



Vergleich von kraft- und weggesteuerten Probebelastungen an CSV-Säulen

Grundlagen, Interpretation und Erfahrungswerte

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Reitmeier

Hochschule Konstanz mit Öffentlicher Prüfstelle
für Baustoffe und Geotechnik

Vorsitzender des Unterausschusses Trockenmörtelsäulen der DGGT

Christian Brandl

Fachabteilung Ausführungsplanung
Laumer GmbH & Co. CSV Bodenstabilisierung KG.



veröffentlicht im Rahmen des 2. Symposium
Baugrundverbesserung in der Geotechnik
am 13. und 14. September 2012
an der TU Wien



Laumer GmbH & Co.
CSV Bodenstabilisierung KG

Bahnhofstraße 8
84323 Massing
Tel.: 08724/88-900
Fax: 08724/88-770

www.laumer.de

Vergleich von kraft- und weggesteuerten Probelastungen an CSV-Säulen

Grundlagen, Interpretation und Erfahrungswerte

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Reitmeier

Hochschule Konstanz mit Öffentlicher Prüfstelle
für Baustoffe und Geotechnik

Vorsitzender des Unterausschusses Trockenmörtelsäulen der DGGT

Christian Brandl

Fachabteilung Ausführungsplanung
Laumer GmbH & Co. CSV Bodenstabilisierung KG.

Einführung

Baugrundverbesserungen werden mit steigender Tendenz zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung des Verformungsverhaltens von Flachgründungen ausgeführt.

Im Rahmen der Qualitätssicherung sind nach dem Merkblatt der DGGT für die Herstellung, Bemessung und Qualitätssicherung von Stabilisierungssäulen bei jedem Bauvorhaben zur Kontrolle des Tragverhaltens Abnahmeprüfungen durchzuführen.

Während die Innere Tragfähigkeitsreserve auch durch Probennahme und Prüfung im Labor erfolgen kann, wird der Nachweis der Äußeren Tragfähigkeit mit Hilfe von Probelastungen in situ geführt.

Grundsätzlich können Abnahmeprüfungen zur Bestimmung der Äußeren Tragfähigkeit an einzelnen CSV-Säulen sowohl mit schrittweiser Lasterhöhung (ML-Versuche, maintained loading) als auch vorschubgesteuert (CRP-Versuche, constant rate of penetration) durchgeführt werden.

Mit vorschubgesteuerten Probelastungen lassen sich im Vergleich zu kraftgesteuerten Prüfungen, bei deutlich kürzeren Prüfzeiten, noch umfangreichere Information zum Tragverhalten von Stabilisierungssäulen gewinnen.

Im weiteren wird gezeigt, dass Probelastungen mit schrittweiser Laststeigerung bezüglich der Endstände der Laststufen einem weggesteuerten Belastungsversuch entsprechen.

Zum Vergleich kann aus den Versuchsergebnissen eines weggesteuerten Belastungsversuchs auch die Versuchskurve eines kraftgesteuerten Belastungsversuchs abgeleitet werden. Die hierzu erforderlichen theoretischen Grundlagen werden nach dem in (Krieg, Goldscheider, 1998) beschriebenen Verfahren im Folgenden kurz zusammengestellt.

Bezeichnungen

ε	- Dehnung
$\dot{\varepsilon}$	- Dehnungsrate
$\varepsilon^v, \dot{\varepsilon}^v$	- Dehnung bzw. Dehnungsrate infolge Kriechens
t	- Zeit
σ'	- effektive Spannung

K'	- effektiver Erddruckbeiwert
K'_0	- effektiver Erdruhedruckbeiwert
I_{va}	- Zähigkeitsindex $I_{va} \approx -7,02 + 2,55 \ln(w_L(\%))$ mit w_L - Fließgrenze
Q, Q_g	- Säulenkraft, Säulengrenzkraft
s, \dot{s}	- Säulenkopfsenkung, Setzungsrate
k_s	- Kriechmaß
Q_{lim}	- Q an der Grenze des linearen Kriechverhaltens mit log t
s^v, \dot{s}^v	- Senkung und Senkungsrate infolge Kriechens
<i>Isochronen</i>	- Linien gleicher Kriechzeiten
<i>Isotachen</i>	- Widerstands-Setzungslinien

Viskoses Verhalten des Bodens

Unter Viskosität des Bodens wird die Abhängigkeit des Materialverhaltens von der Verformungsgeschwindigkeit bzw. der Zeit verstanden, soweit sie nicht durch Strömungen des freien Porenwassers bedingt ist. Vereinfacht ausgedrückt findet die Viskosität des Bodens ihre Ursache in den sogenannten diffusen Wasserhüllen, welche an die Bodenkörner gebunden sind. Wegen der starken Anziehungskräfte der Kornoberfläche besitzt das in diesen Hüllen gebundene Wasser – im Vergleich zum freien Porenwasser – eine sehr hohe Zähigkeit bzw. Viskosität.

Die Größe der Bodenviskosität, die hauptsächlich durch den Mengenanteil an gebundenem Wasser bestimmt wird, hängt von der physiko-chemischen Wechselbeziehung des Boden-Wasser-Gemisches und der spezifischen Oberfläche der Bodenkörner ab. Aus diesem Grund weisen Tone und organische Böden ein ausgeprägt viskoses Verhalten auf, wohingegen bei Sanden diese Eigenschaft verhältnismäßig gering ist.

Die Viskosität äußert sich beim Boden durch Kriechen – d.h. mit der Zeit fortschreitende Verformungen $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^v \neq 0$ unter konstanter effektiver Spannung $\sigma'(t) = const.$ und durch Geschwindigkeitsabhängigkeit, - d.h. sprunghafte Spannungsänderungen infolge sprunghafter Veränderungen der Verformungsgeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}$.

Die am Säulenkopf gemessene widerstehende Kraft Q und Senkung s werden als die integrale Antwort des zur Lastabtragung herangezogenen Bodens erhalten.

Da die Säule selbst nicht viskos reagiert, wird das viskose Verhalten allein von der Viskosität des umgebenden Bodens bestimmt.

Das Kriechen ist außer von der Bodenart auch vom Spannungsverhältnis $K' = \sigma'_3 / \sigma'_1$ ($\sigma'_3 < \sigma'_1$) abhängig. Ist das Spannungsverhältnis K' größer als der Erdruhedruckbeiwert K'_0 so treten kleinere Setzungen ein als bei eindimensionaler Kompression.

Umgekehrt verhält es sich, wenn die Scherbeanspruchung höher bzw. K' kleiner als K'_0 ist; dann ist die Rate des Kriechens größer.

Herstellungsbedingt entstehen bei teilgesättigten Böden infolge der durch den Verdrängungsprozess um eine Trockenmörtelsäule bedingten Porenzahländerung horizontale Verspannungen.

Zusätzlich wird durch Saugspannungseffekte der die Säulen unmittelbar umgebende Boden durch den Wasserentzug komprimiert und damit verdichtet, so dass im Grenzzustand nicht mehr die unmittelbare Säulenoberfläche maßgeblich ist.

Viskoses Verhalten der Stabilisierungssäule Übertragung des Bodenverhaltens auf das Verformungsverhalten

Da die Stabilisierungssäule selbst nicht viskos reagiert, wird das viskose Verhalten allein von der Viskosität des umgebenden Bodens bestimmt.

Das Kriechmaß k_s hängt dabei vom Ausnutzungsgrad des Säulenwiderstands Q_g ab und nimmt mit diesem überproportional zu.

$$k_s = \Delta s^v / \log(t_2 / t_1) \quad \text{Gleichung 1}$$

Bei einem hohen Ausnutzungsgrad $Q > Q_{lin}$ nehmen die Kriechsetzungen s^v überlinear mit $\log t$ zu (siehe Bild 1).

