Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München

> Schriftenreihe Heft 13

# Quantifizierung von Setzungsdifferenzen mit Hilfe einer stochastischen Betrachtungsweise

von Wolfgang Reitmeier

München 1989

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss Ordinarius für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik

DISSERTATIONS-UND FOTODRUCK FRANK GmbH 8000 München 2, Gabelsbergerstr. 15, Tel. 288663

Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München

# QUANTIFIZIERUNG VON SETZUNGSDIFFERENZEN MIT HILFE EINER STOCHASTISCHEN BETRACHTUNGSWEISE

Wolfgang Reitmeier

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Voi	rsitzender:	UnivProf.	DrIng.	Η.	Grund	dmann,	Ord	inarius
1.	Prüfer:	UnivProf.	DrIng.	R.	Floss	s, Ord	inar	ius
2.	Prüfer:	PrivDoz.	DrIng.	Dr.	-Ing.	habil	. R.	Rackwitz

Die Dissertation wurde am 01.07.1988 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 08.02.1989 angenommen.



#### Vorwort

In der vorliegenden Dissertation wurde mit Hilfe von statistischen Methoden bzw. Hilfsmitteln ein Lösungsweg aufgezeigt, Setzungsdifferenzen hinsichtlich ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit zu quantifizieren.

Die hierzu notwendigen Vorarbeiten begannen während meiner Mitarbeit im Sonderforschungsbereich 96 "Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke" und wurden 1986, zusammen mit den Ergebnissen eines von Herrn Dr.-Ing. D. Alber bearbeiteten Forschungsauftrags, in der Schriftenreihe des Lehrstuhls und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München veröffentlicht.

Dem Leiter und Ordinarius des Lehrstuhls und Prüfamts, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Floss danke ich für seine umfassende Unterstützung bzw. Förderung, seine Übernahme des Hauptreferates und nicht zuletzt für die Bereitschaft, meine Arbeit im Rahmen dieser Schriftenreihe einer interessierten Fachwelt vorstellen zu dürfen.

Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. R. Rackwitz darf ich an dieser Stelle für die Übernahme des Koreferates meinen Dank aussprechen.

Bei dem Betriebsleiter des Instituts, Herrn Dipl.-Ing. P. von Soos sowie bei Herrn Dr.-Ing. D. Alber und nicht zuletzt bei meinem langjährigen Kollegen, Herrn Dipl.-Ing. B. Peintinger, möchte ich mich für die vielen Anregungen und Ratschläge bedanken. Sie alle zusammen haben durch viele Diskussionen mit wertvollen Hinweisen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Wolfgang Reitmeier

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1. 1.2.	Problemstellung - Setzungsdifferenzen auf homogenem Boden Erforderliches Rechenmodell zur Erfassung der räumlichen Schwankungen	1 2
2.	Mechanisches Bodenmodell zur Abschätzung des Setzungs- verhaltens zentrisch belasteter quadratischer Einzel- fundamente	3
2.1. 2.2. 2.3.	Ermittlung der Spannungen im Baugrund Formänderungsgesetz nach OHDE Bestimmung der Verformungen	5 9 14
3.	Stochastisches Bodenmodell	15
3.1. 3.2.	Zeitreihenanalyse ALBER/REITMEIER (1986) Theoretische Untersuchungen und rechentechnische Aufbereitung des ARIMA(1,1,1)-Prozesses nach ALBER	25 28
4.	Varianzreduktion gleitender Mittel	30
4.1. 4.2. 4.3. 4.4.	Prinzip der Varianzreduktion gleitender Mittel Varianzreduktion des ARIMA(1,1,1)-Prozesses Gewichtete Mittelbildung Gewichtete Korrelationsschätzung	30 33 35 39
5.	Quantifizierung von Setzungsdifferenzen	41
5.1. 5.2. 5.3.	Ableitung der ersten beiden Momente VAR(∆S) bzw. E(∆S) Abspaltung des Last-und Geometriefaktors f <sub>C</sub> bzw. f <sub>g</sub> Zusammenstellung der theoretischen Ergebnisse für die	41 46
5.4.	Einflußfaktoren f $_{\rm C}$ und f $_{\rm g}$ Abschätzung der zu erwartenden Setzungswerte bei vorgegebenem Zuverlässigkeitsniveau	
6.	Hilfsmittel zur einfachen Anwendung	50
6.1. 6.2. 6.3. 6.4.	Lastfaktor f <sub>C</sub> (Tabellen) Geometriefaktor fg (Bilder) Lineare Regression und Bayes-Ansätze Zahlenbeispiel	50 70 80 85
7.	Zusammenfassung und Wertung	89
8.	Anhang	91
9.	Literatur	93

#### 1. Einleitung

#### 1.1. Problemstellung - Setzungsdifferenzen auf homogenem Baugrund

Für die Beurteilung und Berechnung von Ingenieurbauwerken ist die richtige Erfassung des Gründungsverhaltens von großer Bedeutung. Darüber hinaus müssen die spezifischen Eigenschaften der zu gründenden Konstruktion und das Verhalten des Baugrunds als Einheit in die Entwurfsgestaltung mit einbezogen werden. Beide Einflüsse zusammen bestimmen letztlich die Sicherheit und Gebrauchsfähigkeit einer Konstruktion.

