

109

Statischer Elastizitätsmodul – Bestimmung unter Druckbelastung (Sekantenmodul)

Determination of secant modulus of elasticity in compression

A Wesen des Verfahrens und technologische Aussage

Die Dehnung und Spannung eines Prismas oder zylindrischen Festbetonprobekörpers werden unter axialer Druckbeanspruchung aufgezeichnet. Aus dem daraus resultierenden Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Kurve wird der Sekantenmodul bei 1. Belastung (Vorbelastungszyklen nur bei Verfahren A) als auch bei stabilisierter Belastung (Verfahren A und B) ermittelt.

Die Probekörper werden im Labor hergestellt oder als Bohrkerne aus Betonbauteilen entnommen. Der statische Elastizitätsmodul beschreibt das elastische Verformungsverhalten zwischen Druckspannung und Dehnung bei der Verformung. Der Elastizitätsmodul, kurz auch E-Modul genannt, wird in N/mm^2 oder MPa gemessen.

Der Elastizitätsmodul ist umso größer, je mehr Widerstand das Material seiner elastischen Verformung entgegensetzt.

Näherungsweise wird der Elastizitätsmodul als Sekantenmodul der Spannungs-Dehnungslinie im elastischen Bereich aufgefasst. Der Sekantenmodul wird für Verformungsberechnungen eingesetzt. Der E-Modul liegt bei Beton etwa zwischen $25\,800 \text{ N/mm}^2$ (Beton C12/15) und etwa $45\,200 \text{ N/mm}^2$ (Beton C100/115). Es besteht somit ein Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit und E-Modul.

B Prüfvorschrift

- DIN EN 12390-13:2021-09 Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul)

C Geräte und Hilfsmittel

- Computergesteuerte Druckprüfmaschine nach DIN EN 12390-4 mit zusätzlichen Anforderungen:
 - a) geeignet für programmierbare Belastungszyklen
 - b) Last mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit steigern oder verringern
 - c) Lasten mit $\pm 5\%$ Abweichungen konstant halten
 - d) alle Belastungen sind mit einer Genauigkeit der Klasse 1 (kalibriert) durchzuführen
- Manuell gesteuerte Maschine (alternativ) mit den Eigenschaften a), b), c), von vorn abnehmbare Dehnungsmessgeräte, kalibrierfähig nach EN ISO 9513, mindestens Klasse 2 im Bereich 0 bis $1\,000 \text{ mm/m}$ in der Achse der Kraft messend, wobei der Probekörper beim Entfernen derselben in der Prüfkammer verbleiben kann
- Tücher, Schwamm
- Wassereimer
- Wasserfester Markierungsstift
- Kugelschlaghammer (alternativ)
- Waage, Wägebereich 30 kg



Bild 109-1: Anbringung von Sensoren an den Messlinien mit einer von vorn anzubringender Klemmvorrichtung (Bild: Testing)



Bild 109-2: Details der Wegaufnehmer-Sensoren (Bild: Testing)



Bild 109-3: Komplett montierte Wegaufnehmereinheit in der Druckprüfmaschine (Bild: Testing)

D Durchführung

Begriffe

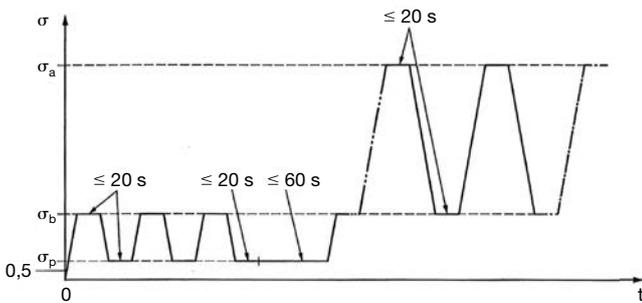
Anfänglicher Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) $E_{C,0}$
 Sekantenanstieg bei Spannungs-Dehnungs-Kurve bei der 1. Belastung

Stabilisierter Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) $E_{C,S}$
 Sekantenanstieg der Spannungs-Dehnungs-Kurve nach 3 Belastungen

