

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Pietsch, Christian

Ein einfaches nichtlineares Verformungsgesetz zur Vorausbestimmung der Setzung von starren Fundamenten

Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schiffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106206>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Pietsch, Christian (1982): Ein einfaches nichtlineares Verformungsgesetz zur Vorausbestimmung der Setzung von starren Fundamenten. In: Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schiffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau 45. Berlin: Forschungsanstalt für Schiffahrt, Wasser- und Grundbau. S. 90-105.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



4) DK 624.151.542
624.151.5

Setzungen
Flachsgründung

Ein einfaches nichtlineares Verformungsgesetz
zur Vorausbestimmung der Setzung von starren Fundamenten

Dr.-Ing. Christian Pietsch, KdT

1. Einleitung

Der gegenwärtige Stand der Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Setzungen von Bauwerken ist nach wie vor unbefriedigend. Es zeigt sich immer wieder, daß diese Verfahren Ergebnisse liefern können, die bereits im Gebrauchszustand mit den experimentellen Beobachtungen zum Last-Setzungs- sowie Sohldruck-Setzungsverhalten von Bauwerken, Modellfundamenten und Lastplatten nicht oder nur teilweise übereinstimmen. Die großen Randspannungen, die nach den üblichen Verfahren zur Ermittlung der Sohldruckverteilung auf der Grundlage der bekannten Lösung von BOUSSINESQ errechnet werden, bilden dafür ein markantes Beispiel. Nach diesen Verfahren ist daher die grundbaustatische Projektierung mit einigen Unsicherheiten verbunden, sie kann sogar zu einer Fehleinschätzung und unwirtschaftlichen Bemessung führen. Eine Verbesserung dieser Verfahren im Sinne einer wirklichkeitsnahen Vorausbestimmung der Bauwerkssetzungen ist deshalb von wissenschaftlich-technischem und ökonomischem Interesse.

Für die Praxis kann eine wesentliche Verbesserung der Setzungsberechnung von Fundamenten bereits erreicht werden, wenn es gelingt, den Einfluß der nichtlinearen plastischen Setzungen näherungsweise zu erfassen. Dazu wurde in Form eines rechnerischen Verformungsmoduls ein einfaches nichtlineares Verformungsgesetz entwickelt /18/, /20/, über das im folgenden eine zusammenfassende Darstellung aus der Sicht bodenmechanischer Verformungsgesetze gegeben wird. Das vorgeschlagene Gesetz stützt sich auf Ergebnisse, die sich aus der Auswertung von Lastplattenversuchen, Probelastungen sowie Setzungsmessungen mit verschiedenen Belastungszustän-

den ergeben. Führt man dieses nichtlineare Verformungsgesetz in die Setzungsberechnung ein, so erhält man ein kombiniertes Verfahren zur Tragfähigkeitsberechnung von Fundamenten, das - mit Ausnahme locker gelagerter Erdstoffe - näherungsweise eine vollständige Erfassung der Last-Setzungslinie von starren Fundamenten bis zum Grundbruch ermöglicht. Damit können einige Widersprüche beseitigt werden, die sich aus dem Nebeneinander der herkömmlichen Setzungs- und Tragkraft- bzw. Grundbruchberechnung ergeben, Tabelle 1.

Tabelle 1. Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Fundamenten (in Anlehnung an /24/).

Verfahren	Verformungsverhalten des Baugrundes	Mängel
1 Grundbruchberechnung (Grenzwertverfahren)	starr-plastisch	Keine Aussage über Setzungen. Keine analytische Ermittlung der Last-Setzungslinie
2 Setzungsberechnung	linear-elastisch, z. T. mit willkürlichen Modifikationen	Keine Aussage über Sicherheit und Grenzbelastung. Analytische Deutung der Last-Setzungslinie nur im Initialbereich
3 Kombinierte Verfahren	nichtlinear-elastisch mit Bruchgrenze	Mängel der Verfahren 1) und 2) werden überwunden

