

Vorbelastung von weichen Böden mit der Ménard Vacuum Consolidation (MVC) am Beispiel von Infrastrukturprojekten

Christopher Tinat, Thomas Frey
MENARD GmbH

1 Einleitung

Vorbelastungen werden typischerweise durch großvolumige Sand- oder Kiesschüttungen herbeigeführt. Insbesondere bei schwach durchlässigen Böden sind lange Liegezeiten erforderlich, welche mit konsolidationsbeschleunigenden Maßnahmen wie Vertikaldrains, z.B. vorgefertigte Streifendrains aus Kunststoff (PVD), verkürzt werden können.

Bei der Ménard Vacuum Consolidation (MVC) wird die Vorbelastung des Bodens durch die 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 auch zu einer besseren Ökobilanz mit einem geringeren CO₂-Bedarf des MVC-Verfahrens gegenüber der klassischen Auflastschüttung bei.

Ein wesentliches Anwendungsgebiet des MVC-Verfahrens stellen Straßenbaumaßnahmen und Infrastrukturflächen auf organogenen Böden in weicher Konsistenz wie Klei, Schlick, Mudde und Seeton bis hin zu Torfen dar. Diese Böden gelten als besondere Herausforderung für die Baupraxis aufgrund der nachfolgenden Eigenschaften:

- die große Streubreite der Bodenparameter und damit Unwägbarkeiten bei der Bemessung,
- die hohe Kompressibilität,
- die geringe Scherfestigkeit,
- das ausgeprägte Langzeit-Verformungsverhalten auch nach dem Abschluss der Primärkonsolidation.

Die viskosen Verformungen nach dem Abbau des Porenwasserüberdruckes werden als Sekundärsetzungen oder auch als Kriechsetzungen bezeichnet und erfordern besondere Berücksichtigung bei Verformungsanalysen und Ermittlung

des Restsetzungspotentials. Durch das MVC-Verfahren können die Kriechsetzungen bei Wiederbelastung im Gebrauchszustand maßgebend reduziert werden. Begründet wird dies durch Entlastung nach dem MVC-Betrieb. Dies ist bodenmechanisch auf das Ent- und Wiederbelastungsverhalten und den Einfluss des sog. *Recompression Ratio* zurückzuführen.

2 Menard Vacuum Consolidation

2.1 Funktionsweise

Beim MVC-Verfahren wird eine Kunststoffolie zur Oberflächenabdichtung eingesetzt. Die seitliche sowie untere Abdichtung des Vakuum-Blockes wird durch die geringe Durchlässigkeit des Bodens und ein gesteuertes Absetzen der Vertikaldrains mit ausreichender Barriere zum Grundwasserleiter sichergestellt. Voraussetzungen, neben einer geringen Wasserdurchlässigkeit, sind eine vollständige Wassersättigung des zu komprimierenden Bodens und die Herstellung eines äußeren Randgrabens. Alternativ können vertikale Dicht- oder Folienwände zur seitlichen Abschirmung eingepresst oder eingefräst werden. Diese werden auch dann ausgeführt, wenn die Vorbelastung direkt neben Bestandstrassen im Straßenbau ausgeführt wird, siehe Brandt et al. (2014). Das innerhalb dieser Umschließung installierte System aus speziellen Vertikal- und Horizontaldrainagen fördert Luft und das infolge der Konsolidation ausgepresste Porenwasser mittels Pumpen aus dem Boden, siehe Abb. 1.

