (links) und nach ca. 10 Tagen MVC-betrieb bei 60 cm Setzungen (rechts)

Während des MVC-Betriebes wurden die vertikalen Verformungen (Setzungspegel), die horizontalen Verformungen (Vertikalinklinometer) und die Unterdruckwerte im System mittels Piezometer aufgezeichnet. Der Unterdruck war innerhalb von 10 Tagen vollständig aufgebaut und betrug bis zum Betriebsende (103 Tage) 0,7 bar, d.h. $\Delta u = 70 \text{ kN/m}^2$.

3.2. Ergebnisse der Laborversuche

Das im Zuge wissenschaftlicher Nachuntersuchungen durchgeführte Laborprogramm wurde 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. Die Ergebnisse der Kompressionsversuche sind auch in Tinat und Rosenberg (2016) und Tinat et al. (2017) zusammengefasst.

3.2.1. Verformungsverhalten der organischen Böden bei Erstbelastung

Ein Großteil der Kompressionsversuche wurde als Langzeitversuche in mechanischen Ödometerständen mit inkrementeller Laststeigerung bzw. -minderung ausgeführt. Die einzelnen Laststufen wurden teilweise mehrere Tage bis mehrere Wochen aufrechterhalten. Die Ausgangsprobenhöhe betrug bei allen Kompressionsversuchen lediglich 14 mm bei einem Probenverhältnis von 1:5, um einen möglichst schnellen Abschluss der Primärkonsolidation, d.h. 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 (EOP), hier als Porenzahländerung (Δe_p) berücksichtigt (siehe Abb. 6 (links)). Der Zeitpunkt am EOP wird als t_p bezeichnet. Bereits während einer Belastungszeit von 24 h im Standard-Ödometerversuch sind nennenswerte Kriechsetzungen und damit eine weitere Porenzahlverringerng (Δe_v) eingetreten. Diese Verformungen führen zu seiner Zunahme der äquivalenten Spannungen σ'_e , die bereits nach 24h um den Faktor 1,3 größer sind als die tatsächlich wirkenden Totalspannungen. Die Kriechverformungen sind differenziert von der Primärkonsolidation auszuwerten.

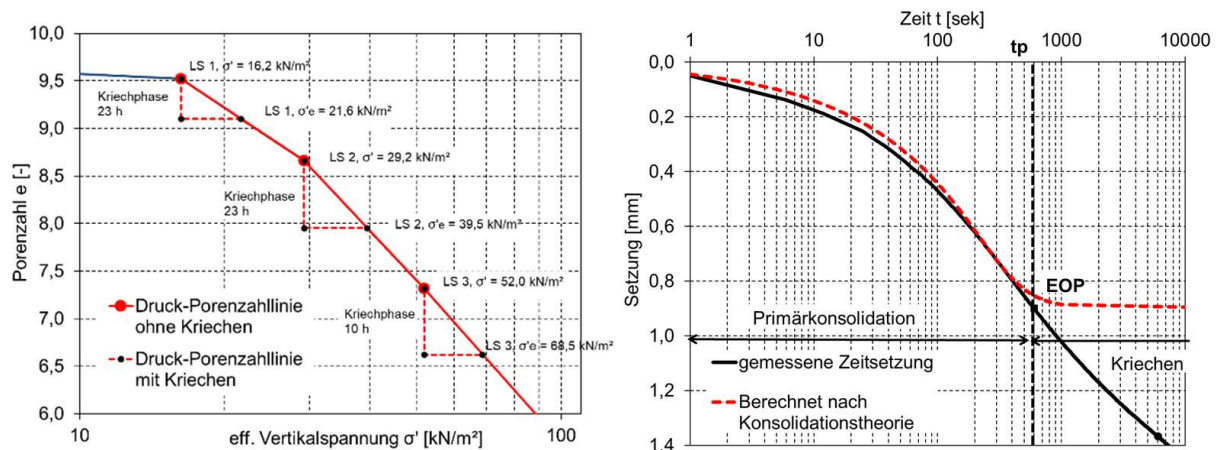


Abb. 6: Exemplarische Auswertung eines Ödometerversuches am Torf: Halb-logarithmisches Spannungs-Porenzahl-Diagramm (links) und halb-logarithmisches Zeit-Setzungs-Diagramm der Laststufe 3 mit $\sigma' = 52 \text{ kN/m}^2$ (rechts)

Im Zuge der Versuchsreihe wurde ein weitestgehend konstanter, also spannungsunabhängiger Kompressionsbeiwert C_c ($= \Delta e_p / \Delta \log t$) in den relevanten Spannungsbereichen festgestellt. Die halb-logarithmische Spannungs-Porenzahl-Linie verläuft entsprechend geradlinig.