Neben der zulässigen Belastung bleibt hierbei die zu erwartende Verformung bzw. die Abschätzung der zu erwartenden Verformungsdifferenzen innerhalb eines Gründungssystems eine zentrale Fragestellung.

Setzungsunterschiede sind häufig Ursache für Schäden, so daß der entwerfende Ingenieur, auch im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit seiner Konstruktion, an einer möglichst zuverlässigen Abschätzung der auftretenden Setzungsdifferenzen interessiert sein muß.

In der vorliegenden Arbeit werden unter dem Begriff Setzungen bzw. Setzungsdifferenzen stets Endsetzungen, d. h. die Verformung des Korngerüsts nach vollständigem Abbau der Porenwasserüberdrücke verstanden. Der zeitliche Setzungsverlauf (Primärsetzungen) kann mit Hilfe der Konsolidationstheorie abgeschätzt werden und ist nicht Gegenstand der nachfolgenden Untersuchungen.

Prinzipiell sind bei den in der Praxis beobachteten Setzungsdifferenzen und den hierzu notwendigen Rechenmodellen zwei Fälle zu unterscheiden.

Verformungsunterschiede des Baugrunds, die durch unterschiedliche Belastungen, Gründungstiefen, Fundamentabmessungen oder geologische Störungen, wie z.B. Veränderungen der Schichtdicken einer am Setzungsverhalten beteiligten Bodenschicht, bedingt sind, können mit den in der Bodenmechanik bekannten Rechenverfahren unschwer bestimmt werden. Hierzu genügt es die lokalen Verhältnisse zu erkunden und mit Hilfe dieser Randbedingungen unter jedem Gründungskörper getrennt eine Verformungsberechnung durchzuführen.

Schwieriger gestaltet sich die Aufgabe, wenn ein Bauwerk auf homogenem Baugrund mit gleichen Fundamentabmessungen und Belastungen gegründet werden soll. Hier sind weitere Überlegungen notwendig.

Setzungsberechnungen mit identischen Randbedingungen müssen natürlich immer zu gleichen Ergebnissen führen. Dies bedeutet, daß mit den klassischen Rechenmodellen der Bodenmechanik keine Abschätzungen des unterschiedlichen Setzungsverhaltens auf geologisch homogenem Baugrund möglich sind.

Der Grund dafür liegt in dem Ansatz, daß durch die pauschale Zuordnung der Bodeneigenschaften zu einem festen, konstanten Zahlenwert, zufällige Schwankungen nicht erfaßt werden können.

Bei der überwiegenden Mehrzahl geotechnischer Berechnungen spielt dies eine untergeordnete Rolle, zumal sich durch geeignete Fraktilwerte eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung machen läßt.

Jede Fragestellung, bei der allerdings gerade diese Variabilität maßgeblichen Einfluß auf das Ergebnis haben muß, erfordert ein entsprechend angepaßtes Bodenmodell.

# 1.2. Erforderliches Bodenmodell zur Erfassung der räumlichen Schwankungen

Die Bodeneigenschaften variieren, bedingt durch den geologischen Entstehungsprozeß, auch innerhalb als homogen anzusprechender Bodenschichten, mehr oder weniger stark von Ort zu Ort. Interpretiert man diese real vorhandenen Schwankungen als zufällige Abweichung von einem festen Mittelwert, lassen sie sich global mit Hilfe des zweiten Moments, der Varianz, beschreiben.

Diese auf die Baustellengröße insgesamt bezogene quadratische Abweichung erlaubt allerdings keinerlei Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung der beobachteten Streuungen. Hierzu bedarf es eines Rechenmodells, das die stochastische Abhängigkeit als Funktion des Abstands zweier Punkte zueinander mit erfassen kann.

Der in Abschnitt 3 beschriebene ARIMA(1,1,1) - Prozeß ist in der Lage, die als Streuungen interpretierten Schwankungen und deren räumlich statistische Abhängigkeit zu beschreiben.

Damit existiert ein Modell für den Baugrund, das sowohl den Mittelungseinfluß für das am Verformungsverhalten beteiligte Bodenvolumen, als auch die durch den Abstand bedingte Abhängigkeit der Fundamentverformung zueinander mit erfassen kann.

# 2. Mechanisches Modell zur Abschätzung des Setzungsverhaltens zentrisch belasteter quadratischer Einzelfundamente

Die Vorhersage von Setzungen und Setzungsdifferenzen ist vor allem bei statisch unbestimmten Konstruktionen ein wichtiger Bestandteil der Berechnung zur Beurteilung des Tragvermögens einer Konstruktion. In der Praxis weichen die errechneten Setzungen häufig, unabhängig von der Genauigkeit des verwendeten Rechenmodells, zum Teil erheblich von den in-situ gemessenen Verformungen ab. Diese unbefriedigende Diskrepanz hat verschiedene Ursachen.