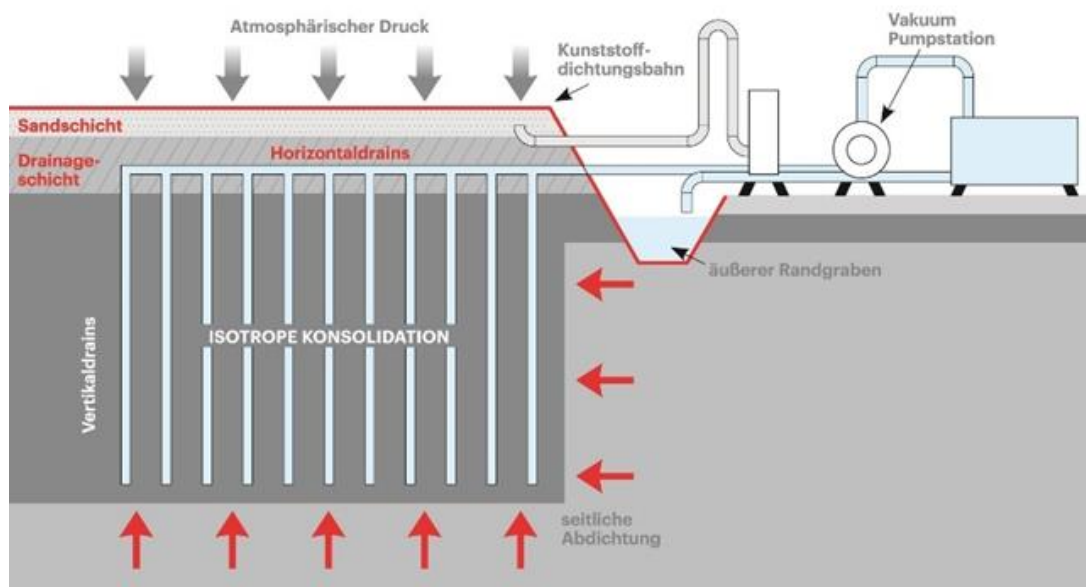


Abb. 1: Prinzipschnitt der Ménard Vacuum Consolidation (MVC®)

2.2 Wirkungsweise gemäß Effektivspannungskonzept

Der atmosphärische Luftdruck wird bei geotechnischen Berechnungen in der Regel vernachlässigt. Diese Vereinfachung beeinflusst die Berechnungsergebnisse in den meisten Anwendungen 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.

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

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. 1 erhöht (Cognon, 1991).

$$\sigma'_{MVC} = \sigma_T - u_T = \sigma + p_a - (u + 0) = \sigma' + p_a \quad (1)$$

Index T = Spannung unter Berücksichtigung des Luftdrucks p_a .

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.

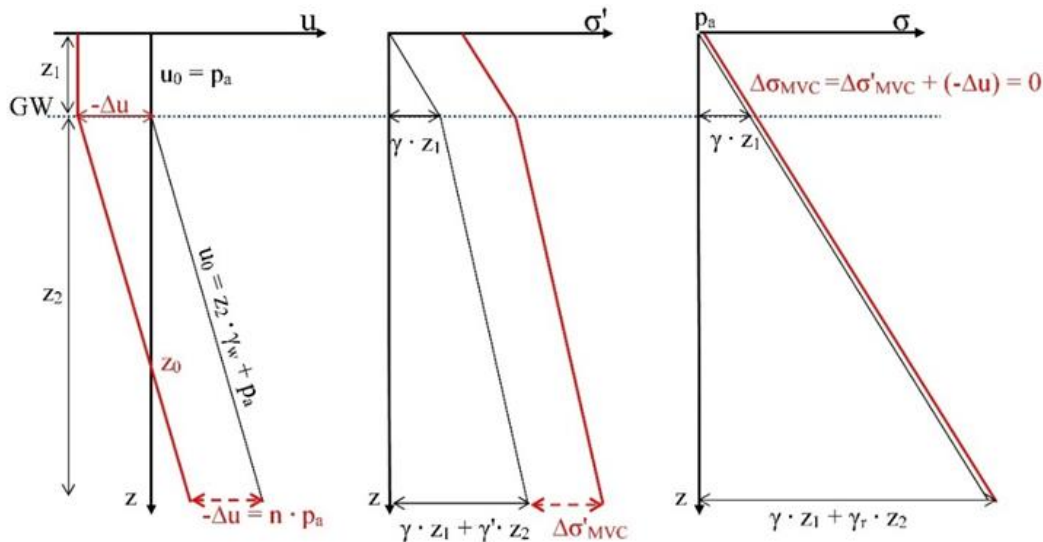


Abb. 2: Primärspannungszustand (schwarze Linien) und Spannungen im Gleichgewichtszustand der Vakuum-Konsolidation (rote Linien)

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 Kies-Schüttung je nach Wichte des Schüttmaterials von rd. 4 bis 5 m Höhe, welche allein durch den erzeugten Unterdruck vollständig ersetzt wird und zusätzlich isotrop und über die Tiefe der Vertikaldrains konstant wirkt.

2.3 Prinzip 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 dem 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.

