

Technischer Bericht: **Ausführen und Interpretieren von Setzungsberechnungen**

von

Prof. Dr.-Ing. Otfried Beilke und Dipl.-Ing. Uwe Scheunemann

1 Einleitung

Für verschiedene geotechnische Fragestellungen ist die Ausführung und detaillierte Interpretation von Setzungsberechnungen erforderlich. Dies gilt insbesondere für Mehrfeldbrücken oder auch Klappbrücken, da für die Bemessung neben den Gesamtsetzungen auch die Abfolge der auftretenden Setzungen bekannt sein muss.

Im Folgenden werden die wesentlichen Grundlagen für die Durchführung von Setzungsberechnungen dargestellt.

Es wird in diesem Zusammenhang (absichtlich) auch auf Regelungen älterer Normen eingegangen, soweit dies zum besseren Verständnis beiträgt.

2 Zum Steifemodul

Die Größe des Steifemoduls wird in der Regel auf der Basis von Erfahrungswerten und beschreibenden Laborversuchen (Korngrößenverteilungen, Wassergehalte und Konsistenzgrenzen oder auch Drucksondierungen) geschätzt. Teilweise erfolgt auch eine direkte Bestimmung des Steifemoduls mit Laborversuchen (Kompressionsversuchen). In der Regel ist die Datenbasis jedoch nicht groß genug, um eine alleinige Festlegung anhand von Kompressionsversuchen zu ermöglichen. Es ist meistens ein Abgleich mit Erfahrungswerten notwendig. In diesem Sinne sind die angegebenen Steifemodulen regelmäßig als Erfahrungswerte zu bezeichnen.

Die Größe des Steifemoduls ist neben der Art und Beschaffenheit des Bodens auch von dem jeweiligen Spannungszustand und der Spannungszunahme infolge der eingeleiteten Bauwerksspannungen abhängig. Dies führt dazu, dass der Steifemodul lediglich in einer Bandbreite angegeben werden kann.

Grundsätzlich ist es natürlich anzustreben, Setzungsmessungen auszuwerten und aus gemessenen Setzungen E_s -Werte zurückzurechnen sowie die einzelnen Anteile (Sofort-, Primär- und Sekundärsetzungen sowie die Anteile aus ständigen und Verkehrslasten) zu ermitteln.

3 Zur Setzungsberechnung

Die Durchführung von Setzungsberechnungen erfolgt nach DIN 4019. In der Praxis wird eine Setzungsberechnung häufig unter Berücksichtigung der lotrechten Spannungen durchgeführt. In diesem Fall wird unter Anwendung der Berechnungsmethoden von BOUSSINESQ, KANY, STEINBRENNER u. a. zunächst die Spannungserhöhung $\Delta\sigma_z$ berechnet. In einem zweiten Schritt wird dann lamellenweise die Setzung s_i berechnet. Über eine Summenbildung ergibt sich die rechnerische Setzung (Konsolidationssetzungen) $s_{cal} = \sum s_i$. Hierzu werden beispielsweise Programme wie DC-Setzung oder GGU-Settle verwendet.

Theoretisch wäre eine unmittelbare Verwendung der Drucksetzungslinie, ermittelt in einem Kompressionsversuch, möglich. Tatsächlich wird in der Praxis jedoch mit einem unveränderlichen mittleren Steifemodul E_s gerechnet. Bei der Festlegung von E_s ist die Spannungsabhängigkeit, d.h. der jeweilige Spannungsbereich, zu berücksichtigen.

4 Zum Korrekturfaktor κ (kappa)

Bei der Verwendung von Drucksetzungslinien bzw. Steifemoduln E_s aus Kompressionsversuchen als Grundlage von Setzungsberechnungen ergeben sich erfahrungsgemäß immer größere Setzungen als die in der Bauausführung gemessenen Setzungen.

Die Abweichungen zwischen den mit E_s (aus Kompressionsversuchen ermittelt) berechneten Setzungen und den tatsächlich auftretenden Setzungen können erfahrungsgemäß bis zu 50 % betragen. Die Ungenauigkeiten resultieren aus der Entnahme, dem Transport, der Lagerung der Proben sowie der Probenvorbereitung und der Versuchsdurchführung. Die größten Abweichungen ergeben sich dabei bei überkonsolidierten (eiszeitlich vorbelasteten) Böden (s. a. EVB, 1993)

Zur Erfassung dieser Erfahrungen lässt die DIN 4019 (1976-04) eine Korrektur der berechneten Setzungen mit dem Korrekturfaktor κ zu (Tabelle 1).