Zum einen existiert nur für Sonderfälle ein exaktes Rechenmodell, das die in der Natur gegebene Schichtung bzw. Veränderlichkeit der Steifigkeitsverhältnisse des Baugrunds auch bei der Spannungsermittlung mit erfassen kann, zum anderen läßt sich für den Boden nur näherungsweise ein allgemein gültiges Spannungsverformungsgesetz formulieren. Vor allem aber die Tatsache, daß bei den im Labor bestimmten Bodenkenngrößen von sehr kleinen Referenzvolumen (Probenvolumen) auf den mehr als 1000fach größeren Einflußbereich der Bodenverformungen extrapoliert werden muß, ist hier als Haupteinfluß für die Unsicherheit von Setzungsvorhersagen anzusehen.

Geschlossene Lösungen setzen sowohl für die Spannungs- als auch die Verformungsberechnung Homogenität und teilweise auch Isotropie des Baugrunds voraus.

Die Kenntnis der Bodenparameter und hier wiederum die richtige Einschätzung der wahren Mittelwerte aus den jeweiligen Stichproben (PEINTINGER/REITMEIER, 1983) sind von großem Einfluß auf die Ergebnisse. Dies trifft auch auf Problemstellungen zu, bei denen die mittleren Eigenschaften eines Bruch- oder Verformungsbereichs Auskunft über die Zuverlässigkeit einer Konstruktion geben.



Bild 1 Häufigkeitsverteilung des Verhältnisses aus gemessener Setzung zu berechneter Setzung (LEUSSINK, 1963)

Der Vergleich von Setzungsmessungen mit den Ergebnissen von Setzungsberechnungen zeigt in Bild I vor allem bei bindigen Böden eine im Mittel gute Übereinstimmung von Rechnung und Messung. Aus diesem Grunde kann auch der Abminderungsbeiwert  $\alpha$  nach DIN 4019 Bl.1 für einfach verdichteten und leicht überverdichteten Ton mit eins angenommen werden.

Klassische Setzungsberechnungen gehen von deterministischen Bodenkenngrößen und Belastungen aus. Dabei werden die erforderlichen Sicherheiten durch Ab- bzw. Zuschläge der entsprechenden Eingangsgrößen berücksichtigt. Gründungskörper mit rechnerisch gleichen Abmessungen und Belastungen müßten demnach auf gleichem Boden identische Setzungen aufweisen. In der Praxis werden aber häufig auch bei vergleichbaren Randbedingungen unterschiedliche Verformungen beobachtet. Dies hat mehrere Ursachen.

Einerseits wird im allgemeinen der tatsächlich verbleibende Sicherheitsspielraum, das heißt der Unterschied der Rechengröße zu ihrer Realisierung, sowohl für die Last- als auch Bodenkenngrößen unterschiedlich sein, andererseits ist die Beschreibung des Baugrunds durch ein homogenes, isotropes Medium mit deterministischen Parametern eine starke Vereinfachung, die insbesondere zur Beurteilung von Setzungsunterschieden, bei sonst gleichen Verhältnissen, verlassen werden muß.

# 2.1. Ermittlung der Baugrundspannungen infolge einer zentrischlotrechten Belastung durch ein quadratisches Fundament

Zur Berechnung von Formänderungen müssen die wirksamen Spannungen bekannt sein. Da diese wiederum von den Formänderungseigenschaften abhängig sind bedeutet dies, daß wir eine statisch unbestimmte Aufgabe zu lösen haben. Für baupraktische Fragestellungen ist an eine exakte Lösung schon mangels eines hierfür notwendigen allgemein gültigen Spannungs-Dehnungs-Gesetzes nicht zu denken. Bei vorausgesetzter Gültigkeit der mathematischen Elastizitätstheorie (E = konstant) kann der Spannungszustand infolge einer an der Halbraumoberfläche angreifenden Einzellast vollständig beschrieben werden. Durch die elastischen Konstanten E und  $\mu$  ist das elastische Verhalten eines Körpers vollständig bestimmt, wobei die Querdehnung  $\mu$  den Bereich des Halbraums bestimmt, in dem Zugnormalspannungen auftreten.

Boussinesq hat bereits 1885 eine geschlossene Lösung für einen gewichtslosen, isotropen-, dem Hookschen Gesetz folgenden Körper, angegeben.

Dabei zeigt sich, daß die hieraus abgeleitete Vertikalspannung  $\sigma_z$  in waagrechten Ebenen von der Querdehnung  $\mu$  vollkommen unabhängig ist und somit für alle elastisch-isotropen Körper dieselbe sein muß. Für den Sonderfall  $\mu = 0.5$ , also volumenkonstante Formänderung, treten in keinem einzigen Punkt des elastisch-isotropen Halbraums Zugspannungen auf. Dies bedeutet, daß diese Spannungsverteilung auch dann möglich ist, wenn ein Stoff keine Zugfestigkeit besitzt.

Versuche haben gezeigt, daß die durch eine lotrechte Last hervorgerufenen Bodenspannungen in der Nähe der Belastungslotrechten größer und in größerem seitlichen Abstand von dieser Lotrechten kleiner sind, als die nach Boussinesq ermittelten Spannungen. Demnach ist die seitliche Verteilung bzw. Lastausstrahlung nicht so groß als von Boussinesq angegeben.

Auch ist es zur besseren Beschreibung der Druckverhältnisse im Baugrund erforderlich, die für die Anwendung der mathematischen Elastizitätstheorie vorausgesetzte Isotropie in elastischer Hinsicht zu verlassen.