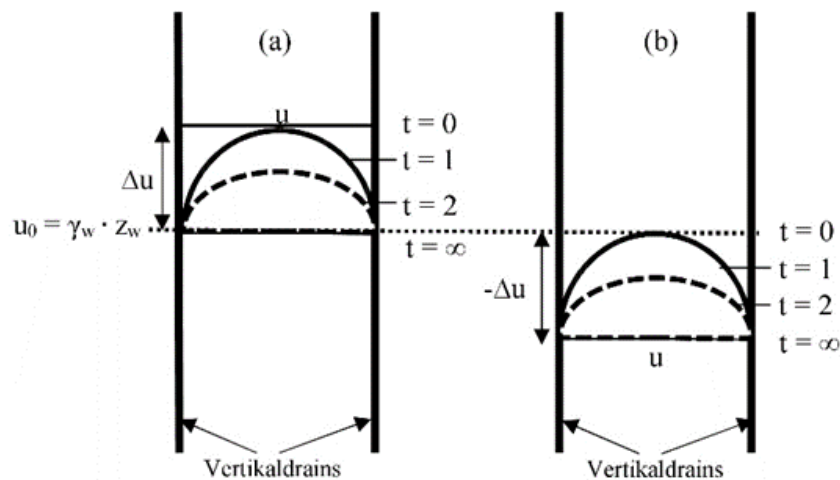


Abb. 3: Konsolidation zwischen Vertikaldrains: (a) Abbau des Porenwasserüberdruckes bei einer Oberflächenbelastung (Auflastschüttung); (b) Reduktion des hydrostatischen Porenwasserdruckes bei der Vakuum-Konsolidation

2.4 Vergleich zur klassischen Auflastschüttung

Bei einer Oberflächenbelastung werden Scherspannungen im Untergrund mobilisiert, wodurch sich die Vertikalspannungen auch seitlich ausbreiten (Lastabstrahlung). Durch diese 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 Lastabstrahlung über die Seiten hinaus stattfindet, siehe Abb. 4 (rechts).

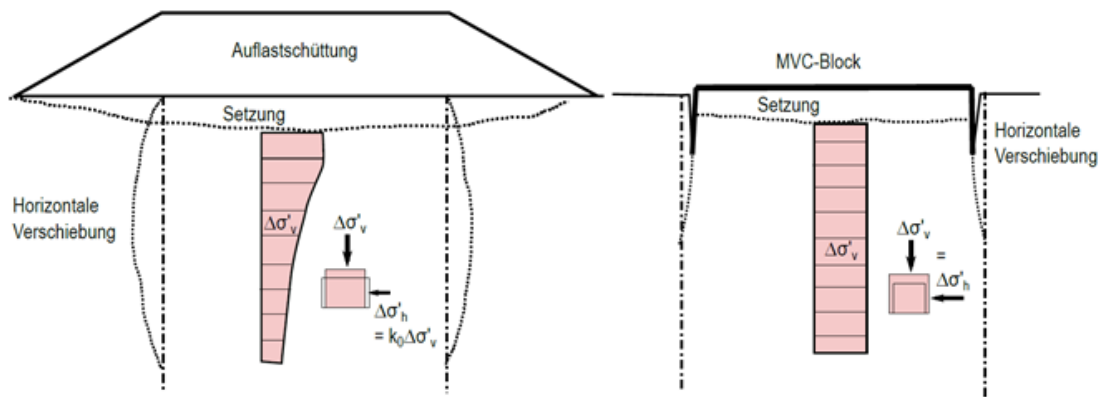


Abb. 4: Untergrundverformungen und Spannungsverlauf bei der Auflastschüttung (links) und bei der Vakuum-Konsolidation (rechts)

Damit ist ein weiterer wesentlicher Vorteil des MVC-Verfahrens gegenüber der klassischen Auflastschüttung die unmittelbare 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 Abb. 5 gegenübergestellt.