Insbesondere bei Erstbelastung wurde sowohl für den Torf als auch für den Klei ein ausgeprägtes Kriechverhalten im Zuge der Sekundärkonsolidation beobachtet, siehe Abb. 6 (rechts). Der Sekundärsetzungsbeiwert nach Gl. 5 wurde erwartungsgemäß als weitestgehend spannungsunabhängig identifiziert und ist auch über die Dauer einer Kriechphase bei Erstbelastungsbedingungen nahezu konstant.

$$C_\alpha = \Delta e_v / \Delta \log t \quad (\text{Gl. 5})$$

Der Verlauf des Kriechastes ist bei halb-logarithmischer Darstellung des Zeit-Setzungsdiagramms insbesondere beim Torf so stark geneigt, dass eine Unterscheidung zwischen Primär- und Sekundärkonsolidation mit dem sonst üblichen Verfahren von CASAGRANDE nur eingeschränkt möglich ist. Aus diesem Grund wird für organische Böden das Verfahren nach TAYLOR im Wurzel-Zeit-Maßstab empfohlen.

3.2.2. Verformungsverhalten der organischen Böden nach Entlastung bei Wiederbelastung

Bei der Rekompensation wurde eine erhebliche Verminderung der Kompressibilität und der Kriechneigung nachgewiesen, welche im direkten Zusammenhang mit der Vor-, Ent-, und anschließenden Wiederbelastung steht. Das Modell von MESRI & GODLEWSKI (1997), welches einen konstanten Quotienten aus Kompressionsbeiwert und Sekundärsetzungsbeiwert $C_{\alpha}/C_c = \text{const.}$ beschreibt, konnte in der für organische Böden üblichen Bandbreite von $C_{\alpha}/C_c = 0,05 \pm 0,01$ sowohl bei Erst- als auch Wiederbelastungsbedingungen mit $C_{\alpha}/C_c = C_{ar}/C_{cr} = \text{const.}$ bestätigt werden, siehe Abb. 7.

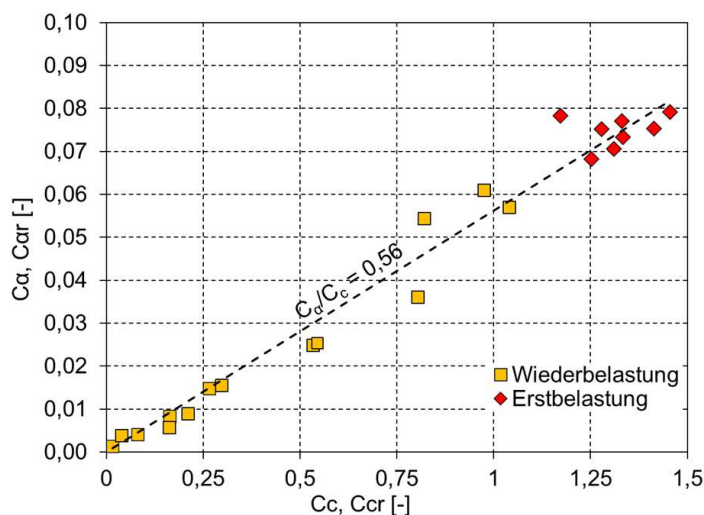


Abb. 7: C_{α}/C_c und C_{ar}/C_{cr} bei Erst- und Wiederbelastung des Kleis

Bei Wiederbelastung besteht eine Korrelation zu dem semi-empirisch hergeleiteten *Recompression Ratio* (RCR) gemäß Gl. 6. Der RCR ist definiert als Quotient aus der Spannungsdifferenz der Wiederbelastung und der Spannungsdifferenz der Entlastung [Tinat und Rosenberg, 2016].

$$C_{cr}/C_c = C_{ar}/C_{\alpha} = \beta \cdot \text{RCR} \quad \text{für } \text{RCR} < 1 \quad (\text{Gl. 6})$$

Mit dieser Beziehung ist eine Abschätzung der Rekompensationsparameter aus den Erstbelastungskennwerten und der Spannungsgeschichte möglich. Der Faktor β ist eine bodencharakteristische Größe und hängt vom Schwellbeiwert des Bodens ab. Je größer die Schwellneigung, desto größer ist der Wert von β .