Bei zugrundegelegter Gültigkeit einer geradlinigen Kraftausbreitung hat Fröhlich 1934 eine Lösung vorgeschlagen, die einen möglichen und statisch einwandfreien Spannungszustand beschreibt.

-6-

Streng gültig bei volumenkonstanter Verformung, also z.B. wassergesättigte Böden mit einer Querdehnungszahl von  $\mu$  = 0.5, treten rechnerisch keine Zugspannungen auf.

Auf den Baugrund übertragen ist das Prinzip der geradlinigen Kraftausbreitung aber auch nach MITCHELL für Querdehnungen zwischen  $\mu = 0.5$ und  $\mu = 0.25$  näherungsweise anwendbar, da die Abweichungen unmittelbar unter dem Gründungskörper, also nahe der Lastachse, sehr gering bleiben. Für praktische Fragestellungen ist es daher berechtigt, das Prinzip der geradlinigen Kraftausbreitung auch für  $\mu \leq 0.5$  anzuwenden.

Der Wert der Fröhlich'schen Druckverteilungstheorie liegt vor allem aber darin, daß bestimmte Zusammenhänge zwischen dem Formänderungsgesetz des Untergrunds und der sogenannten Ordnungszahl  $\overline{\nu}$  aufgezeigt werden können.

Die Gleichungen sind für  $\overline{v}$  = 3 identisch mit der Lösung von Boussinesq und berücksichtigen bei der Spannungsausbreitung für  $\overline{v}$  = 4 einen linear mit der Tiefe anwachsenden Steifemodul E<sub>e</sub>.

Ohne die Vorgabe geschlossene Lösungen zu erarbeiten verlassen zu müssen, kann somit auch bei der Spannungsverteilung im Halbraum der Einfluß des mit der Tiefe veränderlichen Steifemoduls  $E_s(z)$  berücksichtigt werden.

Reibungskräfte bzw. -spannungen in der Sohlfuge sind nach innen gerichtet, da die Körner des Lockergesteins nach außen gepreßt werden. Die dadurch entstehende Erhöhung der lotrechten Normalspannungen kann durch eine Erhöhung von  $\overline{v}$  berücksichtigt werden. Wenn sich die plastischen Gebiete erst anfangen zu bilden, liegt der Konzentrationsfaktor  $\overline{v}$  nur wenig über 3. Hat sich aber unter der Lastfläche ein geschlossener Kern gebildet, der von einem plastischen Gebiet umhüllt ist und sich vergrößert, so ist  $\overline{v} >> 3$  anzusetzen. Die Ordnungszahl bzw. der Konzentrationsfaktor  $\overline{v}$  ist ein Maß für die Konzentration der Spannungen um die Lastachse und deren Umgebung. Eine Erhöhung bedeutet somit auch die Berücksichtigung von in größeren Tiefen gelegenen steiferen Bodenschichten (KOLLBRUNNER; FRÖHLICH).

Boussinesq und Fröhlich belasten zur Ableitung ihrer Spannungen den Halbraum mit einer lotrechten Einzellast.

Durch Integration über alle Elemente einer belasteten Fläche ergibt sich daraus der Spannungszustand unter einem Gründungskörper.

Integriert man die Lösung von Fröhlich über eine quadratische Lastfläche b<sup>2</sup>, so lassen sich für einen Konzentrationsfaktor von  $\overline{v} = 4$  die nachfolgenden geschlossenen Lösungen der Spannungen  $\sigma_z$ ,  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$  unter dem Mittelpunkt M, also entlang der Lastachse, eines quadratischen, mit  $\sigma_0$  zentrisch belasteten Einzelfundaments wie folgt angeben:

$$\sigma_{z} = 2\frac{\sigma_{0}}{\pi} \left[ \left(2 + \frac{1}{1 + \left(\frac{b}{2z}\right)^{2}}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2z}{b}\right)^{2}}} \cdot \arctan \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2z}{b}\right)^{2}}} + \frac{1}{1 + \left(\frac{2z}{b}\right)^{2}} + \frac{1}{1 + \left(\frac{2z}{b}\right)^{2}} \cdot \frac{1}{1 + 2\left(\frac{b}{2z}\right)^{2}} \right]$$

$$\sigma_{x} = \sigma_{y} = \frac{\sigma_{0}}{\pi} \left[ \left(1 + \frac{1}{1 + \left(\frac{2z}{b}\right)^{2}}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2z}{b}\right)^{2}}} \cdot \arctan \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2z}{b}\right)^{2}}} - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{2z}{b}\right)^{2}\right)^{2}} - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{2z}{b}\right)^{2}\right)^{2}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{2z}{b}\right)^{2}\right)^{2}}\right]$$

$$(2.2)$$

#### 2.2. Formänderungsgesetz des Bodens nach OHDE

Die Verformungseigenschaften des Bodens bzw. die für ihre mathematische Beschreibung abgeleiteten Kenngrößen streuen zum Teil erheblich. Insbesondere bei vorbelasteten Böden lassen sich Störungen des Bodengefüges bei der Probennahme nicht ganz vermeiden, so daß die Laborergebnisse zusätzlich, gegenüber denjenigen, am ungestörten Boden ermittelten Werten, abweichen. Darüber hinaus ergeben sich allein aus statistischer Sicht Unsicherheiten über die Einschätzung des Verformungsverhaltens, da in der Praxis von einem sehr kleinen Probenvolumen Aussagen extrapoliert werden müssen.

