



Die von MÉNARD entwickelte Pressiometerapparatur basiert auf der Idee des Seitendruckapparates nach KÖGLER (1933) und besteht aus einer zylindrischen Sonde, die seitlich ausdehnbar ist und in einem Bohrloch auf die Untersuchungstiefe abgesenkt wird, sowie einer Messapparatur, die an der Oberfläche verbleibt. Die aus drei Zellen bestehende Sonde übt auf die Bohrlochwandung im Bereich der zentralen Messzelle einen gleichmäßigen Druck aus, der rechnerisch erfassbar ist. Die Aufweitung des Bohrloches infolge der Belastung wird abgelesen und für jede Druckstufe in Abhängigkeit von der Zeit registriert (Abb. 1).

Die Druck- und Regelorgane beruhen auf pneumatischen Prinzipien. Die Informationen über die Verformung des Bodens werden hydraulisch übermittelt und erscheinen auf einem Volumeter hoher Präzision. Die Apparate können mit einer Serie von Sonden ausgerüstet werden, welche Durchmesser entsprechend den gängigen Bohrungen haben, bezeichnet nach ihrem Nenndurchmesser:

Code DCDMA	Sonden- durchmesser mm	Bohrlochdurchmesser mm	
		min.	max.
EX	32	34	38
AX	44	46	52
BX	58	60	66
NX	(72) 74	(74) 76	80

Die zur Zeit am häufigsten verwendeten Apparaturen gehören zum Typ G (\varnothing 58 mm), charakterisiert durch zwei konzentrische Verbindungsleitungen für Wasser und Luft (Koaxialschlauch), welche parasitäre Ausdehnungen vermeiden, was ihre Anwendung sogar in festem Fels (E-Modul \geq 20.000 MPa) möglich erscheinen lässt, wobei üblicherweise der Bohrdurchmesser BX gewählt wird.



Bei sehr weichen Böden, charakterisiert durch einen Grenzdruck unter 1,5 bar, sollte eine Membrane und Schutzhülle aus sehr weichem Material verwendet werden (Latex) mit einer Eigensteifigkeit unter 0,6 bar. Dies ist der Fall bei Schlamm und Torf.