2. Anforderungen an bodenmechanische Verformungsgesetze

Für die herkömmliche Setzungsberechnung wird meistens ein linear-elastisches Verformungsverhalten des Baugrundes angenommen bzw. das Verformungsverhalten teilweise durch Modifikationen an die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen anzupassen versucht. Die Modifikationen des Verformungsmoduls betreffen z. B. die Abhängigkeit von Belastung, Fundamentgröße und -form (Seitenverhältnis) sowie eine tiefenabhängige Zunahme. Darüber hinaus wird bei Sohldruckberechnung

nungen untersucht, das Auftreten plastischer Setzungen am Fundamentrand rechnerisch durch eine angenommene Veränderlichkeit des Verformungsmoduls in horizontaler Richtung zu berücksichtigen. In Tabelle 2 sind Beispiele für einige Modifikationen des Verformungsmoduls angeführt, die in der Praxis bei Setzungs- und Sohldruckberechnungen angewendet werden können.

Tabelle 2. Modifikation des Verformungsmoduls bei Setzungs- und Sohldruckberechnungen.

Modifikation des Verformungsmoduls	Quelle
1 Abhängigkeit von Belastung $M_0 = m \cdot \sigma^a$	OHDE /17/ (Steifemodul)
2 Abhängigkeit von Fundamentgröße und Seitenverhältnis	FUCHS/KLENGEL /10/ (Richtlinien KB Baugrund Berlin)
3 Tiefenabhängige Zunahme $E_0(z) = E_0(0) + \lambda \cdot z$	GIBSON /11/, /12/ REPNIKOV /22/, SCHULTZE /25/
4 Veränderlichkeit in horizontaler Richtung (Annahme bei Sohldruckberechnung)	
- Empirische Modifikation.	MÜLLER /16/, HERTWIG /13/
- Analytische Ermittlung bei näherungsweise bekannter Last-Setzungslinie mit Grenzlast	DRESSEL /7/
- Analytische Ermittlung auf der Basis einer berechneten Last-Setzungslinie mit Grenzlast	PIETSCH /20/, BOBE/PIETSCH /3/

Die Abweichungen zwischen den Ergebnissen von Verformungsrechnungen mit einem linear-elastischen Verformungsverhalten des Baugrundes und experimentellen Untersuchungen werden offensichtlich, wenn man die Eigenschaften des tatsächlichen Spannungs-Verformungsverhaltens von Erdstoffen betrachtet, Tabelle 3. Dabei sind die Einwirkungen aus zeitabhängigen

Vorgängen, Temperatur- und Wassereinfluß (z. B. Porenwasserdruck) noch nicht behandelt und die Darlegungen auf geometrisch lineare Aufgaben bei statischer Belastung beschränkt worden.

Tabelle 3. Eigenschaften des Spannungs-Verformungsverhaltens von Erdstoffen (BUCHMAIER u. a. /6/).

Eigenschaft	Bemerkungen
1 Nichtlinearität	Bei Erdstoffen sehr ausgeprägt vorhanden
2 Plastische Formänderungen	Schon bei geringen Belastungen auftretend
3 Dilatation	Scherbeanspruchungen können Volumenveränderungen bewirken (Kontraktion oder Dilatanz)
4 Spannungsweg-Verhalten	Abhängigkeit der Verformungen von der Belastungsgeschichte
5 Entfestigung	Nach Erreichen der maximalen Scherbeanspruchung bei Erdstoffen teilweise zu beobachten
6 Anisotropie-Verhalten	Anisotropes Verhalten von Erdstoffen aufgrund der Entstehungsgeschichte der Böden

Die Setzungsberechnung von starren Fundamenten läßt sich relativ einfach verbessern, wenn ein nichtlinear-elastisches Verformungsverhalten des Baugrundes vorausgesetzt wird. Im Unterschied zum linear-elastischen Verhalten wird hier ein veränderlicher Verformungsmodul angesetzt, der rechnerisch dem jeweiligen Belastungs- bzw. Verformungszustand anzugleichen ist. Dabei kann das Auftreten von Grenzspannungen (Bruchspannungen) berücksichtigt werden, wie z. B. nach DUNCAN/CHANG /8/ durch einen hyperbolischen Ansatz in Verbindung mit der MOHR-COULOMBSchen Bruchbedingung oder auch stark vereinfacht durch bilineare Ansätze für ideal-elastisches und ideal-plastisches Verhalten. Diese nichtlinear-elastischen Verformungsgesetze sind nach Untersuchungen von

SCHAD /23/ zur Berechnung von Verformungen geeignet, solange Fließ- und Bruchvorgänge nicht auftreten oder nur relativ kleine Zonen betreffen.