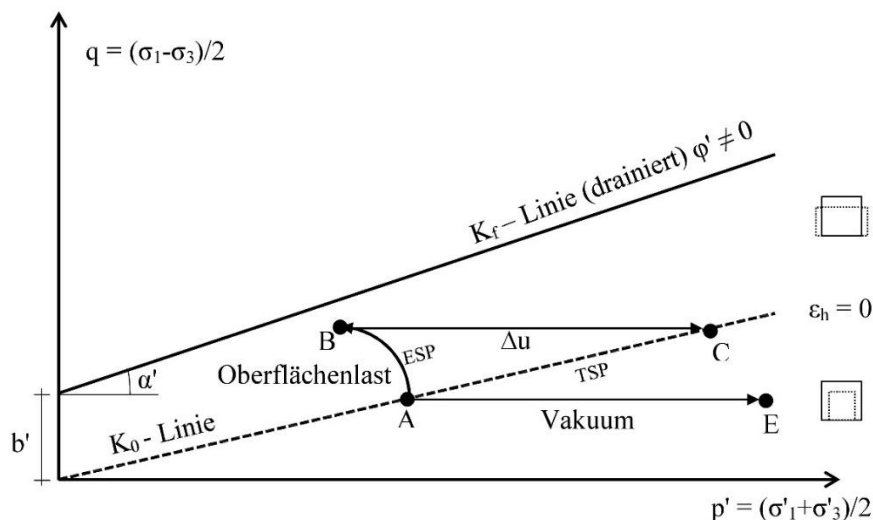


Abb. 5 Klassische Auflastschüttung und Vakuum-Konsolidation im p - q -Diagramm zur Verdeutlichung der Bruchsicherheit bei MVC

Im Fall einer schnell aufgetragenen Auflastschüttung werden die zusätzlichen Totspannungen 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 bzw. einem Grundbruch führen. Erst mit dem Abfließen von Porenwasser baut sich der Porenwasserüberdruck ab (Pfad B-C) und erreicht den Totspannungspfad (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. Die Konsolidationszeiten der Schüttstufen und die Zeit für die Schüttung der Vorbelastung entfallen.

3 Verformungsverhalten von weichen, kriechfähigen Böden

3.1 Erstbelastungsverhalten

Das Kompressionsverhalten von weichen, kriechfähigen Böden wurde mit zahlreichen Kompressionsversuchen am Beispiel von Torf und Klei z.B. in Tinat/Rosenberg (2016) und Tinat et al. (2017) untersucht.

In den Untersuchungen wurden zahlreiche Ödometerversuche ausgeführt. Die einzelnen Laststufen im Ödometer wurden inkrementell aufgebracht und teilweise mehrere Tage bis mehrere Wochen aufrechterhalten, um das Langzeit-Verformungsverhalten zu erfassen. 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 Porenzahlverringering (Δe_v) eingetreten. Diese Verformungen führen zu einer Zunahme der äquivalenten Spannungen σ'_e , die bereits nach 24 h um den Faktor 1,3 größer sind als die tatsächlich wirkenden Totalspannungen. Die Kriechverformungen sind differenziert von der Primärkonsolidation auszuwerten.

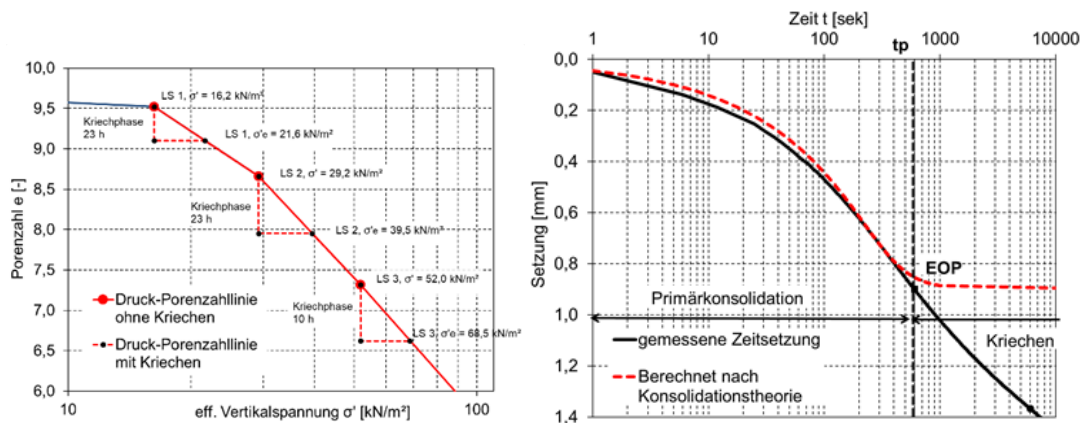


Abb. 6: Exemplarische Auswertung eines Ödometersversuches am Torf: Halblogarithmisches Spannungs-Porenzahldiagramm (links) und halblogarithmisches Zeit-Setzungsdiagramm der Laststufe 3 mit $\sigma' = 52 \text{ kN/m}^2$ (rechts)

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 halblogarithmische Spannungs-Porenzahllinie verläuft entsprechend geradlinig, sofern die Verformungen zum Zeitpunkt des t_p angesetzt werden.

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. 2 wurde erwartungsgemäß als weitestgehend spannungsunabhängig identifiziert und ist auch über die Dauer einer Kriechphase bei Erstbelastungsbedingungen nahezu konstant.

$$C_\alpha = \frac{\Delta e_v}{\Delta \log t} \quad (2)$$

Der Verlauf des Kriechastes ist bei halblogarithmischer 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, siehe Abb. 6. Aus diesem Grund wird für organische Böden das Verfahren nach TAYLOR im Wurzel-Zeit-Maßstab empfohlen.