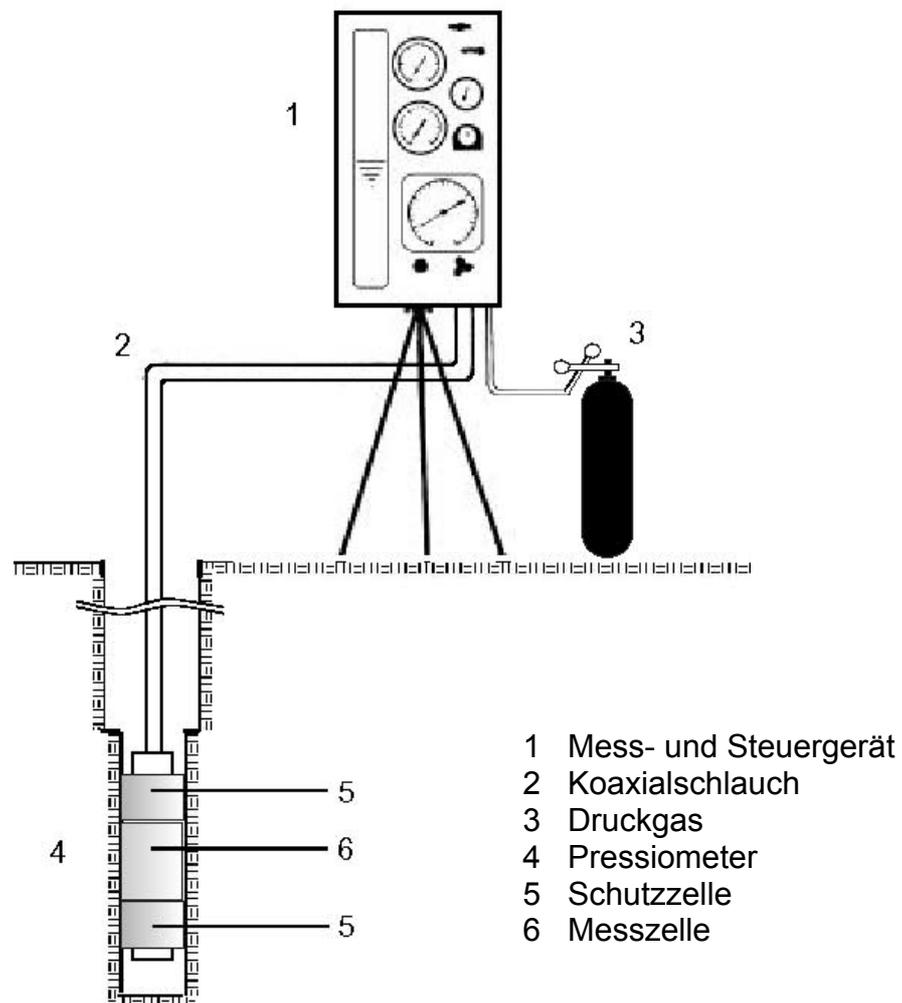


Abb. 1 Prinzipieller Versuchsaufbau für den Pressiometerversuch nach MÉNARD



Umgekehrt sollen bei sehr hohen Moduli (höher als 2.000 MPa) sehr widerstandsfähige Membranen und Schutzhüllen verwendet werden, die vorher kalibriert werden. Diese Membranen sind charakterisiert durch eine schwächere und gleichmäßigere Zusammendrückung. Wenn die Volumenveränderung auf Grund einer Druckänderung von 1 bar niedriger wird als $0,5 \text{ cm}^3$ (Modul höher als 400 MPa), sollte die Umschaltvorrichtung am Volumeter verwendet werden, welche die Empfindlichkeit der Ablesungen ver-hundertfacht.

Der Standardversuch soll innerhalb 24 Stunden nach der Herstellung des Bohrlochs durchgeführt sein, mit Ausnahme des Falls gerammter Sonden, bei denen das Risiko einer Bodenstörung durch Wasseraufnahme im Bohrloch nicht zu befürchten ist. Allenfalls können Zwischenzeiten von einigen Tagen bei Bohrungen ohne Wasserspülung (Handschappe, Druckluftbohrung mit Druckluftförderung des Bohrguts) oberhalb des Grundwasserspiegels zugelassen werden.

Der Versuch selbst ist genormt und soll unter Anwendung von zehn gleichen Druckstufen (zulässig sechs bis vierzehn Druckstufen) bis zur Erreichung der Bruchgrenze ausgeführt werden. Die Ablesung der Bohrlochverformung (Volumenzunahme) als Funktion der Zeit wird für jede Druckstufe bei 15, 30 und 60 Sekunden nach Erreichung des Druckes vorgenommen (Abb. 2).

Um eine möglichst genaue Belastungskurve zu erreichen, soll das gemessene Volumen 700 cm^3 betragen, wenn $p_{LM} < 8 \text{ bar}$ ist, und 600 cm^3 , wenn $8 \text{ bar} < p_{LM} < 15 \text{ bar}$ ist. In den übrigen Fällen soll der Versuch bis zu 20 - 25 bar Druck in Böden und 50 - 70 bar im Fels fortgesetzt werden.

Aus den für jede Tiefenstufe ermittelten Last/Volumendiagrammen (Material-Arbeitslinie) werden die hauptsächlichsten mechanischen Eigenschaften des Bodens errechnet: Der Deformationsmodul (MÉNARD-Modul E_M) und der Grenzdruck (Bruchgrenze p_{LM}). Der pressiometrische Modul E_M ist ein Schermodul des Bodens, gemessen in einem deviatorischen Spannungsfeld. Er charakterisiert die pseudo-elastische Phase des Versuchs.



Der Grenzdruck p_{LM} entspricht nach Definition dem Grenzbruchzustand des Bodens, wenn dieser einer gleichmäßig ansteigenden Last auf die Wandung eines zylindrischen Hohlraums ausgesetzt ist.