Weiterhin wurde ein Einfluss der Konsolidationsbedingungen der Erstbelastung auf den Faktor β identifiziert. Für den Klei wurde ein Wertebereich von $\beta = 0,14$ bis $0,3$ in Abhängigkeit des Konsolidationsgrades zum Zeitpunkt der Entlastung ermittelt [TINAT et al., 2017]. Das bedeutet, bei einem $\text{RCR} = 1$, also beim Erreichen der effektiven Vorbelastungsspannung, betrugen die Rekompensationsparameter in Abhängigkeit der Konsolidationsbedingungen lediglich 14 bis 30 % der Erstbelastungskennwerte C_c und C_{α} . Nach Überschreiten der Vorbelastungsspannung steigen beide Parameter schlagartig auf 100 % an, also entsprechen den Kennwerten eines normalkonsolidierten Bodens.

Innerhalb der Rekompensationsphase ist der Sekundärsetzungsbeiwert im Gegensatz zu dem der Erstbelastung spannungs- und zeitabhängig. Eine zweckdienliche Bezeichnung für den Kriechparameter bei Wiederbelastung stellt C_{ar} dar. Die Kriechrate verläuft nicht proportional zum Logarithmus der Zeit und nimmt in halblogarithmischer Darstellung kontinuierlich zu. Diese Eigenschaft ist gemäß Abb. 8 auf das Prinzip der äquivalenten Spannung unter Berücksichtigung

der üblicherweise gekrümmten Wiederbelastungskurve im Druck-Porenzahlendiagramm zurückzuführen.

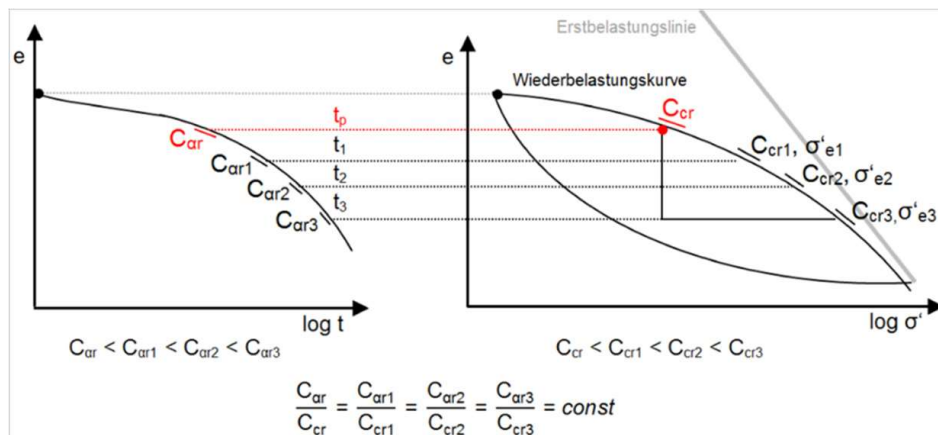


Abb. 8: Zusammenhang zwischen der Zeitabhängigkeit von C_{ar} und der Spannungsabhängigkeit von C_{cr} [TINAT & ROSENBERG, 2016]

Im Gegensatz zu den üblichen Annahmen für einen normalkonsolidierten Boden verlaufen die Isochronen der Druck-Porenzahllinie bei Wiederbelastung weder geradlinig noch parallel zueinander. Diese in der Praxis häufig vernachlässigte Eigenschaft ist auf die Spannungs- und Zeitabhängigkeit von C_{ar} zurückzuführen und wird in Abb. 9 am Beispiel der Ödometerversuche am Klei erkennbar. C_{ar} stellt den vertikalen Versatz zwischen den einzelnen Isochronen dar. Im Rahmen mehrerer Ödometerversuche konnte für den Klei ein zeitlicher Vergrößerungsfaktor von ca. 2,5 für den Zeitraum bis $1000t_p$ ermittelt werden.

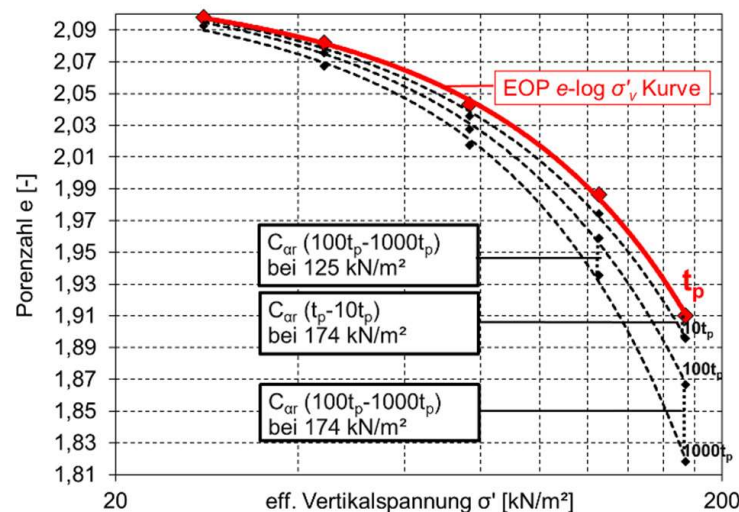


Abb. 9: Isochronen der Druck-Porenzahllinie bei Wiederbelastung eines Ödometerversuches am Klei [TINAT & ROSENBERG, 2016]