Für eine praktische Anwendung sind die nichtlinear-elastischen Beziehungen mit einem nichtlinearen Verlauf der Lastsetzungslinie besser als die bilinearen Ansätze zu gebrauchen. Bei diesen Beziehungen tritt nämlich keine sprunghafte Veränderung der Verformungsparameter ein, die mit numerischen Schwierigkeiten bei der rechentechnischen Lösung verbunden ist. Darüber hinaus können auf diese Weise auch jene plastischen Verformungen erfaßt werden, die bereits bei geringen Belastungen auftreten, Tabelle 3.

Die weiteren, in Tabelle 3 angeführten Eigenschaften des tatsächlichen Spannungs-Verformungsverhaltens der Erdstoffe lassen sich jedoch mit diesen nichtlinear-elastischen Verformungsgesetzen nicht mehr erfassen. Dazu werden entweder elastische Gesetze höherer Ordnung mit einer großen Anzahl von Materialkonstanten benötigt oder es wird ein elastoplastisches Verformungsverhalten vorausgesetzt, das eine Kombination von Elastizitätsgesetz, Fließbedingung, assoziierter bzw. nichtassoziierter Fließregel und Verfestigungsgesetz darstellt.

Eine Erhöhung der Genauigkeit der Setzungsberechnung durch Verwendung von derartigen Verformungsgesetzen bzw. entsprechenden mathematisch-physikalischen Modellen ist aber für die Praxis mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Diese Verformungsgesetze erfordern nämlich eine große Zahl von Verformungs- und Materialkenngrößen, deren experimentelle Ermittlung sehr aufwendig und nicht ganz unproblematisch ist. Darüber hinaus sind die dafür benötigten Berechnungsverfahren so kompliziert, daß sie für die übliche grundbaustatische Berechnung und Projektierung nicht in Frage kommen. Es muß außerdem festgestellt werden, KEZDI /14/, daß viele Modelle, Theorien und Verfahren nur zur Beschreibung des Spannungs-Verformungsverhaltens von speziellen Versuchen

oder Messungen entwickelt worden sind, die jedoch eine Übertragung auf praktische Aufgaben nicht enthalten und deshalb für eine allgemeine Anwendung nicht geeignet sind.

Die Verwendung von qualitativ verbesserten Verformungsgesetzen und theoretischen Modellen wird daher meistens auf wissenschaftliche Untersuchungen oder ausgewählte praktische Aufgaben beschränkt. Für die Setzungsberechnung steht eine für die Praxis geeignete, einfache Verfahrensweise zur Berücksichtigung des Einflusses der nichtlinearen plastischen Setzungen bisher nicht zur Verfügung.

3. Nichtlinear-elastisches Verformungsgesetz zur Setzungsberechnung

Beim gegenwärtigen Entwicklungsstand wird es für die grundbaustatische Berechnung als ausreichend erachtet, die Setzungsberechnung von Fundamenten durch Berücksichtigung der Nichtlinearität des Spannungs-Verformungsverhaltens der Erdstoffe zu verbessern. Diese Einschätzung wird durch die Ergebnisse von zahlreichen experimentellen und theoretischen Untersuchungen bestätigt. Damit ergibt sich für die Praxis die Forderung nach einem nichtlinear-elastischen Verformungsgesetz, um die plastischen Setzungen von starren Fundamenten bei Erstbelastung rechnerisch erfassen zu können.

Zur Entwicklung eines derartigen nichtlinear-elastischen Verformungsgesetzes sollen zunächst die Ursachen der nichtlinearen Setzungen von starren Fundamenten und Lastplatten analysiert werden. Dabei werden absolut starre Fundamente mit gleichförmiger Belastung und eine ausreichende Schichtdicke für eine unbehinderte Ausbildung von Gleitflächen im Untergrund vorausgesetzt.