Basislänge oder Messlänge
 Länge, die als Bezugsbasis für die Dehnungsmessung verwendet wird (1/12390-13)

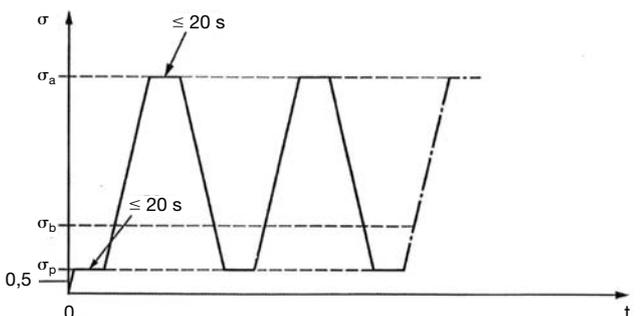
Obere Prüfspannung $f_c/3$
 Untere Prüfspannung $0,10 \times f_c \leq \sigma_b \leq 0,20 \times f_c$
 Vorbelastungsspannung $0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$

mit
 f_c Druckfestigkeit des Betons, ermittelt durch Prüfung von Begleitprobekörpern, Zylindern, Prismen, Würfeln oder Bohrkernen oder geschätzt anhand von zerstörungsfreien Prüfungen oder nach Regeln, die am Ort der Verwendung des Betons gelten.



Legende
 — Belastungszyklus
 - - - Belastungszyklus für die Bestimmung des anfänglichen Elastizitätsmoduls – Verfahren A
 - - - Belastungszyklus für die Bestimmung des stabilisierten Elastizitätsmoduls – Verfahren A
 σ aufgebrachte Spannung in MPa
 σ_a obere Prüfspannung: $f_c/3$
 σ_b untere Prüfspannung: $0,10 \cdot f_c \leq \sigma_b \leq 0,20 \cdot f_c$
 σ_p Vorbelastungsspannung: $0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$
 t Zeit in Sekunden

Bild 109-4: Prüfzyklus für die Bestimmung des anfänglichen und des stabilisierten Elastizitätsmoduls Verfahren A) (Bild: DIN e.V.)



Legende
 — Belastungszyklus
 - - - Belastungszyklus für die Bestimmung des stabilisierten Elastizitätsmoduls – Verfahren B
 σ aufgebrachte Spannung in MPa
 σ_a obere Prüfspannung: $f_c/3$
 σ_b untere Prüfspannung: $0,10 \cdot f_c \leq \sigma_b \leq 0,20 \cdot f_c$
 σ_p Vorbelastungsspannung: $0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$
 t Zeit in Sekunden

Bild 109-5: Prüfzyklus für die Bestimmung des stabilisierten Elastizitätsmoduls (Verfahren B) (Bild: DIN e.V.)

Vorbedingungen

- Die zylindrischen oder prismatischen Proben werden im Labor hergestellt oder mittels Bohrkernentnahme aus Betonbauteilen entsprechend DIN EN 12390-1 oder DIN EN 12504-1 bereitgestellt. Das Verhältnis der Probekörperlänge L zum Maß d muss im Bereich von $2 \leq L/d \leq 4$ liegen. Die Breite oder der Durchmesser d muss mindestens $3,5 D_{\max}$ (D_{\max} = Größtkorn im Beton) entsprechen, bei einem Größtkorn von z. B. 32 mm = 112 mm Mindestdurchmesser.
- Es wird empfohlen, Zylinder 150 mm × 300 mm (Referenzkörper) zu prüfen. Alternativ können auch andere Probekörper gemäß DIN EN 12390-1 mit den genannten Voraussetzungen verwendet werden.
- Weiterhin sollten Begleitprobekörper für die parallele Bestimmung der Druckfestigkeit (f_c) bereitgestellt werden. Sie werden aus derselben Charge wie die Probekörper hergestellt oder bei Kernbohrungen aus demselben Bereich wie der Probekörper entnommen.
- Probekörper nach DIN EN 12390-1 (Kapitel 75 bis 79) herstellen und nach DIN EN 12390-2 wie die Begleitprobekörper lagern, für Bohrproben gilt DIN EN 12504-1. Meßgeräte können die Dehnung entweder direkt (z. B. Dehnungsmessstreifen) oder in Form von Längenänderung messen. Hieraus ist e gemäß Gl. 109-1 zu berechnen:

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{Gl. 109-1})$$

Positionierung der Prüfkörper

1. Falls Wasserlagerung, Prüfkörper aus dem Wasser nehmen, Oberflächenwasser abtupfen und bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ lagern, jedoch nicht länger als 24 h.
2. Für die Zeit der Entnahme aus dem Wasser abdecken, um Feuchtigkeit des Probekörpers sicherzustellen und um Austrocknung zu verhindern.
3. Auf der Messlinie des Probekörpers (Bild 109-1) mittels Markierung, z. B. durch einen wasserfesten Zeichenstift, die Positionen für die Wegaufnahme (Dehnungsmessgeräte) und für die Klammern der Vorrichtung markieren. Die Messlänge des Dehnungsmessgerätes muss zwischen $2/3$ des Durchmessers d (hier $150 \text{ mm} \cdot 2/3 = 100 \text{ mm}$) und der halben Probekörperlänge L (hier $300 \text{ mm}/2 = 150 \text{ mm}$) liegen, jedoch nicht kleiner als $3 D_{\max}$ (hier $3 \cdot 32 \text{ mm} = 96 \text{ mm}$). Das Dehnungsmessgerät am Probekörper auf der Messlinie zwischen $2/3$ des Durchmessers und der halben Probekörperlänge befestigen.
4. Mindestens 2 Dehnungsmessgeräte symmetrisch zur Mittellachse des Probekörpers anordnen, gleich weit von den beiden Stirnflächen des Probekörpers entfernt. Bei Zylindern mit Durchmes-

ser 150 mm, Länge 300 mm und einem Größtkorn D_{\max} von kleiner 32 mm, wird der 1. Sensor mit den Gegenklammern üblicherweise auf der Messlänge im 1. Drittelpunkt der Gesamtlänge installiert (bei 100 mm).

5. Der Messlinie folgt ein Abstand von weiteren 100 mm bis zu dem 2. Dehnungssensor (bei 200 mm) und nochmals 100 mm bis zur Unterkante (Stirnfläche) des Prüfkörpers.
6. Dehnungsvorrichtung an der Probe fest installieren, wobei Achsenparallelität maßgeblichen Einfluss auf die Genauigkeiten der beiden unabhängigen messenden Sensoren hat.
7. Für die Berechnung des Elastizitätsmoduls Druckfestigkeit f_c des Prüfkörpers an einem oder mehreren Begleitprobekörpern feststellen. Ist dies nicht möglich, kann die Druckfestigkeit auch zerstörungsfrei ermittelt oder notfalls geschätzt werden

Bestimmung des anfänglichen und des stabilisierten Elastizitätsmoduls (Verfahren A)