Für die Erstbelastung hat TERZAGHI 1925 aufgrund der von ihm durchgeführten Versuche eine allgemeine Gleichung zur Beschreibung des Verformungsverhaltens des Bodens angegeben. Diese Gleichung enthält mehrere Parameter, die den örtlichen Verhältnissen des jeweiligen Bodens anzupassen sind.

Auch im Hinblick auf die angestrebte Einbeziehung der Formänderungseigenschaften auf die Spannungsverteilung im modifizierten Elastischen-Halbraum ist aber diese mathematische Form für die weiteren Untersuchungen nicht geeignet.

OHDE hat 1939 aufgrund von umfangreichen Versuchen durch einen Potenzansatz ein allgemein gültiges Verformungsgesetz formuliert, das in der vereinfachten Form (Gleichung 2.3) nur zwei Parameter enthält.

$$E_s = v_s \sigma^w \tag{2.3}$$

10 01

Trägt man den Steifemodul  $E_s$  in Abhängigkeit der Spannung  $\sigma$  in doppelt-logarithmischem Maßstab auf, ergibt sich eine unter tan  $\alpha$  = w geneigte Gerade. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht vor allem in einem quantifizierbaren Zusammenhang zwischen der Ordnungszahl  $\overline{v}$  (FRÖHLICH) und der Veränderlichkeit des Steifemoduls E<sub>s</sub> mit der Tiefe. Mit Hilfe der Formänderungsarbeit zeigt OHDE (1939) einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem Konzentrationsfaktor  $\overline{v}$  und dem Exponenten w (Gleichung 2.3) auf.

Die lineare Beziehung (Gleichung 2.4) schließt auch die von FRÖHLICH angegebenen Grenzfälle  $E_s$  = konst. für  $\sqrt{v}$  =3 mit w = 0 und  $E_s$  linear mit der Tiefe zunehmend für  $\sqrt{v}$  = 4 (w = 1) mit ein.

$$\bar{\nu} = 3 + w \tag{2.4}$$

Der Einfluß von w auf den Steifemodulverlauf E<sub>s</sub>(z) ist in Bild 2 für die erweiterte Darstellung nach Gleichung (2.6) qualitativ dargestellt.



Bild 2 Einfluß von w auf den Steifemodulverlauf  $E_{s}(z)$ 

Beschränkt man sich auf die Beschreibung bindiger, tonreicher Böden, sowie Torf und Faulschlamm ohne Sandgehalt (OHDE, 1939), so vereinfacht sich Gleichung (2.3) mit w = 1 zu:

$$E_s = v_e \sigma \tag{2.5}$$

Im allgemeinen Fall befindet sich die Fundamentsohle des Bauwerks nicht an der Oberfläche des Baugrunds, sondern in einer gewissen Tiefe d. Diese Randbedingung, sowie die Forderung, daß der Steifemodul auch bei sehr kleinen Spannungen von Null verschieden sein muß, kann mit dem Ansatz

$$E_s = v_e(\sigma + \sigma_c) \tag{2.6}$$

berücksichtigt werden.

Hierin lassen sich durch das Korrekturglied  $\sigma_c$  beide Randbedingungen bequem berücksichtigen.  $\sigma_c$  erfaßt also, wie in Bild 3 dargestellt, sowohl den Korrekturanteil für E<sub>s</sub>( $\sigma$ =0), als auch den durch die Einbindetiefe d gegebenen Zuwachs der Steifigkeit.



Bild 3 Skizze der Spannungsanteile für ein in der Tiefe d gegründetes Flachfundament (wirksame Sohlnormalspannung =  $\sigma_0 - \gamma d$ )

Der in der Literatur als Verdichtungsbeiwert v<sub>e</sub> bezeichnete Parameter in Gleichung (2.6) ist aus Versuchsdaten (z. B. Kompressionsversuch) direkt oder soweit dies aus wirtschaftlichen Gründen nicht möglich ist z. B. durch Regressionsrechnung mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Informationen abzuschätzen (siehe Abschnitt 6.3.). Seine Größenordnung gibt v. SOOS (1980) für Tone zwischen fünf und zwanzig an.

Mit verschiedenen Regressionsansätzen hat KOPPULA (1978) eine statistische Auswertung der Versuchsergebnisse von 134 Kompressionsversuchen an bindigen Böden, vorwiegend aus der Provinz Alberta/Kanada, vorgenommen.

Seine Untersuchungen konzentrieren sich auf die Bestimmung des Kompressionsindexes C<sub>c</sub> bzw. die empirische Abhängigkeit zwischen C<sub>c</sub> und anderen Bodenkenngrößen wie natürlicher Wassergehalt w<sub>n</sub>, Anfangsporenzahl e<sub>n</sub> oder Plastizitätsgrenzen.