Die nichtlinearen Setzungen, die auch als plastische Setzungen bezeichnet werden, sind für den Baugrund typisch. Sie können bereits im Gebrauchszustand auftreten. Die Auswertung von bodenmechanischen Belastungsversuchen (AICHHORN /1/,

ALTES /2/, BOROWICKA /4/, BRETH /5/, EGGESTAD /9/, KÖGLER/SCHIEDIG /15/, PRESS /21/ u. a.) zeigt, daß diese nichtlinearen Setzungen durch seitliche Bodenverschiebungen im Untergrund hervorgerufen und durch zahlreiche Parameter beeinflusst werden. Diese Parameter sind in Tabelle 4 aufgeführt. Die nichtlinearen Setzungen sind vor allem von der Geometrie der Lastfläche abhängig. Sie nehmen mit wachsender Belastung schnell zu. Diese nichtlinearen plastischen Setzungen können vom theoretischen Ansatz her mit allen darauf resultierenden Folgerungen von den Verfahren der Setzungsberechnung auf der Grundlage linear-elastischer Verformungsgesetze nicht erfaßt werden.

Tabelle 4. Parameter für die nichtlinearen plastischen Setzungen von starren Fundamenten und Lastplatten bei großer Schichtdicke des Untergrundes.

Parameter	Erläuterung
1 Geometrie der Lastfläche	- Breite - Seitenverhältnis Breite/Länge - Gründungs- bzw. Einbindetiefe
2 Sohlpressung	- Mittelwert über die Lastfläche
3 Bodenkenn- und Berechnungswerte	- Scherfestigkeit (Reibungswinkel und Kohäsion) - Rohwichte des Baugrundes - Verformungsmodul (Anfangswert) - Dichteindex (Lagerungsdichte)

Theoretische Untersuchungen zeigen, daß selbst für den Idealfall des elastisch-isotropen Halbraums die Setzungen zum weitaus größten Teil durch seitliches Ausweichen (volumenbeständige Verzerrung, Gestaltänderung) infolge von Scherverformungen und nicht durch eine Zusammendrückung (Volumenverminderung, Kompression) des Materials hervorgerufen werden, BOROWICKA /4/. Die häufig - selbst in Lehrbüchern - vertretene Auffassung, nach der als wichtigste Ursache von Set-

zungen die Zusammendrückung einzelner Baugrundsichten angesehen wird, bedarf daher dringend einer Korrektur.

Für das nichtlineare Verformungsgesetz sind auch die Ergebnisse aus der Auswertung von bodenmechanischen Belastungsversuchen und Setzungsmessungen von Bedeutung, /18/, /19/. Daraus folgt, daß der aktuelle Verformungsmodul im Gegensatz zur üblichen Auffassung keine Materialkonstante darstellt, sondern von der Größe der Belastung und von der Geometrie der Lastfläche abhängig ist.

Zur Anpassung des Verformungsmoduls an den jeweiligen Spannungszustand kann angenommen werden, daß dieser Modul von einem Anfangswert E (Modul der elastischen Verformung) bei Nullbelastung linear auf den Endwert Null bei Grundbruchbelastung q_f abfällt, /18/, /20/. Damit ergibt sich ein nichtlineares Verformungsgesetz in Form eines veränderlichen, rechnerischen Verformungsmoduls V zu

$$V = E \cdot (1 - q_m/q_f) \quad (1)$$

- E Elastizitätsmodul in kN/m^2 (Modul der elastischen Verformung, Anfangswert aus der Neigung der Last-Setzungslinie im Koordinatenursprung, ermittelt durch rechnerische Auswertung von Belastungsversuchen mit verschiedenen Lastzuständen)
- q_m Mittlere Sohlpressung in kN/m^2
- q_f Mittlere Grundbruchspannung in kN/m^2 für vertikale mittige Belastung und horizontale Gründungssohle, ermittelt nach TGL 11464/02 oder anderen Standards.

Bei Berücksichtigung der nichtlinearen, plastischen Setzungen kann die Gesamtsetzung s näherungsweise recht einfach ermittelt werden, wenn man in den bekannten Verfahren der Setzungsberechnung den Verformungsmodul E_0 bzw. den Steifemodul M_0 durch den rechnerischen Verformungsmodul V ersetzt.

Danach folgt für die Setzung

$$s = \frac{q_m \cdot B \cdot f_z}{V} = \frac{q_m \cdot B \cdot f_z}{E} \cdot \frac{1}{1 - q_m/q_f} \quad (2)$$

B Fundamentbreite in m
 f_z Setzungseinflußwert.