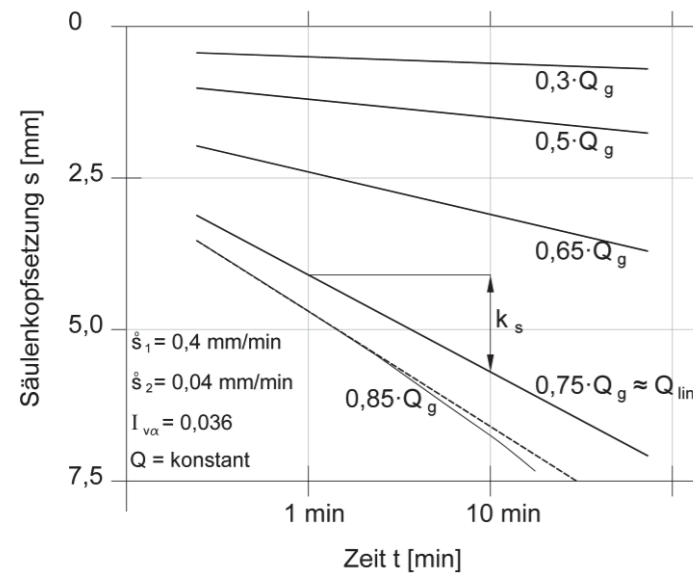


Bild 1 Entwicklung des Kriechmaßes mit dem Ausnutzungsgrad des Säulenwiderstands

Man kann nun zu jedem Punkt einer Last-Setzungskurve solche Punkte auftragen, die nach gleichen Kriechzeiten erreicht werden, und erhält so eine Schar von Kurven, die sich von der Ausgangskurve durch gleiche Kriechzeiten unterscheiden (*Isochronen*). Da die Kriechneigung mit zunehmender Auslastung der Stabilisierungssäule größer wird, nimmt auch der vertikale Abstand Δs^v zwischen den Isochronen mit Q zu.

Beträgt das Verhältnis der Kriechzeiten zwischen zwei benachbarten *Isochronen* $t_{i+1} / t_i = 10$, entspricht bis zur Kraft Q_{lin} der Abstand Δs^v gerade dem Kriechmaß k_s .

Wegen der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Bodens erhält man für unterschiedliche Eindrückgeschwindigkeiten \dot{s}_i der Säule unterschiedliche Widerstands-Setzungslinien (*Isotachen*) und unterschiedliche Grenzkraften Q_{gi} .

Eine höhere Geschwindigkeit bewirkt eine Verschiebung der Widerstands-Setzungslinie zu höheren Kräften bzw. ein steiferes Verhalten (siehe Bild 2), ein langsamerer Eindrücken hingegen einen geringeren Widerstand, d.h. ein weiches Verhalten.

Säulenbelastungen unter verschiedenen konstanten Eindrückgeschwindigkeiten ergeben damit eine Schar von *Isotachen* \dot{s}_i . Der horizontale Abstand der Isotachen bzw. der Sprung in der Säulenlast, der infolge einer Geschwindigkeitsänderung bei der Eindrückung einer Säule auftritt, kann nach Gleichung 2 berechnet werden.

$$\frac{Q_{i+1}}{Q_i} = \left(\frac{\dot{s}_{i+1}}{\dot{s}_i} \right)^{I_{v\alpha}} \quad \text{Gleichung 2}$$

Darin ist $I_{v\alpha}$ der durchschnittliche Zähigkeitsindex des Bodens.

Die wichtigste Gesetzmäßigkeit, die vom Boden auf das Säulenverhalten übertragen werden kann, ist die Unabhängigkeit des Zustands (Q, s, \dot{s}) von der vorangegangenen Belastungsgeschichte.

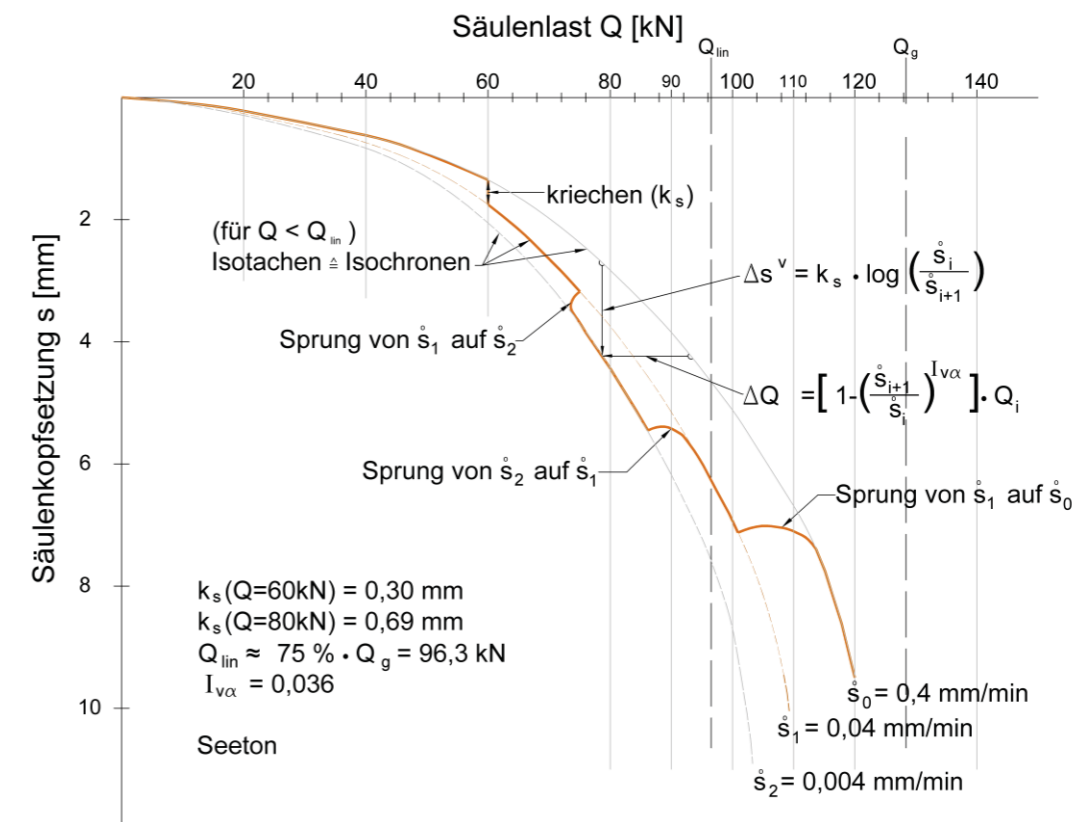


Bild 2 Qualitative Auswirkungen der Viskosität auf das Tragverhalten von CSV-Säulen

Unter monotoner Eindrückung $\dot{s} > 0$ ist es für das Säulenverhalten unerheblich, ob ein Punkt (Q, s) im Last-Setzungsdiagramm einfach durch Eindrücken der Säule unter $\dot{s} = const.$ oder zusätzlich durch eine beliebige Kombination von Geschwindigkeitssprüngen und Kriechphasen erreicht wurde. Wenn zwei der Zustände

feststehen, nämlich Q und s , dann ist die dritte Größe die Geschwindigkeit \dot{s} eindeutig festgelegt.

Eine Unterscheidung zwischen Kriechgeschwindigkeit und Eindrückgeschwindigkeit ist, sofern sich Porenwasserdrücke nicht ändern, nicht erforderlich.