3.2 Wiederbelastungsverhalten und Einfluss der Entlastung

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 $C_{\alpha}/C_c = C_{\alpha r}/C_{c r} = \text{const.}$ bestätigt werden, siehe Abb. 7.

Tab. 1: Verhältniswerte von C_{α}/C_c nach Mesri et al. (1994)

Bodenart	C_{α}/C_c
Granulare Böden	$0,02 \pm 0,01$
Anorganische Tone und Schluffe	$0,04 \pm 0,01$
Organische Tone und Schluffe	$0,05 \pm 0,01$
Torf	$0,06 \pm 0,01$

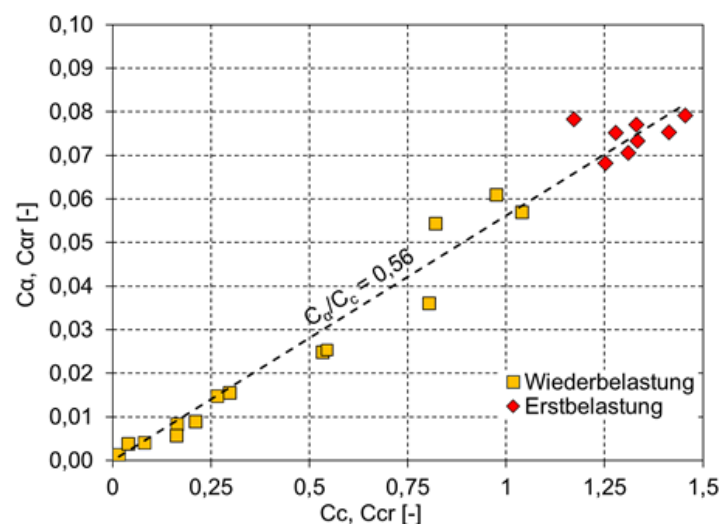


Abb. 7: C_{α}/C_c und $C_{\alpha r}/C_{c r}$ bei Erst- und Wiederbelastung des norddeutschen Kleis

Bei Wiederbelastung besteht eine Korrelation zu dem semi-empirisch hergeleiteten Recompression Ratio (RCR) gemäß Gl. 3. Der RCR ist definiert als Quotient aus der Spannungsdifferenz der Wiederbelastung und der Spannungsdifferenz der Entlastung (Tinat/Rosenberg, 2016).

$$C_{c r} / C_c = C_{\alpha r} / C_{\alpha} = \beta \cdot RCR \quad (3)$$

Mit dieser Beziehung ist eine Abschätzung der Rekompansionsparameter 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 $RCR = 1$, also beim Erreichen

der effektiven Vorbelastungsspannung, betrugen die Rekompansionsparameter 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 Rekompansionsphase 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.

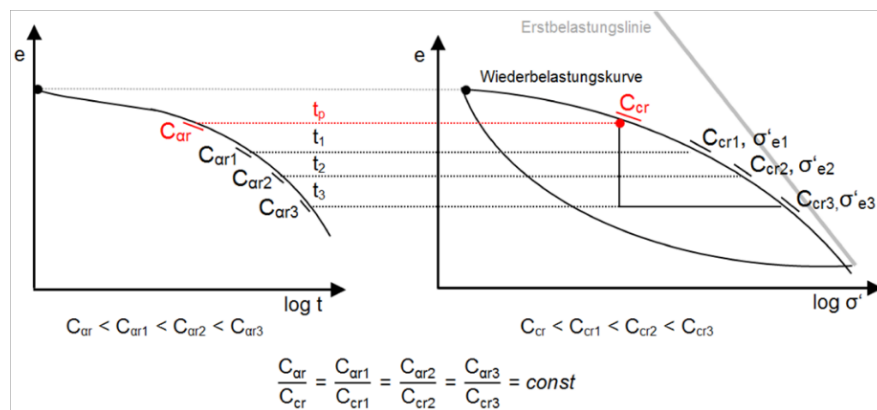


Abb. 8: Zusammenhang zwischen der Zeitabhängigkeit von C_{ar} und der Spannungsabhängigkeit von C_{cr} (Tinat/Rosenberg, 2016)