Ein Vergleich mit den bisherigen Verfahren der Setzungsbe-
rechnung zeigt, daß sich die vorgeschlagene Formel (2) le-
diglich durch einen Reduktionsfaktor f_q

$$f_q = 1 - q_m/q_f \quad (3)$$

unterscheidet. Gl. (2) stellt eine analytische Verknüpfung
der bisher getrennt benutzten Verfahren zur Setzungs- und
Grundbruch- bzw. Tragkraftberechnung dar. Sie ermöglicht in
einfacher Weise die rechnerische Ermittlung der elastischen
und der nichtlinearen plastischen Setzungen starrer Funda-
mente. Dabei muß gewährleistet sein, daß die geometrische
Ausbildung der Gleitflächen nicht behindert wird, d. h. eine
ausreichend große Schichtdicke des Untergrundes vorhanden
ist.

Für die analytische Darstellung der Last-Setzungslinie nach
Gl. (2) wird die Abhängigkeit der Setzungen von der mittlere-
ren Schluppressung durch die hyperbolische Funktion

$$s = \frac{a \cdot q_m}{1 - b \cdot q_m} \quad (4)$$

$$\text{mit } b = 1/q_f \quad (5)$$

wiedergegeben. Danach wird die Größe des rechnerischen Ver-
formungsmoduls in Verbindung mit der Ermittlung der mittlere-
ren Grundbruchspannung von den Parametern bestimmt, die in
Tabelle 4 angegeben sind.

Der rechnerische Verformungsmodul bleibt praktisch nur im
Bereich sehr kleiner Werte q_m/q_f konstant. Für die Setzungs-

berechnung nach der vorgeschlagenen Gl. (2) wird damit im Unterschied zum linear-elastischen Verformungsgesetz weit vor Erreichen des Bruchzustandes auch rechnerisch ein nicht-lineares Verhalten ausgewiesen.

4. Schlußfolgerungen für die Setzungsberechnung

Aus der vorgeschlagenen Setzungsformel (2) ergeben sich in Verbindung mit dem nichtlinearen Verformungsgesetz (1) folgende Schlußfolgerungen:

1. Für die Setzung ist nicht nur die absolute Größe der mittleren Sohlpressung, sondern auch das Verhältnis der mittleren Sohlpressung q_m zur mittleren Grundbruchspannung q_f oder mit anderen Worten der Ausnutzungsgrad q_m/q_f der mittleren Grundbruchspannung q_f maßgebend.
2. Für den Gebrauchszustand müssen die Ergebnisse von Setzungs- sowie Sohlrückberechnungen auf der Grundlage eines konstanten Verformungsmoduls von den tatsächlichen Verhältnissen umso mehr abweichen, je größer der Ausnutzungsgrad q_m/q_f der mittleren Grundbruchspannung q_f ausfällt. Die übliche Berechnung mit einem konstanten Verformungsmodul kann dann sogar zu deutlichen Fehleinschätzungen führen.
3. Die Angabe eines konstanten Mittelwertes für den rechnerischen Verformungsmodul ist praktisch nicht möglich, da dieser Modul unterschiedlich von zahlreichen Parametern beeinflusst wird.
4. Eine Verallgemeinerung von Erkenntnissen aus Probelastungen, Belastungsversuchen, Sohldruckmessungen usw. ist wegen der vielfältigen Abhängigkeit des rechnerischen Verformungsmoduls von zahlreichen Parametern einigen wesentlichen Einschränkungen unterworfen. So kann z. B. die Veränderung nur eines Parameters den rechnerischen Verformungsmodul und damit das Ergebnis der grundbaustatischen Berechnung erheblich beeinflussen. Eine Übertra-

gung der Ergebnisse von Versuchen bzw. Messungen auf Lastflächen mit anderen Parametern sollte deshalb nur für den gleichen Ausnutzungsgrad q_m/q_p der mittleren Grundbruchspannung q_p erfolgen.