Es gilt für alle Laststufen Q $\dot{s}_i^v = \dot{s}_i$ Gleichung 3

Eine Last-Setzungslinie eines vorschubgesteuerten Belastungsversuchs stellt somit zugleich eine Linie

- gleicher Eindrückgeschwindigkeit \dot{s}_i
- gleicher Kriechgeschwindigkeit \dot{s}_i^v
- gleicher Kriechzeit t_i für alle $Q < Q_{lin}$ dar.

Für die Schar der bis $Q = Q_{lin}$ zusammenfallenden Isotachen und Isochronen gilt untereinander der Zusammenhang:

$$\frac{t_i}{t_{i+1}} = \frac{\dot{s}_{i+1}^v}{\dot{s}_i^v} = \frac{\dot{s}_{i+1}}{\dot{s}_i} \quad \text{Gleichung 4}$$

womit in diesem Bereich der vertikale Abstand Δs^v zwischen zwei Isochronen statt nach Gleichung 1 aus dem Abstand der Isotachen nach Gleichung 5 berechnet werden kann.

$$\Delta s^v = k_s \log(\dot{s}_i / \dot{s}_{i+1}) \quad \text{Gleichung 5}$$

Bei Pfadunabhängigkeit ist es z.B. möglich, einen auf der Isotache \dot{s}_2 liegenden Punkt $A = (Q_A, s_A)$ auf drei verschiedenen Belastungspfaden zu erreichen (siehe Bild 3).

- a) nur durch konstanten Vorschub unter \dot{s}_2
- b) durch konstanten Vorschub unter \dot{s}_0 bis kurz vor A' und eine Geschwindigkeitsverringern auf \dot{s}_2
- c) durch konstanten Vorschub unter \dot{s}_1 bis Q_A und anschließendes Kriechen unter Q_A bis die Kriechgeschwindigkeit auf \dot{s}_2 abgenommen hat.

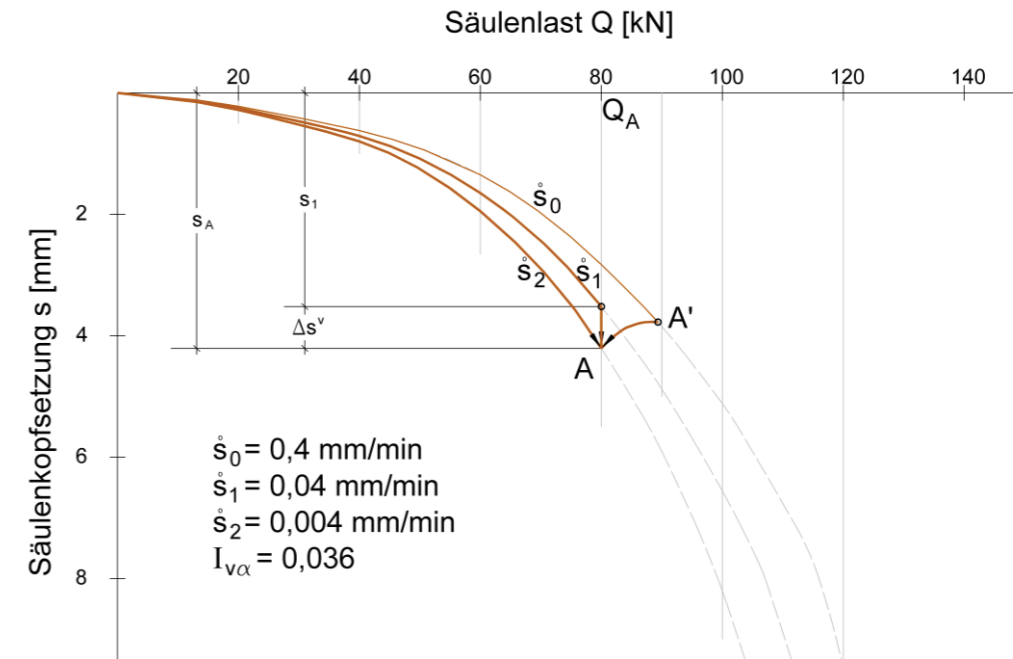


Bild 3 Pfadunabhängigkeit des Säulenverhaltens bei monotoner Stauchung

Gleichwertigkeit von vorschubgesteuerter und schrittweiser Probelastung

In Deutschland waren bisher schrittweise Probelastungen (ML-Versuche) die Regel. Vorschubgesteuerte Probelastungen weisen im Vergleich zu einer schrittweisen Belastung einige Vorteile auf. So ist u.a. auch die Dauer einer vorschubgesteuerten Abnahmeprüfung deutlich kürzer.

Da die Belastung im Unterschied zu kraftgesteuerten Belastungsversuchen bei weggesteuerten Versuchen kontinuierlicher aufgebracht wird, können erfahrungsgemäß prüftechnisch höhere Laststufen angefahren werden.

Bei nicht bewehrten Säulenköpfen entstehen bereits mit geringen ungewollten Exzentrizitäten Biegebeanspruchungen, die den Bruch der Säulenköpfe zur Folge haben können.

Ferner erhält man eine kontinuierliche Lastsetzungskurve und damit auch im Grenzkraftbereich genauere Informationen über das Tragverhalten.

Bei kraftgesteuerten Versuchen wird die Dauer einer Laststufe entweder fest vorgegeben oder von dem Erreichen eines Abbruchkriteriums in Form des Abklings der Setzungsgeschwindigkeit auf einen bestimmten Betrag abhängig gemacht.

In den Empfehlungen für statische axiale Probelastungen von Pfählen (DGGT, 1993) wird als Geschwindigkeitskriterium 0,1 mm in 5 Minuten festgelegt.

Dies entspricht einer Kriechgeschwindigkeit von $\bar{s} = 0,02 \text{ mm} / \text{min}$.

Für einen nach dieser Vorschrift durchgeführten Versuch ist in Bild 4 die Belastungskurve einer CSV-Säule schematisch aufgetragen.