4 Projektbeispiele Infrastruktur

Das MVC-Verfahren wird weltweit in wassergesättigten, weichen bis breiigen Böden eingesetzt, die eine geringe Durchlässigkeit aufweisen. Auch organische Böden bis hin zum Torf stellen ein typisches Anwendungsgebiet des Verfahrens dar. In Deutschland wurde die Ménard Vacuum Consolidation bisher in folgenden Projekten angewendet:

- Grundsanierung der B202 zwischen Erfde und Norderstapel, 23.300 m², 2013
- Neubau Ortsumgehung Husum/Rödemis, 6.900 m², 2013
- Schweiburger Siel, 1.600 m², 2011
- Neubau Airbus Werksgelände, Hamburg „Mühlenberger Loch“, 85.000 m², 2002
- Seehafen Wismar, 15.000 m², 1997
- Hafenfläche Lübeck, 22.500 m², 1994

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Anwendungsbeispiele des MVC-Verfahrens zur Vorbelastung und Gründung von Straßenverkehrsdämmen in Deutschland und Frankreich vorgestellt.

4.1 Norddeutschland: B202 Erfde-Norderstapel

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 mit den Bodenparametern in Tab. 2. Diese liegen entlang des genannten Streckenabschnittes in Wechsellagerung mit einer Mächtigkeit von bis zu 12 m vor und überlagern die pleistozänen Sande.

Tab. 2: Bodenparameter der organischen Böden Torf und Klei, B202 Erfde-Norderstapel

	e_0	w	v_{gl}	γ	k_h/k_v	C_α	C_c	C_α/C_c	c_v
	[-]	[%]	[%]	[kN/m ³]	[-]	[-]	[-]	[-]	[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	$1,07 \cdot 10^{-8}$

Die im Rahmen der Sanierung errichtete Neutrasse wurde im Jahr 2012 mit dem MVC-Verfahren vorbelastet. Die baubetriebliche Besonderheit war, dass die Vorbelastung der Neubautrasse direkt neben der zur Hälfte verbliebenden Bestandsstraße erfolgte und der Verkehr dauerhaft aufrechterhalten wurde, siehe (Brandt et al., 2014).



Abb. 9 Vakuum-Fläche zur Vorbelastung der Neutrasse der B202 direkt neben dem Altbestand im einspurigen Betrieb

4.1.1 Monitoring-Ergebnisse

Während des dreimonatigen MVC-Betriebes traten Setzungen von 1,5 m bis zu 2 m auf, die durch kontinuierliches Aufbringen des neuen Dammkörpers ausgeglichen wurden. In Abb. 10 werden exemplarisch die Monitoring-Ergebnisse des Bau-km 1+170 dargestellt. Während des MVC-Betriebes wurden die vertikalen Verformungen (Setzungspegel), die horizontalen Verformungen (Vertikalinklinometer) und die Unterdruckwerte im System mittels Piezometer aufgezeichnet. Der Unterdruck betrug bis zum Betriebsende (103 Tage) 0,7 bar, d.h. $\Delta u = \Delta \sigma_{MVC} = 70 \text{ kN/m}^2$.

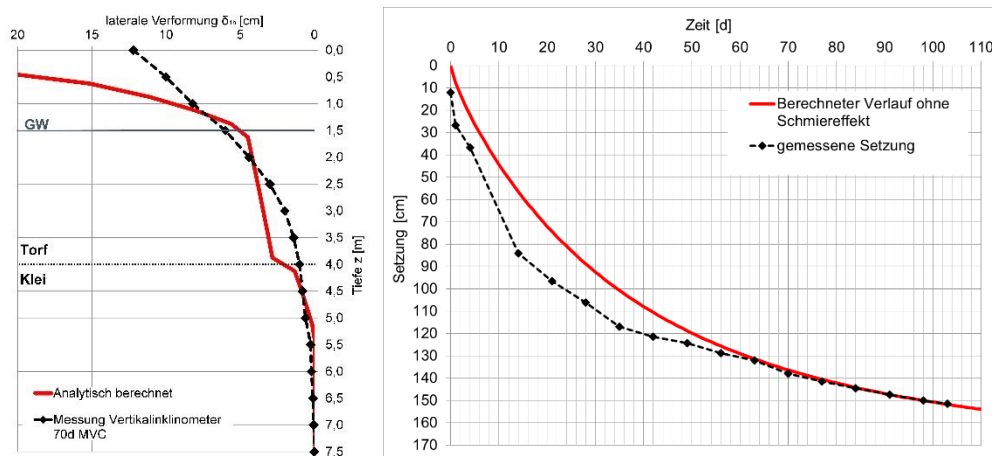


Abb. 10: Ergebnisse Verformungsmonitoring Bau-km 1+170: laterale Verschiebungen nach innen (links); Setzungsverlauf (rechts)

Die Verformungsanalyse erfolgte auf Basis der im Labor für den Torf und Klei ermittelten Bodenkennwerte.