Bei bekannter Anfangsporenzahl e $_0$  kann der Kompressionsindex C $_c$  durch die in Gleichung (2.7) wiedergegebene Beziehung in den Verdichtungsbeiwert v $_c$  umgerechnet werden.

$$v_e = 2, 3\frac{1+e_0}{C_c} = 2, 3\frac{1}{C_r}$$
(2.7)

(C<sub>r</sub> wird als Kompressionsverhältnis (compression ratio) bezeichnet)

SKEMPTON zeigt 1944 an Tonproben, die aus verschiedenen Teilen der Welt stammen, eine statistische Abhängigkeit des Kompressionsindexes C\_ von der Fließgrenze w<sub>f</sub> auf.

Dieser in den Gleichungen (2.8a) bzw. (2.8b) wiedergegebene Zusammenhang ermöglicht eine erste Abschätzung der Verformungseigenschaften; ist aber für die weitere Bearbeitung nicht geeignet, da die statistische Zuverlässigkeit der Regression, im Besonderen die Korrelation r und damit die mittlere Abweichung der Zielgröße von der Regressionsgeraden nicht angegeben wird.

$$C_c = 0,007(w_l - 10\%) \tag{2.8a}$$

bzw.

10 0-1

$$C_c = 0,009(w_l - 10\%) \tag{2.8b}$$

a) gestörte Tone b) normal vorbelastete Tone

KOTZIAS untersucht 1961 unter anderem den Zusammenhang der Anfangsporenzahl  $e_0$  mit dem Verdichtungsbeiwert  $v_e$  für rheinischen Schluff und vergleicht die gewonnenen Ergebnisse mit den von OHDE (1951) angegebenen Werten.

Dabei zeigt sich im Erstbelastungsast schwach bindiger Böden eine gute Übereinstimmung der Verdichtungsbeiwerte v\_.

In all diesen Arbeiten haben sich die Autoren bemüht, mit Hilfe von einfach durchzuführenden, zustandsbeschreibenden Versuchen Aussagen über das Verformungsverhalten des Bodens machen zu können.

Für die praktische Anwendung sei auf die in Abschnitt 6.3. zusammengestellten Hilfsmittel verwiesen.

# 2.3. Bestimmung der Verformungen infolge der zentrischen Belastung durch ein quadratisches Einzelfundament

Nach dem in DIN 4019 festgelegten Standardverfahren, wird die Setzung eines Gründungskörpers durch Integration der Dehnungen über die Tiefe z berechnet.

$$s = \int_{0}^{z} \epsilon_{z} dz \tag{2.9}$$

Bei vorausgesetzter Gültigkeit des Elastizitätsgesetzes folgt für isotrope Stoffeigenschaften und dem bekannten Zusammenhang zwischen den Spannungen und Dehnungen am Volumenelement

$$s = \int_{0}^{z} \frac{1}{E_{\sigma}} (\sigma_{z} - \mu \sigma_{x} - \mu \sigma_{y}) dz \qquad (2.10)$$

Der mit den Randbedingungen  $\epsilon_{\chi} = \epsilon_{y} = 0$  im Labor bestimmte Steifemodul  $E_{s}$  beschreibt das Verformungsverhalten für einen einaxialen Verformungszustand.

Mit Hilfe der vom jeweiligen Spannungszustand unabhängig angenommenen, also konstanten Querdehnung  $\mu$ , läßt sich daraus unschwer der für den einaxialen Spannungszustand definierte E-Modul (Gleichung 2.11) um-rechnen. Beide Größen E<sub>s</sub> und  $\mu$  sind zur Beschreibung des elastischen Halbraums erforderlich und durch Versuche bzw. Erfahrungswerte abzuschätzen.

$$E_{\sigma} = \frac{1 - \mu - 2\mu^2}{1 - \mu} E_s \tag{2.11}$$

Wählt man für die setzungsrelevante Bodenschicht einen mittleren, repräsentativen, vom Spannungsniveau unabhängigen Steifemodul, so vereinfacht sich die Integration auf die Bestimmung des Flächeninhalts der wirksamen Spannungen  $\sigma_x$ ,  $\sigma_v$  und  $\sigma_z$ .

Dieses Verfahren wird häufig in der Praxis als **überschlägige** Setzungsberechnung angewendet, setzt aber genau genommen voraus, daß bei der Abschätzung eines mittleren Steifemoduls die im Einzelfall zu berücksichtigende Schichttiefe mit einbezogen wird. Von der Zuverlässigkeit der dabei zwangsläufig zu treffenden Annahmen hängt in großem Maße auch die Genauigkeit der Ergebnisse ab.

Aufwendiger, aber auch genauer, ist die Berücksichtigung des mit der Spannung veränderlichen Steifemoduls bei der Integration. Im Unterschied zu der vorher beschriebenen Vorgehensweise entfällt die Abschätzung eines mittleren Steifemoduls und damit die vorweggenommene Überlegung über die zu berücksichtigenden Tiefen der setzungswirksamen Bodenschichten.