1. Dehnungsaufnehmer am positionierten Prüfkörper individuell – ohne Mittlerbox – mit der Prüfmaschinensteuerung verbinden.
2. Für den 1. Belastungszyklus Probekörper bis zur unteren Prüfspannung σ_b beanspruchen. Prüfungsgeschwindigkeit der Laststeigerungen und der Lastreduzierungen der Vorbelastungszyklen und der Belastungszyklen beträgt $0,6 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$ (MPa/s), Abweichung $\pm 0,2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$ (MPa/s).
3. Probe bis zur unteren Prüfspannung σ_b , beliebiger Wert zwischen 10 % und 15 % der Druckfestigkeit (f_c) beanspruchen ($0,1 \cdot f_c \leq \sigma_b \leq 0,20 \cdot f_c$). Die obere Prüfspannung σ_a soll 30 % der Druckfestigkeit aufweisen.
4. Sobald die untere Prüfspannung (σ_b) erreicht ist, diese für die Dauer von höchstens 20 s mit einer maximalen Abweichung von $\pm 5 \%$ halten. Den dem Nennwert der unteren Prüfspannung entsprechenden Meßwert σ_b^m aufzeichnen.
5. Im direkten Anschluss Spannung auf Vorbelastungsspannung σ_p reduzieren.
6. Nach Erreichen von σ_p den Wert von der Prüfmaschine für höchstens 20 s halten,
7. Danach Werte der Dehnungsgeber nullen.
8. Vorbelastungszyklen noch 2 Mal wiederholen, Vorbelastung also 3 Mal hintereinander ausführen.
9. Nach Beendigung der Belastungszyklen 2 und 3 jeweils bei der unteren Prüfspannung die Dehnung ε_b in mm im Verlauf einer jeden Messlinie (bzw. eines jeden Sensors) protokollieren.
10. Nach diesen 3 Belastungszyklen die Vorbelastungsspannung σ_p mit einer maximalen Abweichung von $\pm 5 \%$ auf dem Nennwert halten. Innerhalb der nächsten 60 s folgende Überprüfungen nacheinander durchführen:

Erste Überprüfung

- Die Abweichung der Dehnung ε_b zwischen dem 2. und 3. Zyklus darf bei keiner Messlinie bzw. darf bei keinem Dehnungssensor größer als 10 % sein. Die Prüfung unterbrechen, sollte der Unterschied $>10\%$ sein. Die Messgeräte entsprechend prüfen und gegebenenfalls in der Software neu einstellen. Erneut mit der Prüfung beginnen. Sollte nach erneuter Prüfung die Abweichung immer noch $>10\%$ sein, Prüfung abbrechen.

Zweite Überprüfung

- Die ermittelten Dehnungen ε_b dürfen bei dem 3. Belastungszyklus an allen Messlinien bzw. an allen Dehnungssensoren um nicht mehr als 20 % vom Mittelwert der 3 Dehnungsermittlungen abweichen. Wird dies nicht eingehalten, Prüfkörper erneut zentrieren und die Prüfvorrichtung auf richtigen Sitz überprüfen, erneut starten. Bei erneuter Abweichung $>20\%$ Prüfung abbrechen und Prüfkörper verwerfen.

Belastungszyklen

- Nach erfolgreicher Überprüfung von den Vorbelastungszyklen zu den Belastungszyklen übergehen. Insgesamt 3 Belastungszyklen durchführen. Die Spannung direkt von der Vorbelastungsspannung σ_p mit gleicher Belastungsgeschwindigkeit von $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s auf die untere Prüfspannung σ_b steigern.
- Untere Prüfspannung nach deren Erreichen für höchstens 20 s mit einer maximalen Abweichung von $\pm 5\%$ halten.
- Am Ende der Phase Dehnung im Verlauf einer jeden Messlinie bzw. eines jeden Dehnungsgebers protokollieren und Mittelwert $\varepsilon_{b,0}$ aus 3 Belastungszyklen bilden.
- Zwei weitere Belastungszyklen ausführen, bei denen die Geschwindigkeiten der Spannungssteigerungen und der Spannungsreduzierungen immer $0,6 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$ (Abweichung $\pm 0,2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$) entsprechen. Die Spannung mit der angegebenen Geschwindigkeit bis zum Erreichen der oberen Prüfspannung σ_a steigern. Die obere Prüfspannung jeweils höchstens 20 s mit einer maximalen Abweichung von $\pm 5\%$ halten.
- Anschließend Spannung mit der oben genannten Geschwindigkeit wieder auf die untere Prüfspannung reduzieren.
- Die untere Prüfspannung σ_b maximal 20 s innerhalb von $\pm 5\%$ auf dem Nennwert halten.
- Phase 2 und 3 durchführen.
- Dehnungen jeder Messlinie bei den oberen Prüfspannungen des 1. und 3. Belastungszyklus bei konstanter Belastung (während der 20 s) protokollieren. Anschließend die mittleren Dehnungen $\varepsilon_{a,1}$ und $\varepsilon_{a,3}$ berechnen.