Die 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. Eine Kalibrierung der Konsolidationskurve in den ersten Tagen des Vakuum-Betriebs wird von Tinat/Racinais (2022) vorgestellt. Eine Nachrechnung der Vakuum-Konsolidation mit der Finite-Elemente-Methode

(FEM) unter Verwendung geeigneter Stoffmodelle ist in Tinat et al. (2020) dargestellt.

4.2 Norddeutschland: Ortsumgehung Husum

Die Neubautrasse der Ortsumgehung Husum in Norddeutschland verläuft auf ca. 4 bis 5 m mächtigen Klei- und Torfschichten. In 3,5 Monaten wurden die kompressiblen Böden in einem Streckenabschnitt mit dem MVC-Verfahren vorbelastet. Es traten Setzungen während des MVC-Betriebes von ca. 0,9 m ein. Der Unterdruck wurde während der kalten Wintermonate unter Frosttemperaturen aufrechterhalten, siehe Abb. 11 rechts.



Abb. 11: MVC-Block zur Vorbelastung eines Streckenabschnittes für die Ortsumgehung Husum

Das Setzungsmonitoring zeigt Hebungen des Vakuum-Blockes von rd. 4cm nach dem Abschalten der Pumpen und Entspannung von $\Delta u = \Delta \sigma_{MVC} = 70 \text{ kN/m}^2$. Die Entlastung und das Schwellen des Bodens sorgt für die erforderliche Überführung des Bodens in den Wiederbelastungsbereich zur Reduzierung der Kriechsetzungen in der Nutzungsphase der Straße.

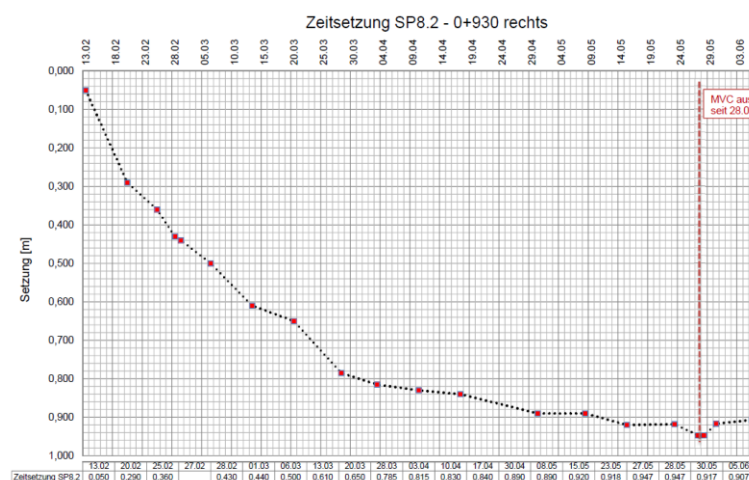


Abb. 12: Zeit-Setzungsverlauf Setzungspegel 8.2 Bau-Km 0+930

4.3 Frankreich: Autobahn A837

Die Trasse der Autobahn A837 Saintes-Rochefort verbindet die Autobahn A10 Paris Bordeaux mit der Atlantikküste und führt in Teilabschnitten durch Sumpf- und Mooregebiete. Die Eigenschaften dieser Böden erlaubten es nicht, die Aufschüttungen des Verkehrsdammes ohne vorherige Bodenverbesserung an die Brückenbauwerke zu führen. Durch Ausführung der Ménard Vacuum Consolidation auf einer Fläche von insgesamt rd. 45.000 m² wurde der Baugrund in nachfolgenden Streckenabschnitten vorbelastet:

- Sumpfgebiet von Tonnay-Charente: in 18 bis 26 m Tiefe
- Entlang der Boutonne: in 4 bis 13 m Tiefe
- Entlang der Agnet: in 4 bis 20 m Tiefe
- Entlang der Charente mit bis zu 30 m Schlick und kompressiblen Tonen

Das MVC-Verfahren wurde ausgeführt, um einerseits die Setzungen nach dem Bau zu reduzieren, und zum anderen um die Standsicherheit des Dammes während der Bauarbeiten zu gewährleisten. Da die Widerlager der Brückenbauwerke auf Pfählen gegründet wurden, mussten die Differenzsetzungen zwischen Erddamm und Bauwerk entsprechend begrenzt werden. Dies konnte mit dem MVC-Verfahren sichergestellt werden (Pahud/Liasu, 1999).