Bei der Integration wird sowohl das Spannungsniveau, bedingt durch die Einbindetiefe d, als auch der Einfluß der setzungswirksamen Spannungen auf die jeweilige Größe des Steifemoduls kontinuierlich mit erfaßt. Beschränken wir uns auf die geometrisch einfache Grundrißform von quadratischen Einzelfundamenten, folgt für die Verformung des Bodens mit den genannten Randbedingungen:

$$s = \int_{0}^{z} \frac{1}{E_{\sigma}} (\sigma_{z} - 2\mu\sigma_{x}) dz \qquad (2.12)$$

Für die Verformungsberechnung wird in jeder Tiefe z ein mittlerer Steifemodul in dem jeweiligen Spannungsintervall gebildet. Als Grenze für die Mittelbildung in jeder Schichttiefe z können hierfür die Spannung ( $\gamma \cdot z + \sigma_c$ ) und ( $\gamma \cdot z + \sigma_c + \sigma_z$ ) verwendet werden (siehe Bild 3).

-15-

Mit dieser verbesserten Erfassung des Verformungsverhaltens für die Schichtdicke dz folgt aus Gleichung (2.12)

$$s = \int_{0}^{z} \int_{0}^{\sigma_{z}} \frac{d\sigma}{E_{\sigma}} dz - 2\mu \int_{0}^{z} \int_{0}^{\sigma_{z}} \frac{d\sigma}{E_{\sigma}} dz$$
(2.13)

wobei die in Gleichung (2.5) vorgegebene Beschränkung auf w = 1 in dieser allgemeinen Form (Gl. 2.13) noch nicht erforderlich ist (Ableitung siehe Anhang).

Spaltet man für die Integration den in Gleichung (2.6) mit  $\sigma_{c}$  eingefügten Korrekturfaktor in seine beiden Anteile auf, so folgt mit

$$E_s = v_e(\sigma_c + \gamma z + \sigma) \tag{2.14}$$

und den zur dimensionslosen Darstellung erforderlichen Größen

$$C_1 = \frac{\gamma b}{\sigma_0} \qquad C_2 = \frac{\sigma_c}{\sigma_0} \tag{2.15}$$

für die Setzung eines quadratischen Einzelfundaments bei einer Einflußtiefe von z = T: (vereinfachend wird für die untere Integrationsgrenze bei den Spannungen  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$  mit  $k_0$  gleich eins gerechnet (siehe Ableitung im Anhang).

$$s = \frac{1-\mu}{1-\mu-2\mu^2} \cdot b \cdot \left\{\frac{1}{2} \int_{0}^{2\frac{T}{b}} \frac{1}{v_e} \ln[\frac{\frac{2}{\pi}(k_1k+h)}{0,5C_1t+C_2} + 1]dt - (2.16)\right\}$$

$$-\mu \int_{0}^{2\frac{T}{b}} \frac{1}{v_e} \ln[\frac{\frac{1}{\pi}(k_2k-h)}{0,5C_1t+C_2}+1]dt\}$$

$$k_{1} = 2 + \frac{1}{1+t^{-2}} \qquad k_{2} = 1 + \frac{1}{1+t^{2}}$$
$$k = \frac{1}{\sqrt{1+t^{2}}} \arctan \frac{1}{\sqrt{1+t^{2}}} \qquad h = \frac{1}{1+t^{2}} \frac{1}{1+2t^{-2}}$$

mit

In dimensionsloser Form erhält man nach elementarer Umformung und der Vereinfachung zu deterministischen Größen:

$$f_{c} = \frac{s \cdot v_{e}}{b} = \frac{1 - \mu}{1 - \mu - 2\mu^{2}} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \int_{0}^{2\frac{T}{b}} \ln[\frac{\frac{2}{\pi}(k_{1}k + h)}{0, 5C_{1}t + C_{2}} + 1]dt - \frac{\mu}{2} \int_{0}^{2\frac{T}{b}} \ln[\frac{\frac{1}{\pi}(k_{2}k - h)}{0, 5C_{1}t + C_{2}} + 1]dt \right\}$$

$$(2.17)$$

f<sub>c</sub> wird im weiteren als Lastfaktor bezeichnet und ist in Abschnitt 6 für die im Bauwesen interessierende Bandbreite tabelliert.

Vergleichsrechnungen mit konstantem Steifemodul haben gezeigt, daß vor allem bei großflächigen Gründungen und der damit verbundenen größeren Tiefenwirkung der setzungswirksamen Spannungen, eine geeignete Abschätzung des mittleren, repräsentativen Steifemoduls schwieriger wird.

Durch das bei der Integration der Verformungsberechnung (Gleichung 2.17) auch im Steifemodul berücksichtigte **Spannungsniveau**, lassen sich Last- und Bodenparameter nicht mehr vollständig von dem Integranden abspalten. Dieser Nachteil wird für die weitere Untersuchung aber dadurch aufgewogen, daß beim Vergleich von unterschiedlichen Lastflächen und Belastungen, also auch bei nicht einheitlicher Tiefenwirkung der setzungswirksamen Spannungen, Vorüberlegungen für die Abschätzung des Steifemoduls entfallen.

In Bild 4 sind die nach Gleichung (2.17) ermittelten Setzungswerte für  $\mu$  = 0.3 = konstant aufgetragen.



Bild 4 Setzungswerte quadratischer Einzelfundamente bei Berücksichtigung eines tiefenabhängigen Steifemoduls E<sub>s</sub>(z)

Hält man den Quotienten  $y/\sigma_0$  und die Sohlnormalspannung  $\sigma_0$  konstant, wird der Einfluß der Fundamentbreite b auf die Setzungswerte  $(s \cdot v_e)/b = f_c$  deutlich.