3.2.3. Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche

Die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit erfolgte in Triaxialzellen. Der zylindrische Probekörper wurde von einer flexiblen Gummihülle umschlossen, die einem konstanten, isotrop wirkenden Zelldruck ausgesetzt wird. Der Probekörper wurde von unten nach oben mit Wasser durchströmt. Dabei wurde die ein- und ausströmende Wassermenge gemessen. Bezogen auf die Ausgangsprobenhöhe von 12 cm wurde ein hydraulisches Gefälle von $i = 30$ angelegt. Dies entspricht einer wirkenden Wassersäule von 3,60 m Höhe. Zur Bestimmung des vertikalen (k_v) und

horizontalen Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes (k_h) wurden die Bodenproben entsprechend der Entnahmerichtung im Feld in das Versuchsgerät eingebaut.

Für den Torf wurden Werte im Bereich von $k_v = 1,2 \cdot 10^{-8}$ bis $3,4 \cdot 10^{-9}$ m/s, im Mittel von $k_{v,mit} = 5,8 \cdot 10^{-9}$ m/s gemessen. Die des Kleis variieren von $k_v = 3,0 \cdot 10^{-9}$ bis $7,7 \cdot 10^{-10}$ m/s und betragen im Mittel $k_{v,mit} = 1,6 \cdot 10^{-9}$ m/s.

Anders als erwartet und entgegen den üblichen Annahmen für sedimentierte Böden, ist die Wasserdurchlässigkeit der horizontal entnommenen Bodenproben sowohl für den Torf als auch für den Klei kleiner als die in vertikaler Richtung entnommenen Proben. Aus den gemittelten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerten ergeben sich für den Torf konstante Verhältnisswerte von $k_h/k_v = 0,52$ nach 7 Tagen und für den Klei von $k_h/k_v = 0,9$ nach 14 Tagen Durchströmungszeit.

3.3. Verformungsberechnung der Vakuum-Konsolidierung

Für die in diesem Beitrag vorgestellte Verformungsanalyse wird exemplarisch der Bau-km 1+170 des in Abschnitt 3.1 vorgestellten Projekts B202 als Modellquerschnitt zugrunde gelegt. Während des MVC-Betriebes wurden die vertikalen Verformungen (Setzungspegel), die horizontalen Verformungen (Vertikalinklinometer) und die Unterdruckwerte im System mittels Piezometer aufgezeichnet. Der Unterdruck war innerhalb von 10 Tagen vollständig aufgebaut und betrug bis zum Betriebsende (103 Tage) 0,7 bar, d.h. $\Delta u = 70 \text{ kN/m}^2$. Das Baugrundmodell für den Zustand vor der Kompression ist in Abb. 10 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 ca. 1,5 m unter GOK.

Die nachfolgende Verformungsanalyse erfolgte auf Basis der im Labor für den Torf und Klei ermittelten Bodenkennwerte (siehe Abschnitt 3.2) und werden in Tab. 1 zusammengefasst.