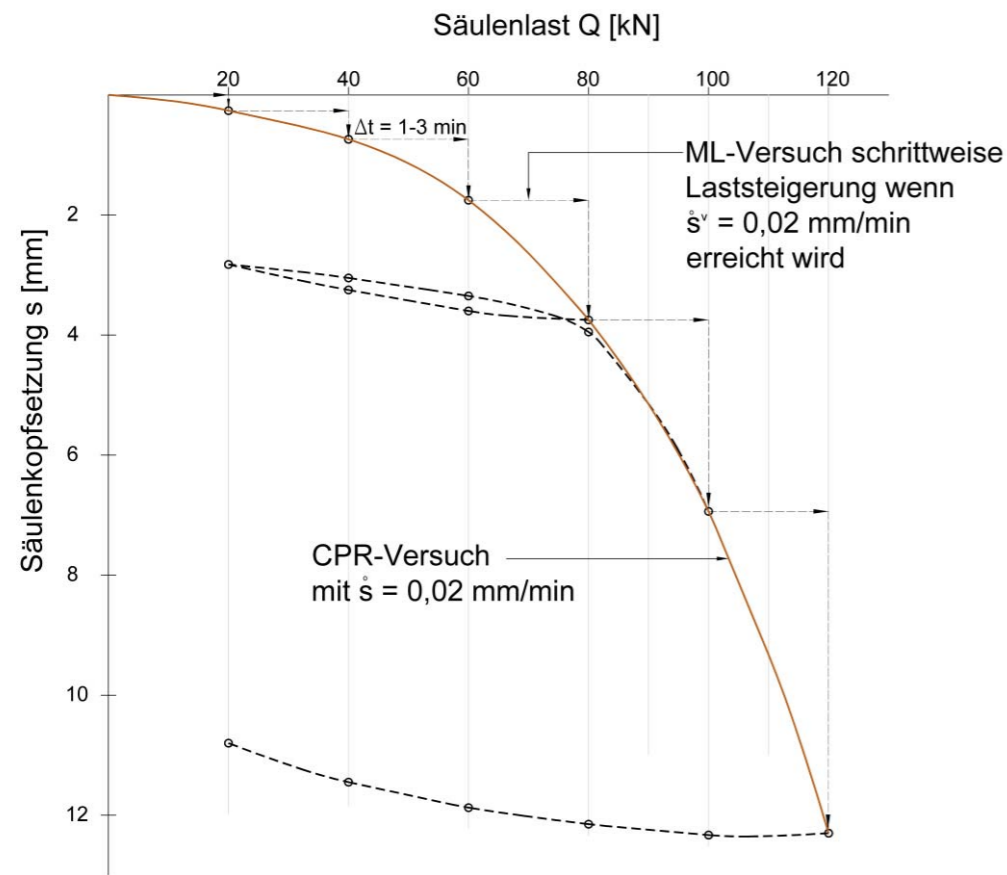


Bild 4 Belastungskurve (schematisch) einer kraftgesteuerten Säulenbelastung mit geschwindigkeitsabhängigem Abbruchkriterium und Verlauf einer gleichwertigen weggesteuerten Belastung mit $\dot{s} = 0,02 \text{ mm/min}$

Vorgehensweise für weggesteuerte Belastungsversuche

Die Gleichmäßigkeit der Vorschubgeschwindigkeit spielt für die Auswertung eine maßgebliche Rolle.

Daher sollte eine Versuchstechnik eingesetzt werden, mit der die um die Verformungen der Widerlagerkonstruktion korrigierte Vorschubgeschwindigkeit \dot{s} auf etwa $\pm 10\%$ von \dot{s} konstant gehalten werden kann.

Die kleinste der realisierbaren Vorschubgeschwindigkeiten am Stempel beträgt gerätetechnisch zur Zeit $0,04 \text{ mm/min}$.

Der Versuch startet mit einer vorgegebenen Eindrückgeschwindigkeit von $\dot{s}_1 = 0,4 \text{ mm/min}$ bis zum Erreichen einer Laststufe, in der das Kriechmaß ermittelt werden soll. Hierzu wird die Kriechlast so lange konstant gehalten, bis die Setzungsgeschwindigkeit um eine Zehnerpotenz auf $\dot{s}_2 = 0,04 \text{ mm/min}$ abgefallen ist.

Zur Ermittlung von $I_{v\alpha}$ wird nach Abschluss der Kriechphase mit weiterer Belastung ein Sprungversuch durchgeführt. Dafür wird die Geschwindigkeit von $\dot{s}_2 = 0,04 \text{ mm/min}$ um den Faktor 10 auf $\dot{s}_3 = 0,4 \text{ mm/min}$ erhöht und wieder auf den Ausgangswert von \dot{s}_2 reduziert.

Die Zeitdauer in der Geschwindigkeit von \dot{s}_2 wird so gewählt, dass sich im $Q-s$ Diagramm die neue Isotache von \dot{s}_2 , die ähnlich zur Isotache \dot{s}_1 verläuft, klar erkennen lässt.

Dann wird die Geschwindigkeit wieder auf $\dot{s}_1 = 0,4 \text{ mm/min}$ erhöht und der Versuch bis zu einer vorgegebenen Setzung zu Ende gefahren.

Aus dem horizontalen Abstand der Isotachen \dot{s}_1 und \dot{s}_2 kann der Zähigkeitsindex $I_{v\alpha}$ nach Gleichung 6 ermittelt werden.

$$I_{v\alpha} = \frac{\log(Q_2 / Q_1)}{\log(\dot{s}_2 / \dot{s}_1)} \quad \text{Gleichung 6}$$

Mit Kenntnis des Zähigkeitsindex $I_{v\alpha}$ kann jede weitere Isotache für eine vorgegebene Setzungsgeschwindigkeit zu einer versuchstechnisch ermittelten Isotache (z.B. \dot{s}_1) mit Gleichung 7 konstruiert werden.

$$Q_3 = Q_1 \left(\frac{\dot{s}_3}{\dot{s}_1} \right)^{I_{v\alpha}} \quad \text{Gleichung 7}$$

Grundsätzlich besteht aus Kostengründen das Bestreben, eine Probelastung mit einer möglichst hohen Geschwindigkeit durchzuführen. Da die viskosen Auswirkungen einer Geschwindigkeitsveränderung berücksichtigt werden können, wird die maximal mögliche Belastungsgeschwindigkeit nur durch die mögliche Entstehung von Porenwasserüberdrücken im Baugrund beschränkt, da diese das Tragverhalten verfälschen können.

Wollte man die viskosen Eigenschaften bis zur letzten Konsequenz ausnutzen, so könnte man zur weiteren Verkürzung der Versuchsdauer die Kriechphase wegfällen lassen.

Denn k_s kann auch für jede Last $Q < Q_{lim}$ aus dem vertikalen Abstand der mit $I_{v\alpha}$ konstruierten Isotachen nach Gleichung 8 berechnet werden.

$$k_s = \frac{\Delta s^v}{\log(\dot{s}_i / \dot{s}_{i+1})} \quad \text{Gleichung 8}$$

Unterscheiden sich die Isotachen genau um eine Zehnerpotenz, entspricht der vertikale Abstand dem Kriechmaß k_s in der zugehörigen Laststufe.

Anmerkung: Nach den Erfahrungen von zahlreichen Abnahmeprüfungen bei Trockenmörtelsäulen reduziert sich die Setzungsgeschwindigkeit innerhalb von wenigen Minuten um eine Zehnerpotenz.

Abschätzung des Langzeitverhaltens einer Einzelsäule

Neue Konstruktionen werden häufig auf eine Standzeit von 50 bis 100 Jahren ausgelegt.

In diesem Zeitraum finden Kriechsetzungen statt, die je nach Boden und Auslastung bei konstanter Last etwa 50% bis 100% der Setzungen s_0 aus einer Probelastung mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $\dot{s}_0 = 0,02 \text{ mm/min}$ betragen können.

Mit dem in Bild 6 dargestellten Kriechsetzungsverlauf lässt sich erkennen, dass etwa 2/3 der Kriechsetzungen bereits innerhalb des ersten Jahres zu erwarten sind.