Tabelle 1 Korrekturbeiwerte κ (aus DIN 4019: 1979-04)

Bodenart	κ
Sand und Schluff	2/3
Einfach verdichteter Ton und leicht überverdichteter Ton	1
stark überverdichteter Ton	0,5 bis 1

Bei der Anwendung des Korrekturfaktors ist zu berücksichtigen, dass hiermit eine Korrektur der berechneten Setzungen erfolgen kann, sofern als Grundlage zur Festlegung von E_s Kompressionsversuche verwendet werden. Da in der Praxis in der Regel eine Festlegung von E_s auf der Basis von Erfahrungswerten erfolgt, sollte κ nur nach genauer Prüfung der Randbedingungen angewendet werden.

Anmerkung: In einem ersten Schritt sollte κ zu 1,0 gesetzt werden.

Die DIN 4019 (1979-04) gibt an, dass mit κ auch die Anteile aus Sofortsetzungen berücksichtigt werden sollen. Hier ergibt sich jedoch ein Widerspruch, da insbesondere in stark überverdichteten Tonen nur mit geringen Sofortsetzungen zu rechnen ist.

In der aktuellen Fassung der DIN 4019 (2015-05) ist der Korrekturfaktor nicht mehr enthalten.

5 Zur zeitlichen Abfolge von Setzungen

Bei der Beschreibung von Setzungen bzw. bei der Beschreibung des Setzungsverhaltens von Bauwerken sind drei Setzungsanteile zu berücksichtigen

- Sofortsetzungen,
- Primärsetzungen (Konsolidierungssetzungen) und
- Sekundärsetzungen.

Die Sofortsetzungen betragen in der Regel 10 bis 20% (teilweise auch bis zu 30%) der Gesamtsetzungen und treten durch das Entweichen von Gasen und Luft auf. Die Sekundärsetzungen betragen in der Regel 10 bis 20% der Gesamtsetzungen und ergeben sich aus spannungsunabhängigen Kornumlagerungen (Kriechen u.a.).

In bindigen Böden treten die Primärsetzungen zeitlich verzögert ein (Konsolidierung). In nichtbindigen Böden (Sande und Kiese) ergeben sich die Setzungen verhältnismäßig schnell und sind in den meisten Fällen bereits nach Fertigstellung des Rohbaus abgeschlossen. Für ein Brückenbauwerk heißt das, dass die Setzungsvorgänge aus Sanden und Kiesen nach Fertigstellung der Widerlager, Pfeiler und des Überbaus (weitestgehend) abgeschlossen sind. Auch in gemischtkörnigen Böden, wie beispielsweise Geschiebemergel, sind Setzungen sehr schnell zu erwarten. Grundsätzlich hängt der zeitliche Verlauf von der Zusammensetzung der Geschiebeböden (u.a. Sandlagen) ab. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich beispielsweise für eine 4 m mächtige Schicht bei beidseitiger Entwässerung nur eine Konsolidierungszeit < 6 Monate ergibt. In vielen Fällen kann somit auch für Geschiebeböden davon ausgegangen werden, dass die Setzungen weitestgehend bereits während der Bauzeit abgeklungen sind.

Gegebenenfalls kann es bei kurzen Bauzeiten auch bei Setzungen aus Geschiebeböden erforderlich werden, die Bauzustände zu berücksichtigen, beispielsweise:

- den Bau der Fundamente oder Widerlager,
- der Liegezeit,
- dem Herstellen des Überbaus,
- der Liegezeit und
- der Inbetriebnahme.

6 Setzungen infolge von Verkehrslasten

Verkehrslasten wirken in vielen Fällen nur relativ kurz auf den Baugrund ein. Dies hat zur Folge, dass die Einwirkzeiten in bindigen Böden (Tone) nur eine geringe Konsolidierung hervorrufen. In der Praxis wird dementsprechend für bindige Böden häufig nur ein Anteil von 30 bis 50% der Verkehrslasten als setzungswirksam angesetzt.

Anmerkung: Im EC 7 wird unter 6.6.2 A (17) angegeben, dass bei bindigen Böden die veränderlichen Einwirkungen vernachlässigt werden dürfen, sofern die Einwirkzeiten keinen wesentlichen Einfluss auf den Abbau von Porenwasserüberdrücken haben. Dies würde in bindigen Böden bedeuten, dass 0% der veränderlichen Einwirkungen setzungswirksam wären. In diesem Fall müssten aber zumindest die anteiligen Sofortsetzungen berücksichtigt werden, d.h. Ansatz von 10 bis 30% der Verkehrslast. Erfahrungsgemäß sollte in bindigen Böden von 50% setzungswirksame

Verkehrslast ausgegangen werden. Grundsätzlich ist bei Beckentonen oder ähnlichen Tone auch ein Ansatz von ca. 30% denkbar.

In nichtbindigen Böden (Sande und Kiese) ist zu erwarten, dass Verkehrslasten vollständig setzungswirksam sind, d.h. die Verkehrslasten werden zu 100% angesetzt.