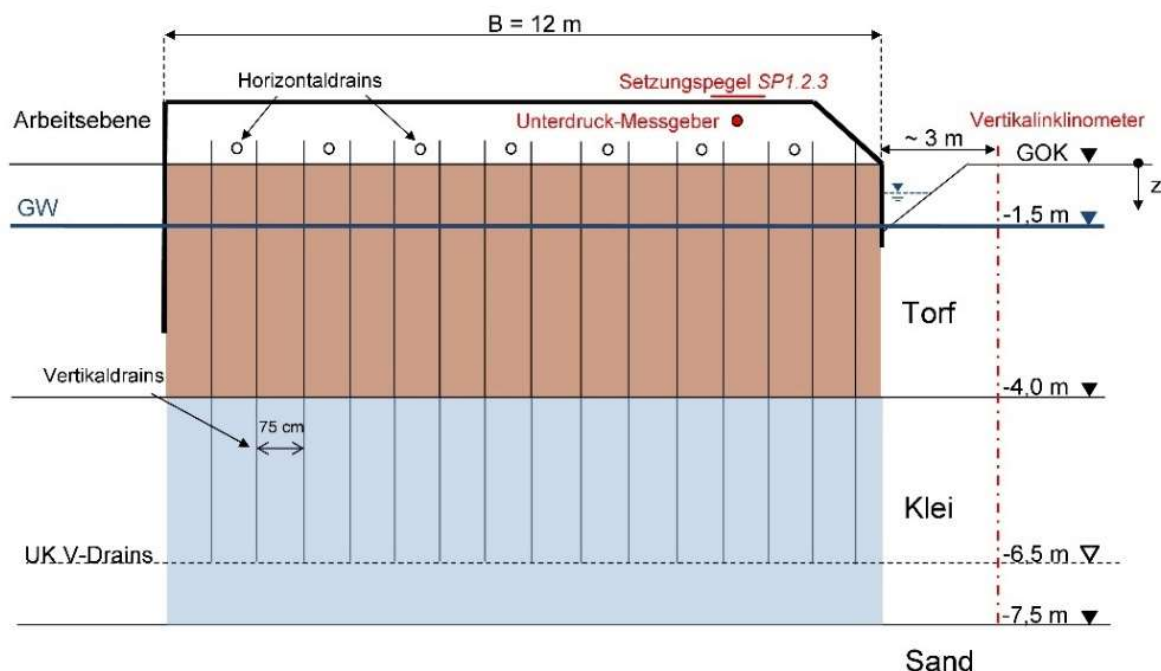


Abb. 10: MVC-Modellquerschnitt Bau-km 1+170 mit Darstellung der Messtechnik

Tab. 1: Zusammenfassung der im Labor ermittelten Bodenkennwerte

	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	$1,10 \cdot 10^{-7}$
Klei	3,6	140	12	13	0,90	0,076	1,35	0,056	$1,07 \cdot 10^{-8}$

mit: e_0 = Anfangsporenzahl, w = Wassergehalt, v_{gl} = Organikanteil, γ = Wichte, k_h = hor. Durchlässigkeit, k_v = vert. Durchlässigkeit, C_α = Sekundärsetzungsbeiwert, C_c = Kompressionsbeiwert, c_v = Konsolidierungsbeiwert

Der Konsolidationsprozesses im MVC-Betrieb wurde mit den Ansätzen von BARRON (1948) unter Berücksichtigung des Schmiereffektes nach HANSBO (1979) berechnet. Diese erweitern die eindimensionale Konsolidationstheorie nach TERZAGHI um den radialen Wasserzufluss in die vertikalen Drainkörper. Folglich wurde auf allgemeingültige und klassische Konsolidationsmodelle für die Berechnungen zurückgegriffen. Die Schmiereffekt-Theorie beschreibt zudem den Einfluss der durch die Draininstallation (Einstechen der Streifendrains) gestörten und dadurch weniger durchlässigen Zone im umgebenden Boden. Dieser Effekt ist je nach Herstellung und Bodenart unterschiedlich stark ausgeprägt.

Die berechneten Zeit-Setzungsverläufe sind in Abb. 11 dargestellt und dem im Vakuum-Betrieb gemessenen Zeit-Setzungsverlauf gegenübergestellt.

Der Zeit-Setzungsverlauf, welcher unter Einbeziehung des Schmiereffektes ermittelt wurde (blaue Linie), unterschätzt die eingetretene Konsolidationsrate. Es wird vermutet, dass der Schmiereffekt bei stark organischen, faserigen Torfböden nicht so stark ausgeprägt wie bei den mineralischen Tonböden.

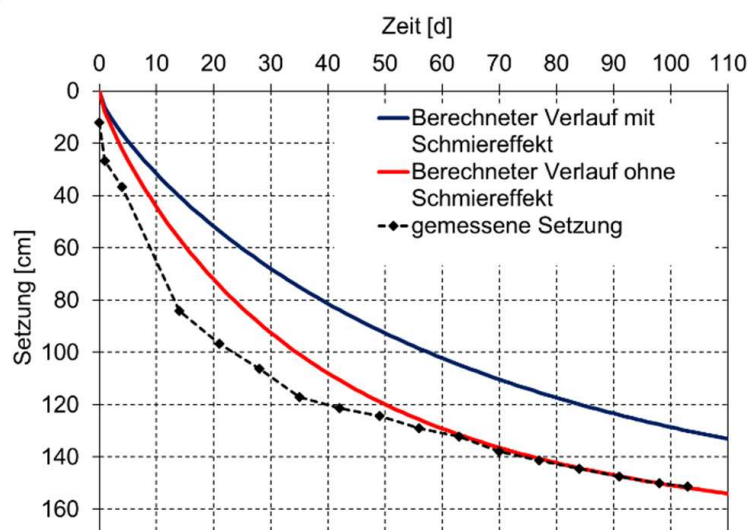


Abb. 11: Vergleich der Berechnungsergebnisse basierend auf klassischen Konsolidationsmodellen mit den Messergebnissen

Die ohne Schmiereffekt berechnete Zeit-Setzungskurve (rote Kurve) weist eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten ab 50 Tagen Konsolidationszeit auf. Im frühen Zeitabschnitt bis 50 Tage ist der anhand der Setzungen gemessene Konsolidationsverlauf gegenüber der analytischen Lösung beschleunigt. Diese beim MVC-Verfahren typische Beobachtung wird auch von QIAN et al. (1992) 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 QIAN et al. (1992) 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.