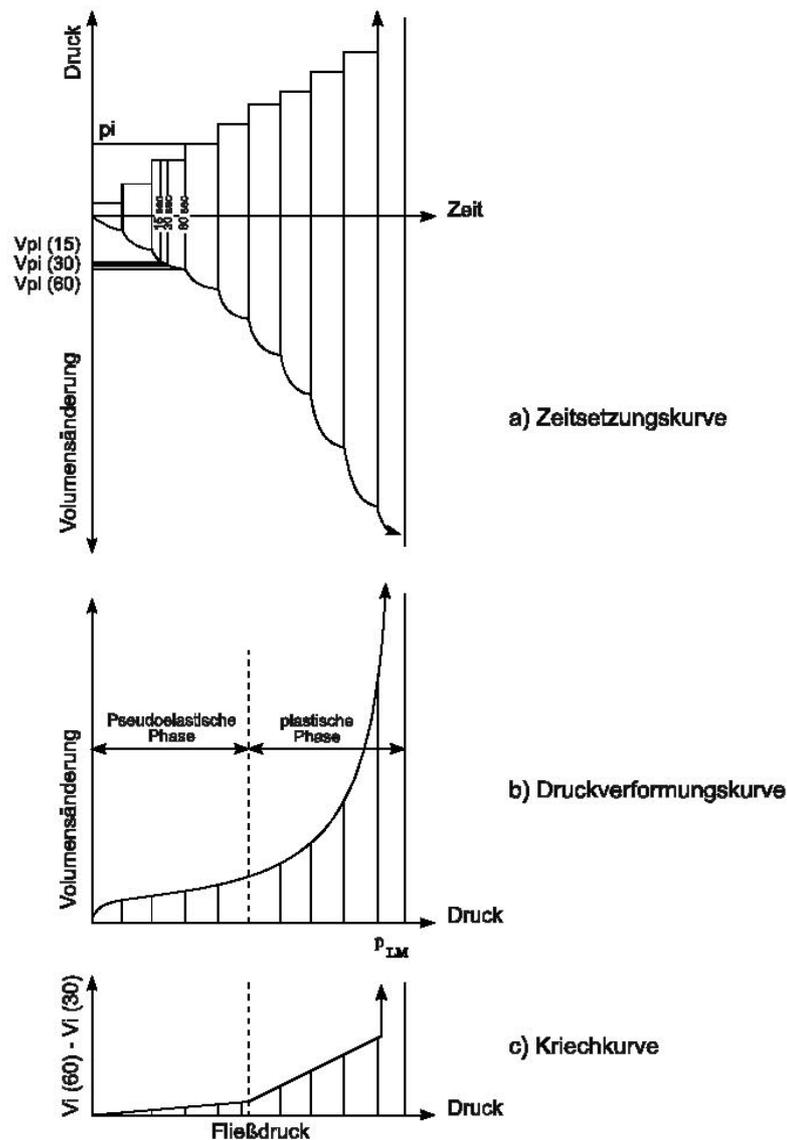


Abb. 2 Schematisches Versuchsprotokoll eines MÉNARD-Versuches



Zur Berechnung des Pressiometer-Moduls (E_M) geht man von der Grundformel nach LAMÉ für die Ausdehnung Δr eines zylindrischen Hohlraums mit dem Radius r unter dem Einfluss eines steigenden Druckes Δp aus:

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{1+\nu}{E} \Delta p \quad \text{bzw.} \quad E = (1+\nu) \frac{r}{\Delta r} \Delta p$$

wobei ν die Poissonzahl ist. Verwendet man statt der Radiusänderung Δr die Volumenveränderung Δv , so lautet die Gleichung:

$$E = 2(1+\nu) \nu \frac{\Delta p}{\Delta v}$$

Als Pressiometermodul E_M bezeichnet man:

$$E_M = K \frac{\Delta p}{\Delta v}$$

wobei K eine geometrische Konstante der Pressiometersonde ist. Δp und Δv sind die zugehörigen Veränderungen des Drucks und des Volumens in der pseudo-elastischen Phase des Versuchs (Abb. 2b). Dabei sollte die Untergrenze des Schwankungsbereichs Δp immer höher sein als der horizontale Ruhedruck p_h des Bodens.

Es kann gezeigt werden, dass:

$$K = 2,66 (\nu_o + \nu_m)$$

ist. Dabei sind:

- ν_o das Volumen der Messzelle im Ruhezustand und
- ν_m das Flüssigkeitsvolumen, das in die Messzelle aufgrund des angewandten mittleren Drucks p_m eingefüllt wird.

Die Poissonzahl ν wird normalerweise mit 0,33 angenommen.



Der Grenzdruck p_{LM} ergibt sich aus der Lage der Asymptote an die pressiometrische Kurve und kann auf der Abszisse direkt im Diagramm abgelesen werden.

Um eine Vorstellung von der Größe der Werte E_M und p_{LM} zu bekommen, seien nachfolgend einige typische Werte aufgeführt:

Bodenart	E_M [MPa]	p_{LM} [bar]
Schlamm und Torf	0,2 bis 1,5	0,2 bis 1,5
weiche Tone	0,5 bis 3,0	0,5 bis 3,0
plastische Tone	3,0 bis 8,0	3,0 bis 8,8
steife Tone	8,0 bis 40,0	6,0 bis 20,0
Mergel	5,0 bis 60,0	6,0 bis 40,0
schluffige Sande	0,5 bis 2,0	1,0 bis 5,0
Schluffe	2,0 bis 10,0	1,0 bis 15,0
kiesige Sande	8,0 bis 40,0	12,0 bis 50,0
Feinsande	7,5 bis 40,0	10,0 bis 50,0
kalkiger Fels	80,0 bis 20.000	30,0 bis über 100
neue Schüttungen	0,5 bis 5,0	0,5 bis 3,0
alte Aufschüttungen	4,0 bis 15,0	4,0 bis 10,0

Bedingt durch den Umstand, dass die LAMÉ-Gleichung ein Fehlen der Zugfestigkeit des untersuchten Bodens nicht in Betracht zieht, wird beim MÉNARD-Versuch ein Modul bestimmt, der meist zwei- bis dreimal kleiner ist als der Modul, den wir durch andere gebräuchliche Methoden bestimmen. Deshalb wird das Ergebnis des Pressiometerversuches auch als MÉNARD-Modul E_M bezeichnet und dieser Modul nur in einer spezifischen Vorgehensweise zur Dimensionierung eines Fundamentes oder von Pfählen angewandt.