Für gemischtkörnige Böden ist eine derartige Einschätzung relativ schwierig. Auf der sicheren Seite liegend sollte davon ausgegangen werden, dass die Verkehrslasten zu 100 % setzungswirksam sind. Im jeweiligen Einzelfall kann insbesondere bei gemischtkörnigen Böden ein geringerer Anteil der Verkehrslasten setzungswirksam sein, insbesondere bei hohen Tonanteilen oder großer Schichtmächtigkeit.

Bei der Berücksichtigung der Verkehrslasten für einen SLS-Nachweis (SLS = Serviceability Limit State) ist ein zutreffender Ansatz der „zutreffenden“ Verkehrslast anzustreben. Dies soll anhand von 2 Beispielen erläutert werden.

Im Straßenbau wurde für erdstatische Nachweise für den Verkehrslastanteil häufig eine Brückenersatzlast von $33,3 \text{ kN/m}^2$ (SLW 60) angenommen. Sofern als LKW-Belastung ein 40 to LKW angesetzt wird, ergibt sich bei einer geschätzten Länge von 12 bis 16 m und einer geschätzten Breite von 2,5 m lediglich eine Flächenbelastung von 10 bis $13,5 \text{ kN/m}^2$. Dieser Wert entspricht in etwa dem Flächenlastanteil im Lastmodell 1 von 12 kN/m^2 (Breite 3 m) nach EC 1. Somit erscheint bei Straßenlasten für erdstatische Nachweise der Ansatz von ca. 15 kN/m^2 ausreichend. Im Eisenbahnbau wird bei erdstatischen Nachweisen für einen Zug in der Regel eine Ersatzlast von 52 kN/m^2 auf 3 m Breite angesetzt. Nimmt man beispielsweise eine 6-achsige Lokomotive der Baureihe 185 als Belastung an, ergibt sich eine Gesamtlast von 135 to. Bei einer Länge von 16,9 m und einer Breite von 3 m beträgt die Flächenlast dann rechnerisch $26,6 \text{ kN/m}^2$. Für Nachweise der Gebrauchstauglichkeit (Setzungsberechnungen) beispielsweise bei Dammbauwerken erscheint eine Reduzierung der anzusetzenden Ersatzlasten auf ca. 50 %, d.h. 26 kN/m^2 auf einer Breite von 3 m vertretbar.

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass ein Lastansatz für Setzungsberechnungen von 15 kN/m^2 bei Straßenverkehrslasten oder 26 kN/m^2 bei Eisenbahnlasten mit den zuständigen Fachdiensten abzustimmen ist.

Sofern die Setzungen von Brücken (Widerlager und Stützen) ermittelt werden sollen, ist eine realistische Einschätzung der zutreffenden Verkehrslasten erforderlich, d.h. die Grö-

ße der Verkehrslast kann nicht aus den vereinfachten Lastmodellen zur Berechnung der Brückenüberbauten entnommen werden.

7 Wahrscheinliche und mögliche Setzungen

Bei der Festlegung von Steifemoduln nach den üblichen Methoden (abgesicherte Erfahrungswerte) sollten Werte angegeben werden, die eine Berechnung der zu erwartenden Setzungen ermöglicht.

Im Eurocode wird an verschiedenen Stellen in unterschiedlicher Weise auf Setzungen eingegangen. Dabei werden die Begriffe absehbare, wahrscheinliche und mögliche Setzungen verwendet (siehe EC 1, EC 2, EC 3, EC 4). Grundsätzlich erscheint es sinnvoll, nur zwischen wahrscheinlichen und möglichen Setzungen zu unterscheiden. Wobei die wahrscheinlichen Setzungen für Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (GZG) und die möglichen Setzungen für Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZT) anzuwenden sind.

Im Sinne des Eurocodes können die zu erwartenden Setzungen auch als wahrscheinliche Setzungen angesehen werden. Sofern die E_s -Werte in einer Bandbreite angegeben werden, sollten zur Berechnung der wahrscheinlichen Setzungen die Mittelwerte verwendet werden, beispielsweise $E_s = 30$ bis 50 MN/m^2 mit $E_{s,m} = 40 \text{ MN/m}^2$ zur Berechnung der wahrscheinlichen Setzungen. Die möglichen Setzungen würden sich dann bei der Verwendung der unteren E_s -Werte ($E_{s,u}$) ergeben. Eine Anwendung von κ sollte nicht erfolgen. Häufig sind die möglichen Setzungen rechnerisch etwa 20 bis 25 % größer als die wahrscheinlichen Setzungen.

Anmerkung: In einem geotechnischen Bericht ist dies entsprechend zu definieren. Beispielsweise könnte es heißen: Zur Berechnung der wahrscheinlichen Setzungen können die Mittelwerte der Steifemoduln verwendet werden. Die möglichen Setzungen ergeben sich bei Verwendung der unteren Werte.