- Am Ende der Phase der unteren Prüfspannung des 2. Belastungszyklus, bei konstanter Belastung, Dehnung im Verlauf jeder Messlinie (beider Dehnungsgeber) bei diesem Spannungswert protokollieren und Mittelwert $\varepsilon_{b,2}$ der beiden Sensordehnungen bilden.
- Den Spannungsmesswert σ_b^m der unteren Prüfspannungen protokollieren.
- Den Spannungsmesswert der oberen Prüfspannung σ_a^m protokollieren.
- Nach Abschluss aller Messungen bei der oberen Prüfspannung des 3. Belastungszyklus Druckfestigkeit des Prüfkörpers bestimmen. Die Dehnungsgeber inklusive der Vorrichtung während der unteren σ_b Druckspannung vom Probekörper entfernen, um diese vor Beschädigungen zu schützen. Hierfür muss ein spezieller Tür-Sicherheitsmechanismus verbaut sein, welcher ein Öffnen der Prüfkammer nur unter verringerter Spannung σ_b gewährt. Die Vorrichtung mit den Wegaufnehmern muss entfernbar sein, ohne den gesamten Probekörper aus der Prüfkammer zu entnehmen.
- Druckfestigkeit des Prüfkörpers nach DIN EN 12390-3 ermitteln und auf $0,1 \text{ N/mm}^2$ (MPa) protokollieren (siehe Kapitel 101). Im Prüfbericht vermerken, falls die gemessene Druckfestigkeit um mehr als 20 % von f_c abweicht.
- Berechnen des **anfänglichen** Elastizitätsmoduls $E_{c,o}$ gemäß Verfahren A nach Gl. 109-2:

$$E_{c,o} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,1} - \varepsilon_{b,0}} \quad (\text{Gl. 109-2})$$

Berechnen des **stabilisierten** Elastizitätsmoduls $E_{c,s}$ nach Verfahren A gemäß Gl. 109-3:

$$E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}} \quad (\text{Gl. 109-3})$$

mit

$\Delta\sigma$ Differenz zwischen den gemessenen Spannungen σ_a^m und σ_b^m (Verfahren A) oder σ_a^m und σ_p^m (Verfahren B)

$\Delta\varepsilon_s$ Bei der 3. Belastung gemessene Dehnungsdifferenz

$\varepsilon_{a,n}$ Durchschnittliche Dehnung bei oberer Prüfspannung beim Belastungszyklus n

$\varepsilon_{b,n}$ Durchschnittliche Dehnung bei unterer Prüfspannung beim Belastungszyklus n

σ_a^m Dem Nennwert der Vorbelastungsspannung σ_a entsprechender Spannungsmesswert

σ_b^m Dem Nennwert der Vorbelastungsspannung σ_b entsprechender Spannungsmesswert

Bestimmung des stabilisierten Elastizitätsmoduls (Verfahren B)

27. Die zylindrischen oder prismenförmigen Probekörper für die Prüfung vorbereiten und mittels Markierung, z. B. durch einen Zeichenstift die Positionen für die Wegaufnehmer (Dehnungsmessgeräte) und für die Klemmen der Vorrichtung jeweils im entsprechenden Punkt anbringen, beim Zylinder Durchmesser 150 mm mit einer Länge von 300 mm und einem Größtkorn D_{\max} von maximal 32 mm, üblicherweise in den Drittpunkten, wie bei Verfahren A.
28. Drei Belastungszyklen durchführen. Jeweils am Ende der Belastungszyklen 2 und 3 Positionierung des Prüfkörpers (1. Überprüfung) und Stabilität der Verkabelung (2. Überprüfung) kontrollieren. Beim 3. Belastungszyklus stabilisierten Elastizitätsmodul bestimmen.
29. Die Veränderungen der Spannungen werden mit einer Geschwindigkeit von $0,6 (\pm 0,2) \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$ (MPa/s) erzielt, sowohl bei Spannungssteigerungen als auch bei Spannungsreduzierungen.
30. Probekörper mit der axial zentrisch ausgerichteten E-Modul -Messeinrichtung mittig in die Prüfmaschine einsetzen und die Dehnungsaufnehmer individuell ohne Mittlerbox mit der Prüfmaschinensteuerung verbinden. Vorbelastungsspannung σ_p^{N1} aufbringen und für höchstens 20 s halten.
31. Nach Ende dieser Phase Dehnungsmessgeräte nullen.