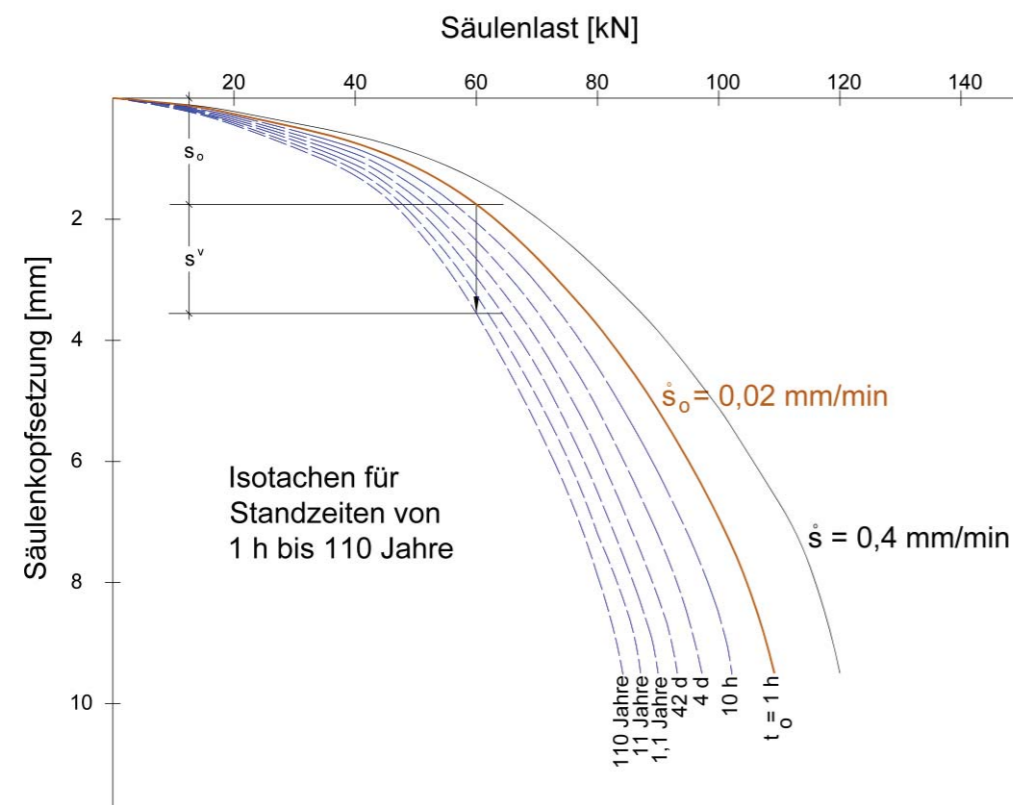


Bild 5 Lastsetzungsverlauf für Standzeiten bis zu 110 Jahren

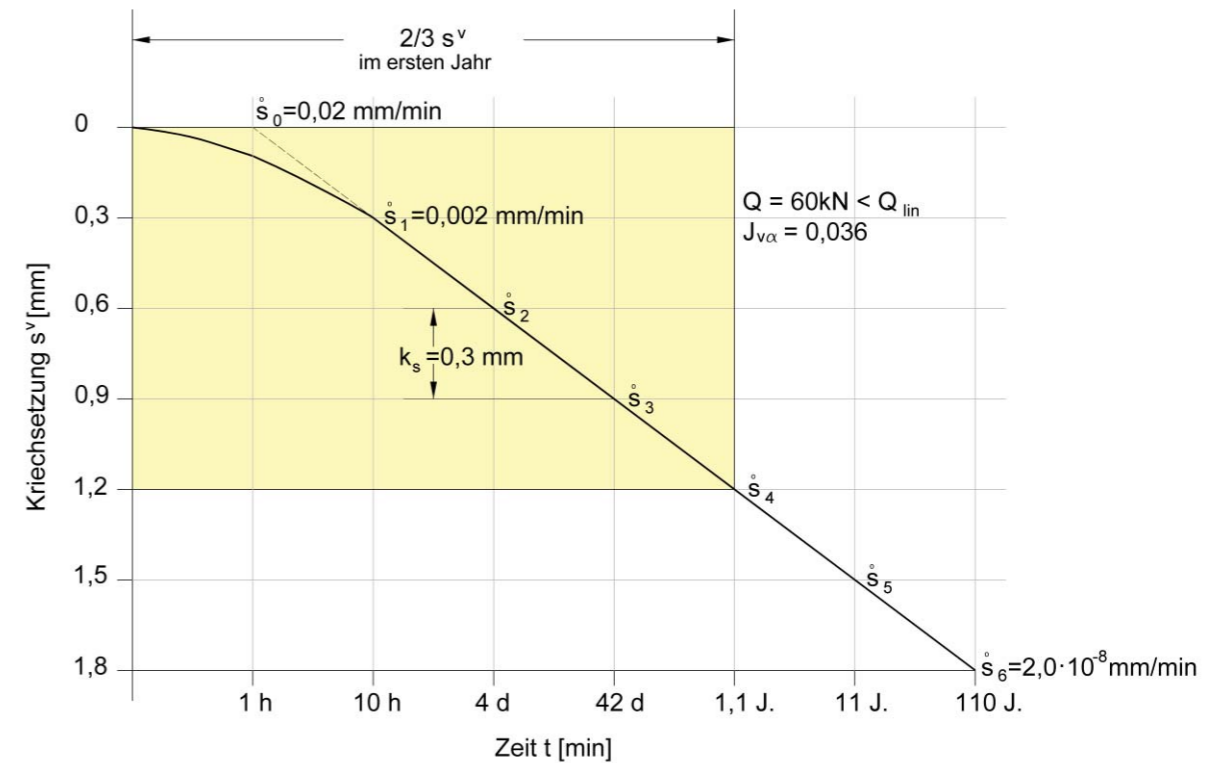


Bild 6 Beispiel für einen Kriechsetzungsverlauf nach vorschubgesteuerter Belastung mit $\dot{s}_0 = 0,02 \text{ mm/min}$

Zusammenfassung

Weggesteuerte Abnahmeprüfungen benötigen einen deutlich geringeren Zeitaufwand.

Es kann gezeigt werden, dass kraftgesteuerte Abnahmeprüfungen im wesentlichen vorschubgesteuerten Abnahmeprüfungen entsprechen, die mit einer Geschwindigkeit von $\dot{s}_0 = 0,02 \text{ mm/min}$ als Abbruchkriterium für die Steigerung in die nächste Laststufe gefahren werden. Damit besteht ein effizientes Prüfverfahren, in dem in kürzeren Prüfzeiten ein höherer Informationsgehalt erhalten werden kann.

Aus den Versuchsergebnissen kann die Lastsetzungskurve einer statischen Säulenbelastung abgeleitet werden, so dass die Prüfergebnisse der weggesteuerten Prüfung mit den Ergebnissen von kraftgesteuerten Abnahmeprüfungen unmittelbar verglichen werden können.

Beispiel von Abnahmeprüfungen



Bild 7 Ausführungsbeispiel - Baufeld nach Herstellung der Stabilisierungssäulen im Raster von 1,20 m x 1,20 m unter der Bodenplatte (abgewalzt)

Im Regelfall wird als Widerlager für die Einzelprüfung ein Hydraulikbagger mit einem Gesamtgewicht von 28 t verwendet. Der mittlere Kettenabstand beträgt ca. 2,4 m. Dieser Abstand hat erfahrungsgemäß keinen Einfluss auf die Prüfergebnisse.



Bild 8 Versuchsaufbau mit Standardwiderlager für den in Bild 9 dargestellten Belastungsversuch (Kettenabstand zur Probesäule \approx 1,2 m)