Abb. 13: Luftbildaufnahmen der MVC-Flächen an den späteren Brückenbauwerken der A837

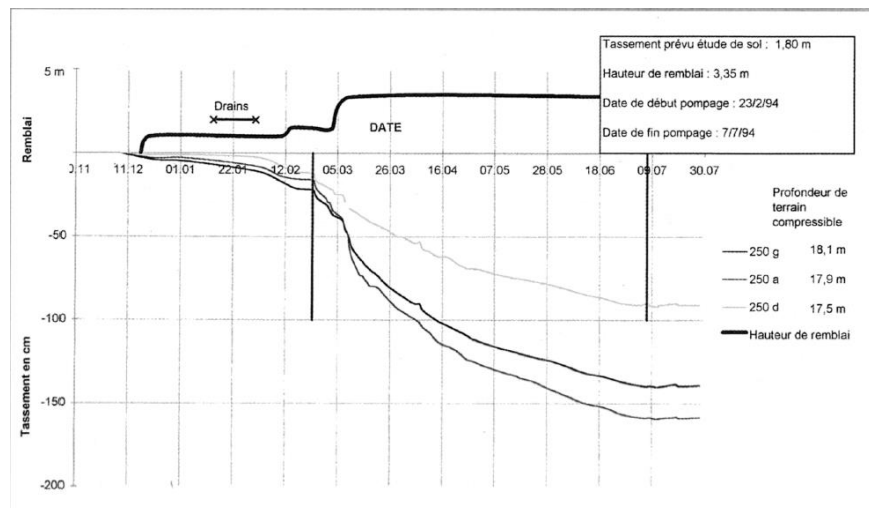


Abb. 14: Ergebnisse des Setzungsmonitorings während des MVC-Betriebes für die A837 (Pahud/Liasu, 1999)

5 Zusammenfassung

Bei der Vorbelastung von weichen Böden sind sowohl das Konsolidierungsverhalten während der Vorbelastung als auch das Rekompessionsverhalten während der Nutzungszeit des Bauwerks von Interesse. Die Restsetzungen werden insbesondere durch das Langzeitkriechen während der Wiederbelastung bestimmt..

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.

Entwickelte Berechnungsverfahren auf Basis der klassischen Konsolidationstheorie ermöglichen eine zuverlässige Verformungsprognose und die Bemessung der Ménard Vacuum Consolidation auch bei den sensitiven und hoch organischen Böden wie Klei und Torf.

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

6 Literatur

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.

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 Sekundär-setzungsverhalten von Klei bei Wiederbelastung*. In: *Geotechnik* 39, Heft 3, S. 175-183.

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

Mesri, G., Dominic O. Kwan Lo, and Tao Wei Feng, 1994. *Settlement of embankments on soft clays*. In: *Proceedings of the Conference on Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments*. Part 2. Publ by ASCE.

Pahud, G., Liasu, Ph., 1999. *Atmospheric Consolidation of Soft Ground under Motorway fills*. In: *Rencontres Géosynthétiques*, Vol. 1, pp. 81-86.

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 Sekundär-setzungsverhalten von Klei bei Wiederbelastung*. In: *Geotechnik* 39, Heft 3, S. 175-183.

Tinat, Ch. und Racinais, J., 2022. *Anwendung und Kalibrierung der Ménard Vacuum Consolidation (MVC®) bei sehr weichen und organischen Böden*. In: *Beiträge zur österreichischen Geotechniktagung (ÖGT)*, Wien 2022.

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.

Autor:

Vorname, Name: Christopher Tinat

Titel: M.Sc.

Firma, Abteilung: MENARD GmbH

Adresse: Hittfelder Kirchweg 2, 21220 Seevetal bei Hamburg

Tel: +49 (0) 4105 / 66 48 15

mail: ctinat@menard.gmbh

internet: www.menard.gmbh

Teilnahme: ja

Vortragender: ja

Co-Autor:

Vorname, Name: Thomas Frey

Titel: Dipl.-Ing.

Firma, Abteilung: MENARD GmbH

Adresse: Olchinger Str. 56, 82194 Gröbenzell bei München

Tel: +49 (0) 711 / 411 95 323

mail: tfrey@menard.gmbh

internet: www.menard.gmbh

Teilnahme: ja

Vortragender: nein