Mit diesen Schlußfolgerungen wird zugleich eine Einschätzung von WIENER /26/ bestätigt, nach der "es bisher nicht gelingt, einen repräsentativen und maßgebenden Wert eines Verformungsmoduls (Steifemoduls), der für die Setzungsberechnung benötigt wird, experimentell zu bestimmen".

Die Ergebnisse von Setzungs- und Sohldruckberechnungen starrer Fundamente unter Verwendung des nichtlinear-elastischen Verformungsgesetzes nach Gl. (1) werden an anderer Stelle mitgeteilt /20/, /3/. Diese Ergebnisse zeigen, daß mit dem vorgeschlagenen Berechnungsverfahren die nichtlinearen plastischen Setzungen in ihren vielfältigen Auswirkungen näherungsweise richtig erfaßt werden können. Daraus folgt, daß das vorgeschlagene Verfahren zur Setzungsberechnung nach der Gl. (2) geeignet ist, eine Reihe bisher theoretisch ungeklärter, aber experimentell abgesicherter Ergebnisse im bodenmechanischen Sinn zuverlässig und mit vertretbarem Aufwand zu klären. Dabei müssen keine komplizierten Stoffgesetze, verbunden mit aufwendigen numerischen Verfahren - wie z. B. der Finite-Element-Methode - angewendet werden. Es wird deshalb eingeschätzt, daß die vorgeschlagene Form der Setzungsberechnung mit einem nichtlinear-elastischen Verformungsgesetz bei den getroffenen Voraussetzungen ein für die Praxis brauchbares Näherungsverfahren darstellt.

Zusammenfassung

Die üblichen Verfahren der Setzungsberechnung von Fundamenten setzen ein modifiziertes, linear-elastisches Verformungsverhalten des Baugrundes voraus. Für den Baugrund sind aber die nichtlinearen plastischen Setzungen typisch. Zur Erfassung dieser plastischen Setzungen wurde in Form eines

veränderlichen, rechnerischen Verformungsmoduls ein nicht-linear-elastisches Verformungsgesetz entwickelt und in die Setzungsberechnung eingeführt. Über dieses Verformungsgesetz wird eine zusammenfassende Darstellung aus der Sicht der Anforderungen an bodenmechanische Verformungsgesetze gegeben. Darüber hinaus werden Schlußfolgerungen für die Setzungsberechnung in der Praxis abgeleitet, die sich aus der Anwendung des vorgeschlagenen Verformungsgesetzes ergeben.

Literaturnachweis

- / 1/ AICHHORN, W. Über die Zusammendrückung des Bodens infolge örtlicher Belastung. Geologie und Bauwesen 3(1932)1, S. 2 - 46
- / 2/ ALTES, J. Formänderungen und Bruch von Schluff unter schmalen Streifenfundamenten. Opladen, 1974, Westdt. Verlag, Forschungsberichte Land Nordrhein-Westfalen, Nr. 2442
- / 3/ BOBE, R.;
PIETSCH, C. Settlement calculation by a new strength theory. Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng., Stockholm 1981, Bd. 1, S. 53-56
- / 4/ BOROWICKA, H. Über die Setzung von Bauwerken. Mitt. Inst. VGB TH Aachen, H. 51, 1970, S. 199 - 210
- / 5/ BRETH, H. Die Setzung von flachgegründeten Einzelfundamenten. Mitt. Degebo Berlin-West, H. 32, 1976, S. 25-33
- / 6/ BUCHMAIER, R. F.;
GUSSMANN, P.;
LAUMANS, Q.;
SCHAD, H.;
SMOLT CZYK, U. Die Anwendung der Methode der Finiten Elemente in der Grundbau- praxis. CAD-Bericht Projekt Rechnerunterstütztes Entwickeln und Konstruieren. Karlsruhe, 1974, Dt. Ges. f. Kernforschung
- / 7/ DRESSEL, B. Beitrag zur Berechnung elastischer Flächengründungen unter besonderer Berücksichtigung der Plastizierung des Baugrundes. 1976, Diss. B, TU Dresden