Erster Belastungszyklus

32. Spannung von der Vorbelastungsspannung σ_p auf die obere Prüfspannung σ_a mit gleicher Geschwindigkeit aufbringen.
33. Diese obere Prüfspannung für höchstens $20 \text{ s} \pm 5 \%$ halten.
34. Am Ende der Phase Dehnung im Verlauf jeder Messlinie protokollieren und daraus die mittlere Dehnung $\varepsilon_{a,1}$ bilden.
35. Danach Spannung wieder auf Vorbelastungsspannung verringern und diesen Wert für höchstens 20 s halten.
36. Nach Ende dieses Belastungszyklus Dehnung im Verlauf jeder Messlinie protokollieren und hieraus die mittlere Dehnung $\varepsilon_{p,1}$ berechnen.

Zweiter Belastungszyklus

Punkte 31 bis 36 wiederholen und die mittlere Dehnung $\varepsilon_{p,2}$ der beiden Messlinien bzw. Dehnungsgeber berechnen.

Erste Überprüfung

Beim 2. Belastungszyklus darf die Dehnung ε_a im Verlauf jeder Messlinie um nicht mehr als 20 % vom Mittelwert $\varepsilon_{a,1}$ abweichen. Bei Nichteinhaltung Prüfkörper erneut zentrieren und die Prüfung neu beginnen. Falls sich die Abweichung nicht auf einen Wert unterhalb von 20 % verringern lässt, Prüfung abbrechen und Prüfkörper verwerfen.

Dritter Belastungszyklus

Punkte 31 bis 36 wiederholen und mittlere Dehnung $\varepsilon_{p,3}$ der beiden Messlinien bzw. Dehnungsgeber berechnen.

Zweite Überprüfung

Die Abweichung von ε_a darf zwischen 2. und 3. Zyklus bei keiner Messlinie größer als 10 % sein. Bei Nichteinhaltung Prüfung unterbrechen, die Messgeräte entsprechend einstellen und erneut mit der Prüfung beginnen. Ist der Dehnungsunterschied auch nach dem Neustart größer als 10 %, diese Abweichung im Prüfbericht angeben.

37. Messwert der Vorbelastungsspannung σ_{pm} protokollieren.
38. Messwert der oberen Prüfspannung σ_{am} protokollieren.
39. Wegaufnehmer entfernen.
40. Nach Abschluss aller Messungen bei oberer Prüfspannung Druckfestigkeit des Prüfkörpers nach dem in DIN EN 12390-3 angegebenen Belastungsverfahren bestimmen. Druckfestigkeit auf 0,1 MPa aufzeichnen.
41. Abweichung der gemessenen Druckfestigkeit um mehr als 20 % von f_c im Prüfbericht vermerken.
42. Stabilisierten Elastizitätsmodul nach Verfahren B gemäß Gl. 109-3 berechnen.

$$E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_p^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}} \quad (\text{Gl. 109-3})$$

Anmerkung Die Vorbelastungsspannung σ_p entspricht beim Verfahren B der unteren Prüfspannung mit:

$$0,5 \leq \sigma_p \leq 0,20 \cdot f_c$$

Empfehlung Es empfiehlt sich nicht zuletzt aus Zeitgründen (Protokollierung, Zeitintervalle, Belastungsgeschwindigkeiten, Laststeigerungsgrenzen) ein Computerprogramm zu verwenden, welches die Kriterien automatisch überwacht, den Ablauf der Vorbelastungszyklen und der Belastungszyklen automatisiert abfährt.