3.3.1. Parameterstudie zur Wasserdurchlässigkeit

In den Laborversuchen wurde eine starke Streuung der Durchlässigkeitsbeiwerte festgestellt. Dies ist auf die Inhomogenität der organischen Böden und der Probenkompression während des Versuchs zurückzuführen. In Abb. 12 sind die unter Berücksichtigung verschiedener Eingangsparameter ermittelten Konsolidationsverläufe für die 4m mächtige Torfschicht (links) und die 3,5m mächtige Kleischicht (rechts) des untersuchten Baugrundprofils dargestellt.

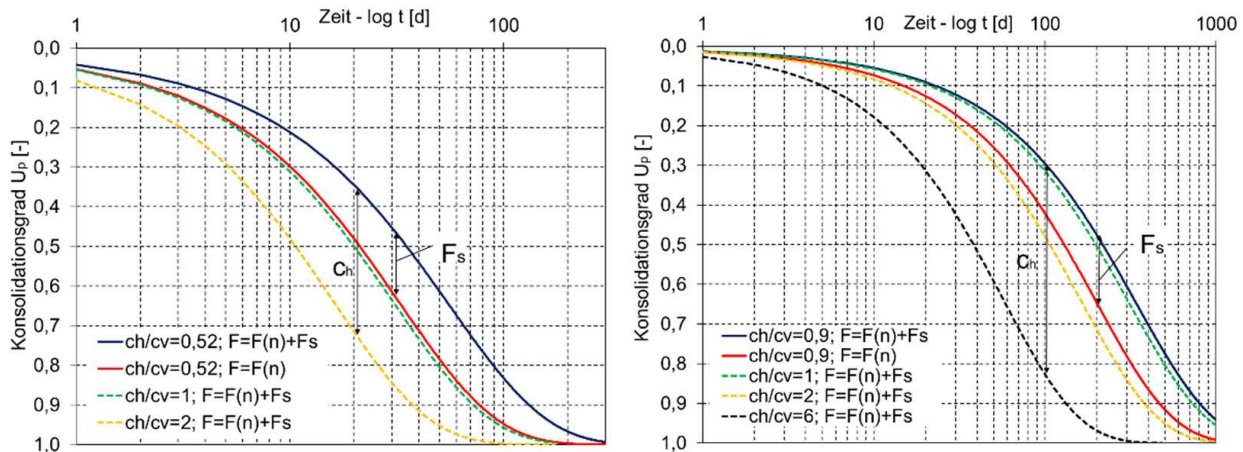


Abb. 12: Parametervariation des Durchlässigkeitskoeffizienten $k_h/k_v = c_h/c_v$ für den Torf (links) und für den Klei (rechts)

Der rote und der blaue Verlauf stellen die Konsolidationskurven auf Basis der gemittelten Durchlässigkeiten und Durchlässigkeitskoeffizienten k_h/k_v gemäß Tab. 1 dar. Beide Kurven unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der Berücksichtigung des Schmiereffekt-Faktors F_s . Die durch den Schmiereffekt hervorgerufene Verzögerung des Konsolidationsprozesses ist in der frühen Konsolidationsphase vergleichsweise gering, wächst jedoch mit fortschreitender Konsolidationszeit.

Anhand des grünen und des gelben Verlaufes werden der Einfluss des horizontalen Konsolidierungsbeiwertes und damit die Bedeutung des Quotienten $k_h/k_v = c_h/c_v$ aufgezeigt. In den Laboruntersuchungen wurde festgestellt, dass die horizontale Wasserdurchlässigkeit des Torfes nur bis auf den Faktor 2,5 und die des Kleis bis auf den Faktor 6 genau ermittelt werden kann. Die gelbe Linie stellt den Konsolidationsverlauf dar, welcher auf den bei Drainagebemessungen in der Praxis häufig getroffenen Annahme $k_h/k_v = c_h/c_v = 2$ beruht. Unter dieser Berechnungsannahme läuft die Konsolidation gegenüber den Ergebnissen unter Ansatz der Laborkennwerte erheblich beschleunigt ab.