- / 8/ DUNCAN, J. M.;
CHANG, C. Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. Proc. ASCE, J. Soil Mech. Found. Div. 96(1970)5, S. 1629 - 1653
- / 9/ EGGESTAD, A. Deformation measurements below a model footing on the surface of dry sand. Proc. Europ. Baugrundtagung Wiesbaden, 1963, Bd. 1, S. 233 - 239
- /10/ FUCHS, E.;
KLENGEL, K. J. Baugrund und Bodenmechanik. Berlin, 1977, VEB Verlag f. Bauwesen, 8. Auflage
- /11/ GIBSON, R. E. Some results concerning displacements and stresses in a non-homogeneous elastic half-space. Geotechnique 17(1967)1, S. 58 - 67
- /12/ GIBSON, R. E. The analytical method in soil mechanics. Geotechnique 24(1974)2, S. 115 - 140
- /13/ HERTWIG, G. Ein Beitrag zur Berechnung der räumlichen Sohldruckverteilung unter Fundamentplatten. 1976, Diss., HfV Dresden
- /14/ KEZDI, A. Generalbericht Sektion 2, Spannungs- und Verformungszustand der Böden. 6. Donau-Europ. Konf. Bodenmech. u. Grundbau, Varna 1980, Generalberichte, S. 53 - 62
- /15/ KÖGLER, F.;
SCHEIDIG, A. Baugrund und Bauwerk. Berlin-West, 1948, W. Ernst u. Sohn, 5. Auflage

- /16/ MÜLLER, R. Fundamente auf ungleichförmigem Baugrund - ein Beitrag zur kleinrechnergestützten Berechnung von Fundamentbalken und einachsigen ausgesteiften Fundamentplatten unter besonderer Berücksichtigung projektierungstechnischer Erfordernisse. 1979, Diss., HfV Dresden
- /17/ OHDE, J. Zur Theorie der Druckverteilung im Baugrund. Bauing. 20(1939)23/24, S. 451 - 459
- /18/ PIETSCH, C. Computer supported development of a numerical method for calculating nonlinear load-settlement lines of shallow foundations and loading plates with a uniform distributed load. Proc. 3th Int. Conf. Numerical Methods in Geomechanics, Aachen 1979, Bd. 3, S. 1007 - 1016
- /19/ PIETSCH, C. Auswertung bodenmechanischer Belastungsversuche an Lastplatten und starren Fundamenten nach einer neuen Festigkeitstheorie. 3. Fachkolloquium "Aktuelle Probleme und Erfahrungen der Experimentellen Baumechanik" am 27.3.1980, Wiss. Berichte TH Leipzig, H. 19, 1981, S. 65 - 73
- /20/ PIETSCH, C. Setzungsberechnung von Lastplatten und Flächen Gründungen unter Verwendung eines tragkraftabhängigen Verformungsmoduls. 1981, Diss., HfV Dresden

- /21/ PRESS, H. Der Boden als Baugrund. Mit Ergebnissen eigener Versuche. Mitt. Wasserbau u. Baugrundforschung, H. 9, Berlin-West, 1949, W. Ernst u. Sohn, 3. Auflage
- /22/ REPNIKOV, L. N. Rasčet balok na uprugom osnovanii, obedinjajuščem deformativnye svojstva osnovanii Vinklera i linejno-deformiruemoj sredy (Die Berechnung elastisch gebetteter Balken als Kombination der Verformungseigenschaften einer Winklerschen Unterlage und eines linear verformbaren Materials). Osnov., fund. i mech. gruntov 9(1967)6, S. 4 - 6
- /23/ SCHAD, H. Die Verwendung nichtlinearer Stoffgesetze bei der numerischen Analyse von Grundbauaufgaben. Vorträge Baugrundtagung 1978 Berlin (West). Essen, 1978, Dt. Ges. f. Erd- u. Grundbau, S. 141 - 181
- /24/ SCHÄFFNER, H.-J. Universelles Verfahren zur elastoplastischen Berechnung von Tiefgründungen. Baupl.-Bautechn. 32(1978)7, S. 316 - 319
- /25/ SCHULTZE, E. Die Kombination von Bettungszahl- und Steifezahlverfahren. Mitt. Inst. VGB TH Aachen, H. 48, 1970
- /26/ WIENER, K.-H. Einfluß von Verdrückungen auf Setzungen und Sohldruckverteilung von Fundamenten auf Sand. Berlin, 1968, Fachtagung Grundbau und Baugrundmechanik, VEB Baugrund Berlin, S. 227 - 282