Grundsätzlich wäre auch eine Berechnung der möglichen Setzungen mit unteren E_s -Werten denkbar. Zur Berechnung der wahrscheinlichen Setzungen könnte dann eine Art Streufaktor $\kappa < 1$ angegeben werden.

Anmerkung: Teilweise wird mit der Angabe von Bandbreiten für die E_s -Werte auch die Tiefen- oder die Spannungsabhängigkeit berücksichtigt. In diesem Fall wäre die Ermittlung von wahrscheinlichen und möglichen Setzungen gesondert zu definieren. Sofern die Tiefenabhängigkeit bei der Festlegung von E_s -Werten berücksichtigt werden soll, ist eine tiefen- bzw. schichtweise Angabe

von E_s -Werten zweckmäßig. Ein Homogenbereich wird dabei in verschiedene Teilschichten unterteilt und die E_s -Werte werden entsprechend zugeordnet.

Bei der Berechnung der zeitlichen Abfolge von wahrscheinlichen und möglichen Setzungen wird für nichtbindige Böden (Sande und Kiese) sowie für gemischtkörnige Böden davon ausgegangen, dass die Setzungen aus den ständigen Einwirkungen vollständig während der Bauzeit eintreten.

Auch die Setzungen aus dem Überbau einer Brücke werden bereits während der Bauzeit, d.h. vor Inbetriebnahme eintreten.

Die Setzungen aus den veränderlichen Einwirkungen sind für Sande und Kiese sowie für gemischtkörnige Böden (beispielsweise Geschiebemergel) i.d.R. für 100% der Verkehrslast zu ermitteln. Nur in begründeten Ausnahmefällen kann für gemischtkörnige Böden der Ansatz eines geringeren Verkehrslastanteils sinnvoll sein.

Für bindige Böden kann davon ausgegangen werden, dass nur 30 bis 50% der Verkehrslast als setzungswirksam berücksichtigt werden muss. Die ständigen Einwirkungen sind zu 100% anzusetzen. In diesem Fall ist jedoch zusätzlich der zeitliche Verlauf (Konsolidierung) zu berücksichtigen.

8 Zusammenfassende Empfehlungen

Für setzungsempfindliche Brückenbauwerke ergeben sich daraus folgende Empfehlungen zur Ausführung und Interpretation von Setzungsberechnungen.

1. Die wahrscheinlichen und möglichen Setzungen werden durch Variation der Steifemoduln ermittelt ($E_{s,m}$ und $E_{s,u}$).
2. In einem ersten Schritt sind die Setzungsanteile für das Eigengewicht der Widerlager und der Pfeiler (ständige Einwirkungen) zu berechnen.
3. In einem zweiten Schritt erfolgt die Berechnung der Setzungsanteile aus dem Überbau (ständige Einwirkungen).
4. Im nächsten Schritt werden die Setzungen aus den *tatsächlichen* Verkehrslasten ermittelt. In Sanden und Kiesen sowie in gemischtkörnigen Böden sind 100% der *tatsächlichen* Verkehrslast als setzungswirksam anzusetzen. In bindigen Böden sind 50 % (ggf. 30 bis 50 %) als setzungswirksam zu berücksichtigen. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Grundlage für eine Setzungsermittlung infolge von

Verkehrslasten, eine realistische Einschätzung der *tatsächlichen* Verkehrslasten bildet.

Bei Klappbrücken ist zusätzlich ein Zwischenschritt zu berücksichtigen:

3a. Berechnung der Setzungsanteile aus dem hochgestellten Klappteil.

Die Setzungen aus Punkt 1 bis 3 sind in nichtbindigen und gemischtkörnigen Böden vor Inbetriebnahme weitestgehend abgeschlossen.

9 Literatur

- | | | |
|------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EVB | 1993 | Empfehlungen „Verformungen des Baugrunds bei baulichen Anlagen“
Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. |
| DIN 4019-1 | 1979 | Setzungsberechnungen bei lotrechter, mittiger Belastung
1979-04 |
| DIN 4019 | 2015 | Baugrund – Setzungsberechnungen
2015-05 |
| EC-0 | 2011 | Handbuch Eurocode 0, Grundlagen der Tragwerksplanung
Beuth Verlag GmbH, 2011-11, Berlin |
| EC-2 | 2013 | Handbuch Eurocode 2, Betonbau, Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln, Band 2
1. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013-06 |
| EC-3 | 2013 | Handbuch Eurocode 3, Stahlbau, Brücken, Band 3
1. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013-06 |
| EC-4 | 2013 | Handbuch Eurocode 4, Verbundbau, Brücken, Band 2
1. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013-06 |
| EC-7 | 2015 | Handbuch Eurocode 7, Geotechnische Bemessung, Allgemeine Regeln, Band 1
2. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015-12 |