Die Parameterstudie verdeutlicht, dass die rechnerische Ermittlung des Konsolidationsverlaufes erheblich vom Quotienten $k_h/k_v = c_h/c_v$ abhängt. Bereits die versuchstechnisch bedingte Streuung der bodenhydraulischen Kennwerte von organischen Böden ruft eine erhebliche Bandbreite von möglichen Konsolidationsverläufen hervor. Je geringer die Durchlässigkeit bzw. der Konsolidierungsbeiwert eines Bodens, desto größer sind die absoluten Auswirkungen der Eingangsparameter auf die Ermittlung der Konsolidationszeit.

Die ermittelte Varianz verdeutlicht die Schwierigkeit, die Konsolidationszeit von organischen, schwach durchlässigen Böden zutreffend abzuschätzen. Grund hierfür ist der maßgebende Einfluss

des Quotienten c_h/c_v , welcher wiederum aufgrund der Heterogenität der organischen Böden nur vergleichsweise ungenau an Bodenproben in Laborversuchen bestimmt werden kann.

3.3.2. Kalibrierung während der MVC-Betriebsphase

Aufgrund der Unwägbarkeit der im Labor ermittelten Durchlässigkeitsparameter und Unsicherheiten zur Wirksamkeit des Schmiereffekts sind Konsolidationsprognosen von Vorbelastungsmaßnahmen insbesondere bei organischen Böden in den ersten Tagen nach Lastaufbringung zu kalibrieren. Beim MVC-Verfahren ist die Kalibrierung schon wegen der durch den Unterdruck hervorgerufenen Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit, die von QIAN et al. (1992) beschrieben wird, erforderlich. Es empfiehlt sich, eine Anpassung des Durchlässigkeitskoeffizienten $k_h/k_v = c_h/c_v$ bis eine zufriedenstellende Übereinstimmung der Berechnungskurve mit der gemessenen Setzungskurve in den ersten Tagen erreicht ist. Hiermit können im weiteren Verlauf der MVC-Betriebsphase zuverlässige Konsolidationsgrade der Weichschichten und damit das Ende der Vorbelastungsphase ermittelt werden. Weiterhin können die vom Konsolidationsgrad der Vorbelastung abhängigen Restsetzungen z.B. mit Hilfe von Gl. 6 abgeschätzt werden.

Für das vorliegende Fallbeispiel sind zwei Kalibrierungszeitpunkte (15 Tage und 50 Tage) erforderlich, um die gemessene Setzungskurve unter Berücksichtigung des Schmiereffekts abzubilden, siehe Abb. 13.

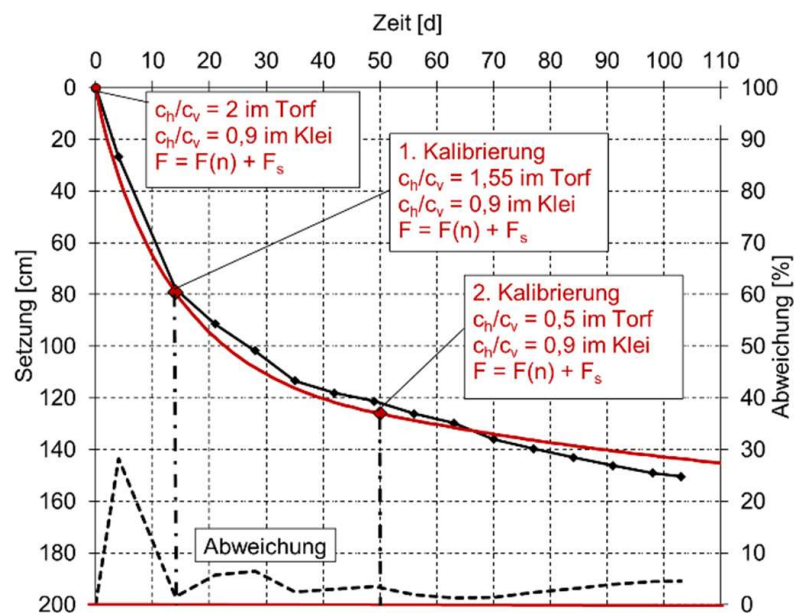


Abb. 13: Kalibrierung und Anpassung der berechneten Konsolidationskurve an die Zeit-Setzungskurve während des MVC-Betriebs