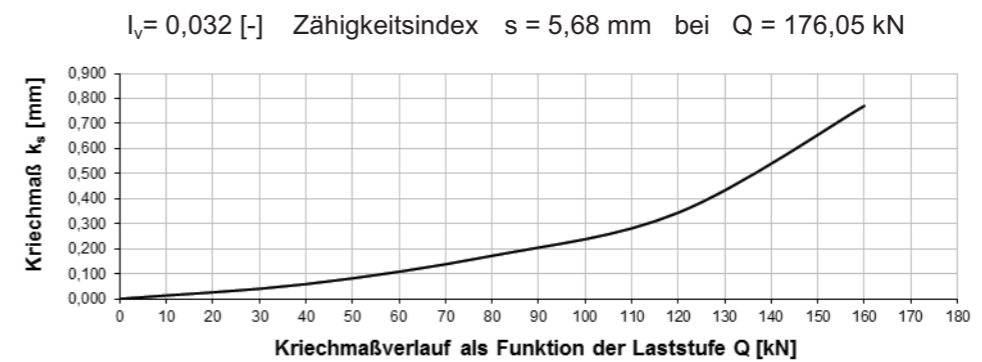
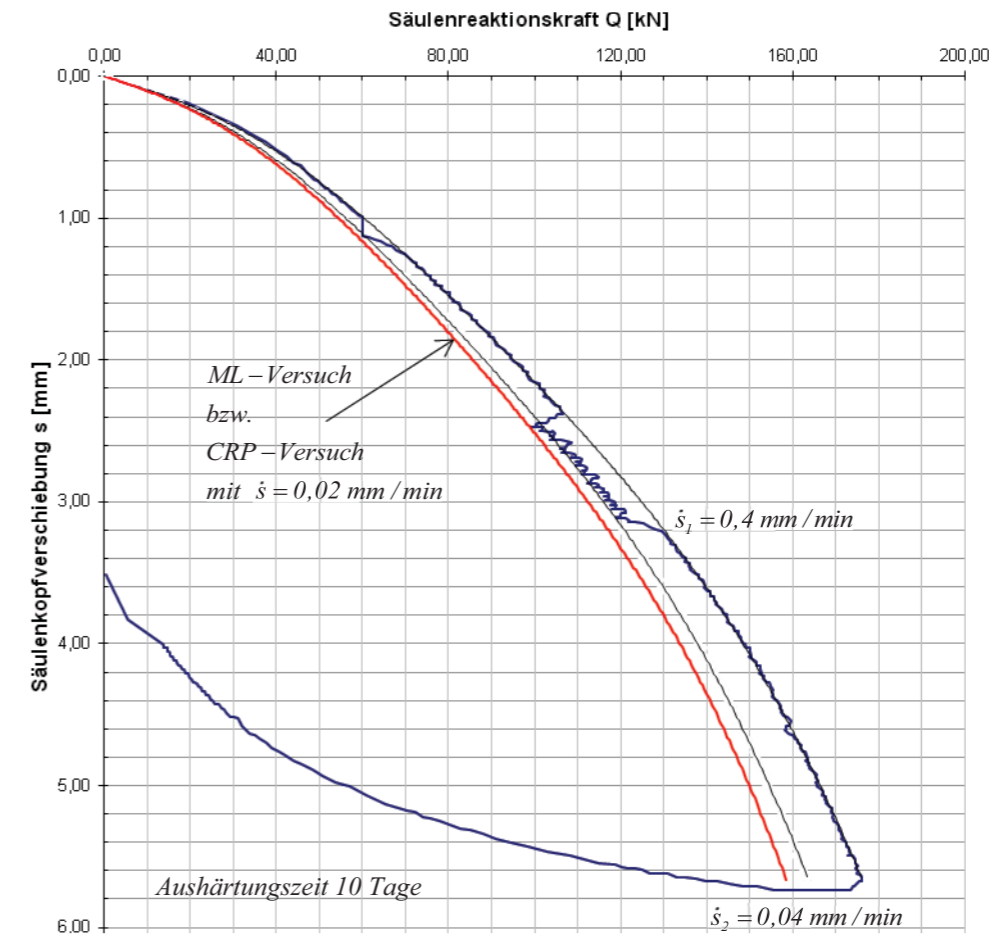
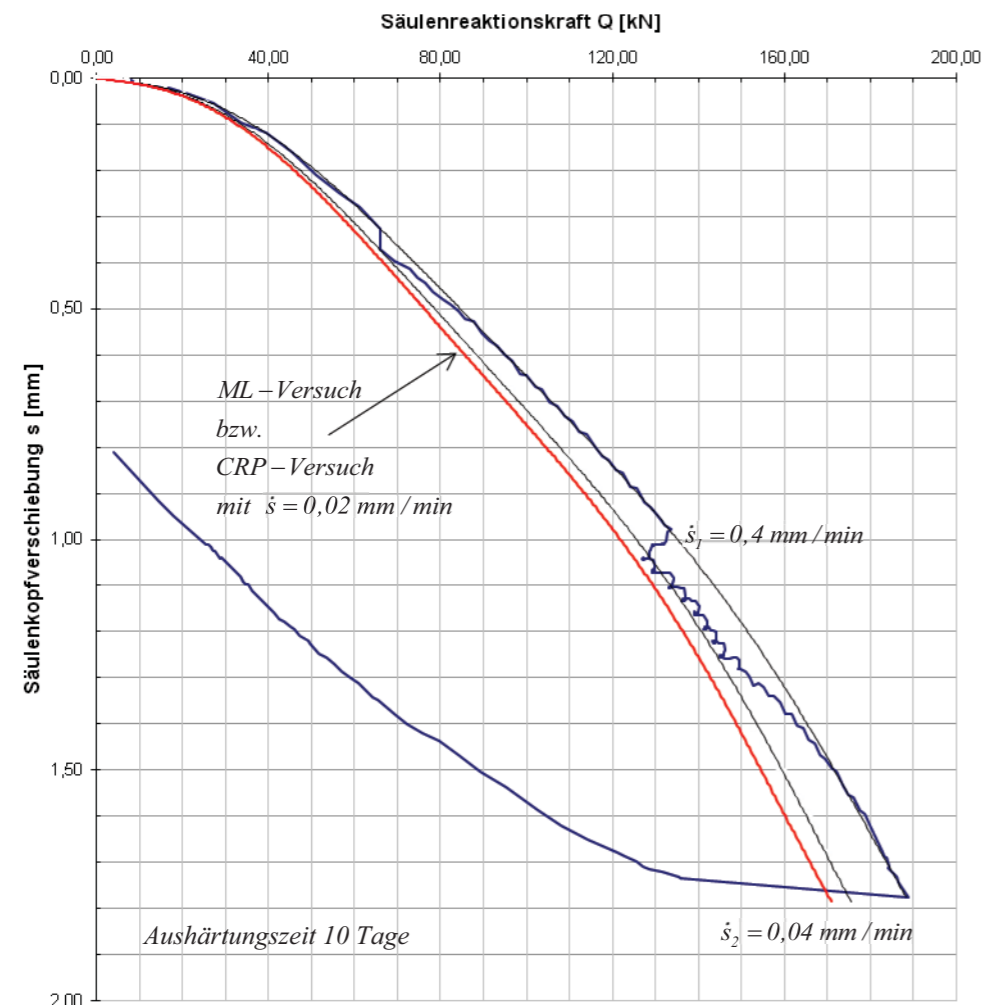


Bild 9 Versuchskurve einer weggesteuerten Abnahmeprüfung mit Eintragung des Lastsetzungsverlaufs bei kraftgesteuerter Prüfung (zum Vergleich) Widerlager: Hydraulikbagger 28 t

In Bild 10 sind die Prüfergebnisse und in Bild 11 die Belastungseinrichtung für eine auf fünf Meter Abstand positionierte Totlast dargestellt.



$I_v = 0,032 [-]$ Zähigkeitsindex $s = 1,78 \text{ mm}$ bei $Q = 188,85 \text{ kN}$

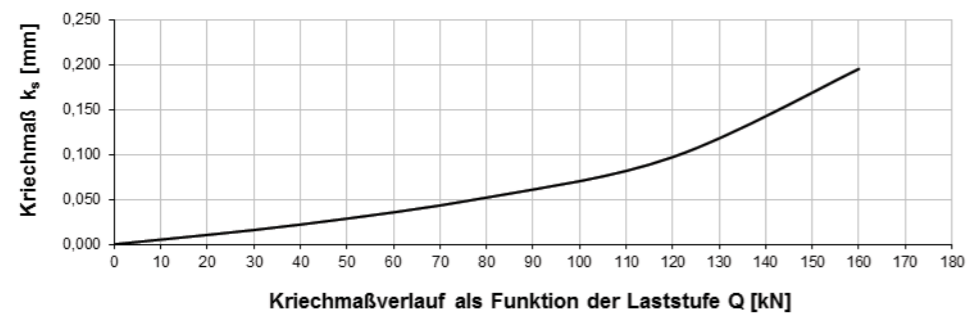


Bild 10 Versuchskurve einer weggesteuerten Abnahmeprüfung mit Eintragung des Lastsetzungsverlaufs bei kraftgesteuerter Prüfung (zum Vergleich) Widerlager: Zwei Hydraulikbagger mit Stahlträger nach Bild 11



Bild 11 Versuchsaufbau für den in Bild 10 dargestellten Belastungsversuch. (vergrößerter Abstand der Totlast auf ca. 2,5 m zur Probesäule)

In unmittelbarer Nachbarschaft zu den weggesteuerten Probelastungen wurde eine weitere CSV-Säule nach einer Aushärtungszeit von 10 Tagen kraftgesteuert geprüft.

Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Last	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	11'	12'	13'	14'	15'
10	0,13	0,13	0,13												
20	0,22	0,22	0,22												
40	0,39	0,40	0,40	0,40											
60	0,61	0,62	0,63	0,63											
80	0,82	0,83	0,84	0,85	0,85										
100	1,00	1,01	1,02	1,03	1,03	1,04	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,06			
120	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,26	1,27	1,27	1,28	1,29	1,29	1,30			
140	1,43	1,48	1,50	1,51	1,52	1,53	1,54	1,55	1,55	1,56	1,56	1,57	1,57	1,57	1,58
160	1,75	1,76	1,77	1,78	1,80	1,81	1,82	1,83	1,84	1,84	1,85	1,85	1,86	1,86	1,87
180	2,07	2,10	2,11	2,13	2,14	2,16	2,17	2,18	2,18	2,19	2,20	2,20	2,21	2,21	2,22
150	2,14														
140	2,09														
120	2,00														
100	1,89														
80	1,74														
60	1,57														
40	1,35														
20	1,10														
10	0,96														
5	0,84														

Tabelle 1 Säulenkopfverformungen [mm] in der Laststufe [kN], abgelesen nach 1 bis 15 Minuten Lasteinwirkungszeit (kraftgesteuerte Versuchsdurchführung)

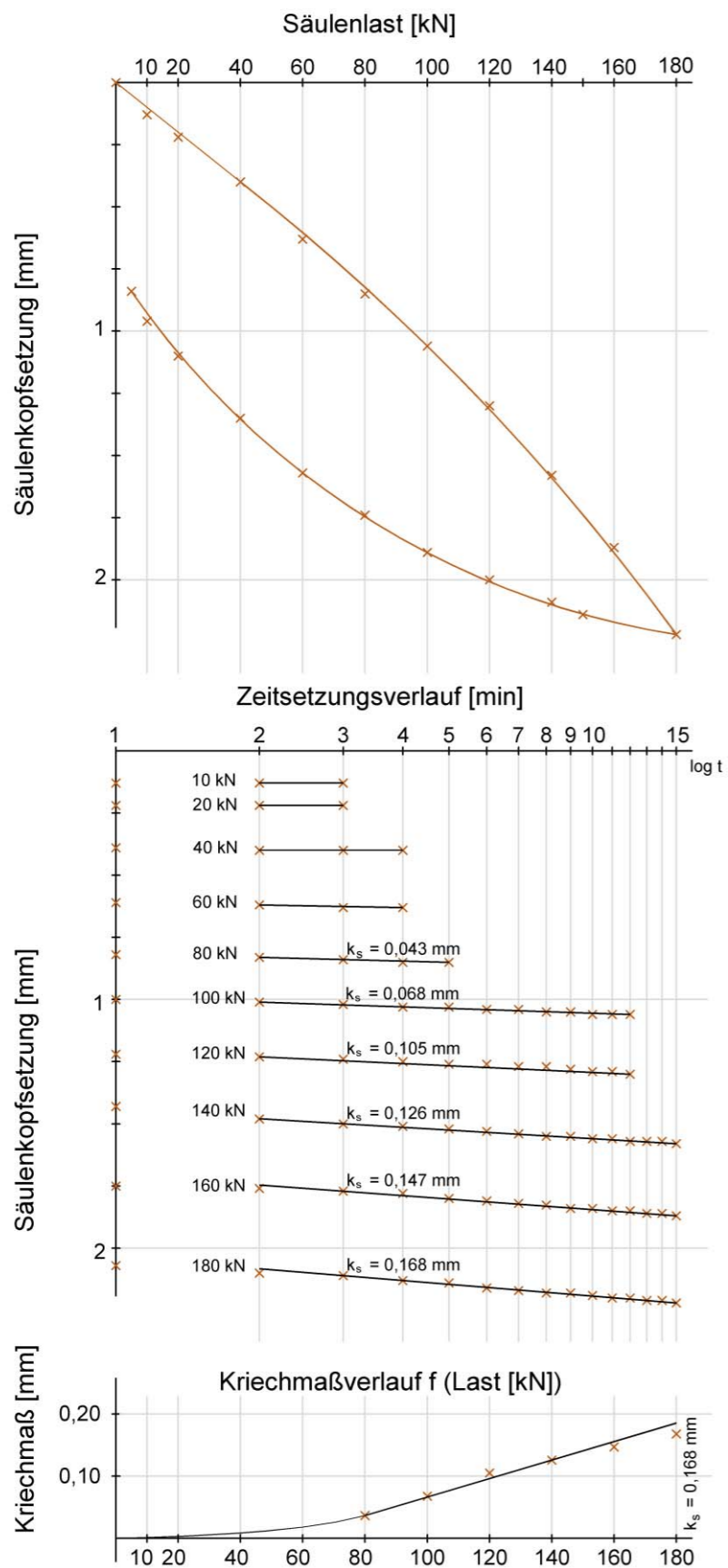


Bild 12 Lastsetzungskurve, Zeitsetzungskurven und Kriechmaßverlauf

In Bild 12 ist der Lastsetzungsverlauf mit Ermittlung der Kriechmaße k_s über den Zeitsetzungsverlauf in jeder Laststufe dargestellt.

Näherungsweise könnte das Kriechmaß durch Abschätzung von unterschiedlichen Setzungsgeschwindigkeiten in einer Laststufe und der zugehörigen Säulenkopfverformung nach Gleichung 8 ermittelt werden.

z.B. liegt (siehe Tabelle) in der Laststufe von 180 kN die Setzungsgeschwindigkeit zwischen einer und zwei Minuten Beobachtungszeit bei $s \approx 0,03$ mm / min.

Zwischen sechs und sieben Minuten Beobachtungszeit hat sich die Setzungsgeschwindigkeit auf $s \approx 0,01$ mm / min reduziert.

Die zugehörigen Säulenkopfverschiebungen sind $\Delta s^v = 2,085$ mm bzw. 2,165 mm.

Damit folgt nach Gleichung 8 für das Kriechmaß:

$$k_s = \frac{\Delta s^v}{\log(\dot{s}_i / \dot{s}_{i+1})} = \frac{2,165 - 2,085}{\log(0,03 / 0,01)} = 0,167 \text{ mm} \approx 0,168 \text{ mm}$$

In Bild 13 sind die aus 150 Abnahmeprüfungen ermittelten Versuchsergebnisse in Abhängigkeit der Säulenlänge für eine Laststufe, die dem Kriechmaß von $k_s = 0,2$ mm bzw. $k_s = 0,5$ mm und einer Aushärtungszeit von $t = 7$ bis 14 Tagen entspricht, aufgetragen. Mit eingetragen ist die zugehörige lineare Trendlinie.