Um den beschriebenen Effekt einer gegenüber der vertikalen stärkeren Verringerung der horizontalen Wasserdurchlässigkeit bei fortschreitender Konsolidation zu berücksichtigen, wird ein linear abnehmender Quotient von $k_h/k_v = c_h/c_v$ in der Torfschicht angenommen. In der analytischen Berechnung wird ein Ausgangsquotient von $c_h/c_v = 2$ angesetzt. Dieser nimmt bis zum Zeitpunkt $t = 50$ d linear ab und erreicht den im Labor ermittelten Endwert von $c_h/c_v = 0,5$. Im weiteren Konsolidationsprozess für $t > 50$ d kann dieser als konstant angesetzt werden. Der Prozess einer Reduktion von c_h/c_v ist wegen der Faserigkeit und der starken Kompression insbesondere in der Torfschicht maßgebend.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Bei Anwendung der Ménard Vacuum Consolidation (MVC®) sind das Konsolidationsverhalten des Bodens während der Vorbelastungsphase sowie das Rekompessionsverhalten im Zuge der Wiederbelastung von besonderem Interesse. Die Restsetzungen werden durch das Langzeit-Kriechverhalten der Rekompensation bestimmt. Unter ödometrischen Bedingungen lässt sich das Kriechverhalten bei Wiederbelastung mit C_{ar} charakterisieren. C_{ar} ist im Gegensatz zur Erstbelastung deutlich kleiner, aber spannungs- und zeitabhängig. Anhand des RCR kann der Sekundärsetzungsbeiwert der Wiederbelastung aus der Spannungsgeschichte unter Berücksichtigung des Konsolidationsgrads bei Vorbelastung abgeschätzt werden. Für eine bestmögliche und langfristige Begrenzung der Kriechsetzungen findet beim MVC-Verfahren eine signifikante Entlastung nach der Vorbelastung statt. Dies ist bei klassischen Vorbelastungen mit großvolumigen Schüttkörpern nur mit großem Erdbau-Aufwand realisierbar und wird in der Praxis kaum umgesetzt. Beim MVC-Verfahren wird die Entlastung immer durch das Abschalten der Pumpen und einer effektiven Entspannung von 70 bis 90 kN/m² sichergestellt.

Die am Fallbeispiel der B202 vorgestellten analytischen konventionellen Berechnungsverfahren auf Basis der klassischen Konsolidationstheorie ermöglichen eine zuverlässige Verformungsprognose und Bemessung der Ménard Vacuum Consolidation auch bei den sensitiven und hoch organischen Böden Klei und Torf. Der für organische Böden labortechnisch nur schwer ermittelbare Durchlässigkeitskoeffizient $k_h/k_v = c_h/c_v$ lässt sich in den ersten Tagen der MVC-Betriebsphase an den tatsächlichen Feldbedingungen kalibrieren.

Voraussetzung für eine qualitative Abbildung des zeitabhängigen Verformungsverhaltens ist in jedem Fall eine Auswertung der Laborversuche unter Berücksichtigung der hohen Kompressibilität und ausgeprägten Kriechneigung.

LITERATUR

- Barron, R. A. (1948): Consolidation of fine-grained soils by drain wells. In: Transactions of ASCE, Vol. 113, pp. 718-742.
- Brandt, V.; Kirstein, J.-F.; Nörenberg, G., Wittorf, N. (2014): 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.
- Cognon, J. M. (1991): La consolidation atmosphérique. In: Révue Française Géotechnique, Vol. 57, pp. 37-47.
- Hansbo, S. (1979): Consolidation of clay by bandshaped prefabricated drains. In: Ground Engineering, Vol. 12, Iss. 5, pp. 16-25.
- Mesri, G.; Godlewski, P. M. (1997): Time- and stress-compressibility interrelationship. In: Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 103, Iss. 5, pp. 417-430.
- Qian, J. H.; Zhao, W. B., Cheung J.K. et al. (1992): The theory and practice of vacuum preloading. In: Computers and Geotechnics, Vol. 13, Iss. 2, pp. 103-118.
- Tinat, Ch., Kirstein J.-F., Rosenberg, M. (2017): Positive influence of unloading after Ménard Vacuum Consolidation on long-term creep behavior of soft soils. In: Proc. 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, 2017, pp. 525-528.
- Tinat, Ch., Rosenberg, M. (2016): Einfluss der Überkonsolidation auf das Sekundärsetzungsverhalten von Klei bei Wiederbelastung. In: Geotechnik 39, Heft 3, S. 175-183.
- Tinat, Ch., Dießelberg M.-B., Kirstein J.-F., Rosenberg, M. (2020): Vorbelasten mit der Ménard Vacuum Consolidation – Analytische und numerische Verformungsanalyse an einem Norddeutschen Fallbeispiel. In: Bauingenieur Nr. 12, S. 481-489.