Nach längeren Aushärtezeiten des Trockenmörtels (> 28 Tagen) werden, wie aus Pfahlprüfungen bekannt, auch bei Stabilisierungssäulen prüftechnisch deutlich höhere Säulenwiderstände und geringere Säulenkopfverformungen bestätigt.

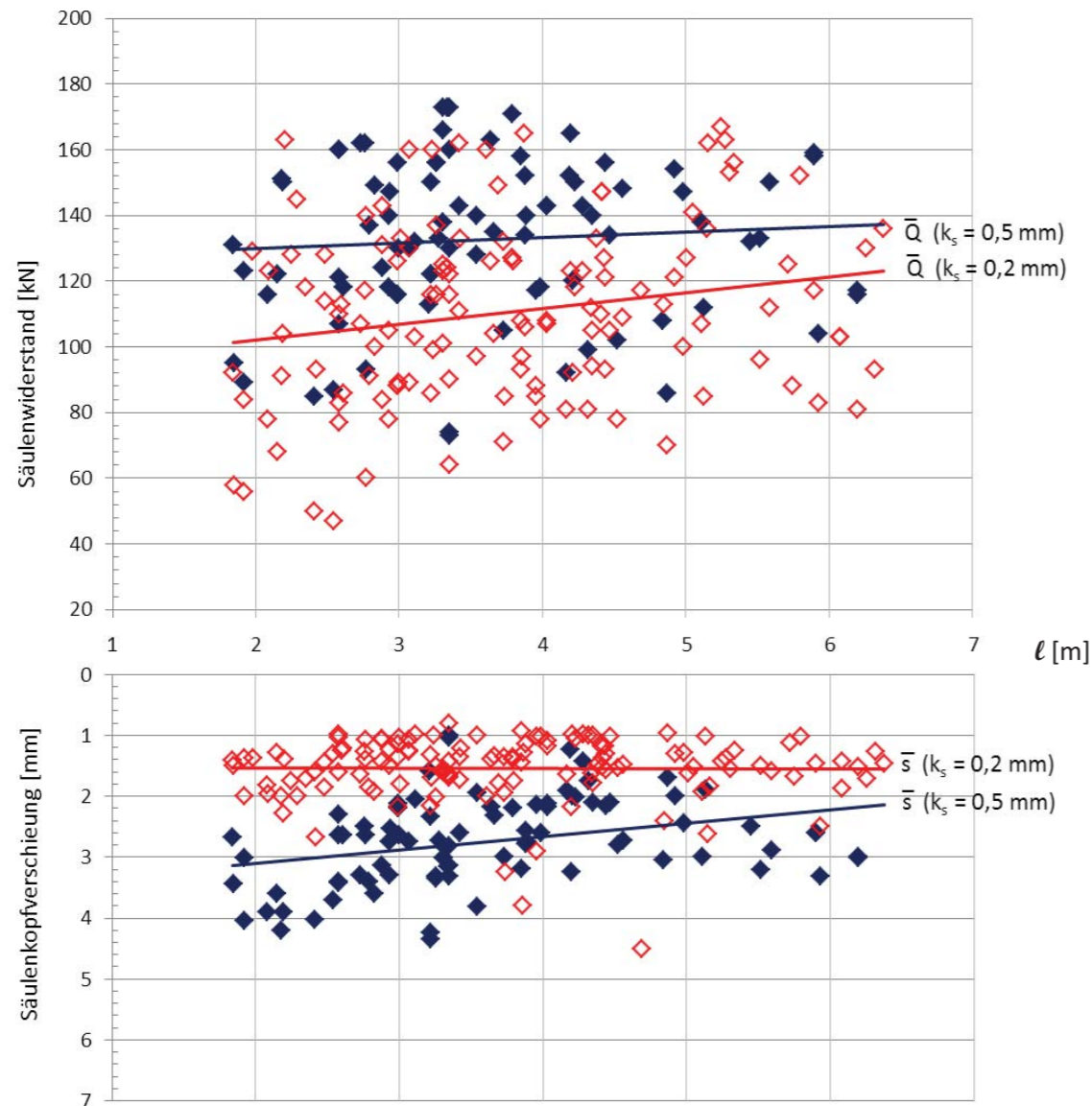


Bild 13 Streubereich von Säulenwiderständen, ausgewertet für eine Belastungsstufe, die dem Kriechmaß von $k_s = 0,2$ mm bzw. $k_s = 0,5$ mm (Grenzbereich von schwimmenden- und aufstehenden Stabilisierungssäulen nach Merkblatt der DGGT) entspricht, nach einer Aushärtungszeit des Trockenmörtels von 7 bis 14 Tagen.

Literatur

- [1] Krieg, S; Goldscheider, M (1998): Bodenviskosität und ihr Einfluss auf das Tragverhalten von Pfählen, Bautechnik 75, Heft 10, Seite 806 bis 820
- [2] DGE (1993): Arbeitskreis 5, Statische axiale Probelastungen von Pfählen. Geotechnik 16 H.3 Seite 124 - 136
- [3] Merkblatt für die Herstellung, Bemessung und Qualitätssicherung von Stabilisierungssäulen zur Untergrundverbesserung Teil I – CSV-Verfahren DGGT (2002).
- [4] Laumer, R.; Führer, A. (2010): Bodenstabilisierung nach dem CSV-Verfahren, Bautechnik 87 Heft 12
- [5] Reitmeier, W. et al.(2004): Baugrundverbesserung – Wirkungsweise, Unterschiede, Qualitätssicherungsaspekte mit ausgewählten Beispielen aus Baden-Württemberg, Vorträge des 4.Kolloquiums Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen
- [6] Reitmeier, W.; Alber, D. (2000): Wirkungsweise, Einsatzmöglichkeiten und praktische Erfahrungen bei der Untergrundverbesserung nach dem CSV-Verfahren, Technische Akademie Esslingen, Vorträge des 2. Kolloquiums – Bauen in Boden und Fels
- [7] El-Mossallamy, Y.(2001): Stabilization of Soil with Displacement Columns of Dry Sand-Cement/Lime Mix, Construction Methods, Physical Behavior and Numerical Modelling, XVth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 27-31 August, Istanbul
- [8] Maisch, K. (2000): Bodenstabilisierung durch Einpressen von Trockengranulaten, Dissertation IBF Universität Karlsruhe, Heft 149



FERTIGTEILE

Stahlbeton-Fertigteile für Industrie, Gewerbe, Landwirtschaft und Sportanlagen



GARAGENBAU

Über 60 variable Größen von Einzel-, Reihen-, Tief-, mehrstöckigen Garagen, Doppel-Parkern und Carports



RAUMMODULBAU

für den Wohn- und Gewerbebau



HOLZBAU

Nagelplattenbinder und Wandelemente aus einheimischem Bauholz. RAL geprüft. Bauen für die Landwirtschaft



KOMPLETTBAU

Schlüssel- und teilschlüsselfertige Erstellung von Hallen und Bürogebäuden aller Art



BAUWERKSVERSTÄRKUNG

Spezial-Sanierungs- und Verstärkungsverfahren für Mauerwerk, Gewölbe, Beton, Stahlbeton und Holzkonstruktionen



CSV

Bodenstabilisierung nach dem CSV-Verfahren. Stabilisierung von Baugrund, Sicherung von Böschungen, Setzungssicherung



INGENIEURBÜRO

Gesamtplanung vom Entwurf bis zur Ausführung, Statik, Eingabeplanung

Laumer GmbH & Co.
CSV Bodenstabilisierung KG

Bahnhofstraße 8
84323 Massing
Tel.: 08724/88-900
Fax: 08724/88-770