In der normierten Darstellung entsprechen einem festen Verhältnis z/bbei variierenden Fundamentbreiten natürlich immer unterschiedliche Mächtigkeiten der setzungsrelevanten Bodenschichten. Zum Vergleich der verschiedenen Fundamentabmessungen sind daher beispielhaft vier verschiedene Einflußtiefen z = T = const. strichliert eingetragen.

In Bild 5 wurden daraus, für drei Schichtdicken, die zugehörigen Absolutwerte aufgetragen.



Bild 5 Zugehörige Absolutwerte (Bild 4) von quadratischen Einzelfundamenten, bei Berücksichtigung eines tiefenabhängigen Steifemoduls E<sub>c</sub>(z)

Wie zu erwarten ist deutlich zu erkennen, daß bei kleinen Schichtdikken der Einfluß der Fundamentgröße auf die Setzungen, vor allem bei großflächigen Gründungen, stark abnimmt. Dies liegt vor allem daran, daß erst mit größerer Tiefe z unter der Gründungssohle eine spürbare Reduktion der setzungswirksamen Spannungen infolge der seitlichen Lastausstrahlung des (schlaffen) Gründungskörpers wirksam wird. Für kleine Schichtdicken sind daher Lasterhöhungen bei gleicher Flächenpressung, also Vergrößerung der Gründungsfläche und Belastung, ohne drastischen Einfluß auf das Setzungsverhalten.

Vereinfachend wurden die infolge von Steifigkeitssprüngen bei geschichtetem Baugrund bedingten Änderungen der Spannungen vernachlässigt.

Bei mächtigen setzungsempfindlichen Schichten kann durch die Vergrö-Berung der Gründungsfläche, zur Reduzierung der wirksamen Sohlnormalspannungen, nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand das Setzungsverhalten signifikant beeinflußt werden.

Zum Vergleich des Einflusses der Lastverteilung, bzw. deren Tiefenwirkung auf das Setzungsverhalten, sind für eine konstante Vertikallast auf weichem, verformungsempfindlichen Untergrund die Ergebnisse der verschiedenen Gründungsflächen in Abhängigkeit der Schichttiefe z/b in Bild 6 und Bild 7 dargestellt.







Bild 7 Zugehörige Absolutwerte der Setzungen (Bild 6) von quadratischen Einzelfundamenten (konstante Vertikallast auf verschiedenen Gründungsflächen)

Es zeigt sich ähnlich Bild 4 und Bild 5, daß bei den gewählten Bodenverhältnissen und Belastungen die Fundamentfläche um mehr als 500 % vergrößert werden müßte um die zu erwartende Setzung auf 50 % zu reduzieren. Auch bei einer Schichtdicke von nur fünf bzw. zehn Metern in diesem Beispiel wird der Einfluß einer kleineren Flächenpressung durch die größere Tiefenwirkung der Fundamentlasten nahezu aufgewogen.

Gründungsfähiger bindiger Boden muß nach DIN 1054 eine mindestens steife Konsistenz aufweisen. Dies bedeutet im allgemeinen ,daß der Boden durch einen Konsolidierungsprozeß auch an der Geländeoberfläche eine Mindeststeifigkeit E<sub>0</sub> erreicht hat. In den Berechnungen wurde diese Randbedingung mit C<sub>2</sub> =  $\sigma_c / \sigma_0$  erfaßt.

Der Einfluß der Vorbelastung bzw. des Korrekturgliedes  $\sigma_{\rm C}$  ist bei der Verformungsberechnung im besonderen für kleine Schichten dominant, da jedes Fundament unmittelbar unter der Gründungssohle die größten Verformungen verursacht. In Bild 8 sind die Setzungswerte bei konstanter Belastung und Geometrie in Abhängigkeit der Schichttiefen z/b für verschiedene Vorbelastungszustände aufgetragen.



Bild 8 Setzungswerte quadratischer Einzelfundamente bei Berücksichtigung eines tiefenabhängigen Steifemoduls (Einfluß der Vorbelastungszustände C<sub>2</sub> auf die Setzungswerte)

Es zeigt sich, daß vor allem im Grenzbereich gründungsfähiger Böden, also die Kurven mit sehr kleinen C $_2$ -Parametern, Flachfundamente große Verformungen erleiden.

Durch die Versuchsbedingungen ist bei der Ermittlung des Steifemoduls im Kompressionsapparat der Einfluß der Querdehnung mit berücksichtigt. Das bedeutet, daß jedem Zustand des Bodens (z.B. Sättigungsgrad) eine, wenn auch nicht deterministisch exakt bekannte Querdehnung  $\mu$  zugeordnet werden kann.

In Bild 8 wurde zur Abschätzung der Empfindlichkeit der Setzungswerte bezüglich der Querdehnung ein Kurvenverlauf auch mit  $\mu = 0,4$  eingetragen. Die durch die Schwankung der Querdehnung bedingte Streuung der Setzungswerte ist umso grösser, je kleiner die Vorbelastung  $\sigma_{c}$  als auch die Fundamentbreite b ausfällt.

Es ist möglich, die nach Gleichung (2.16) angegebene geschlossene Lösung in einzelne, von der Querdehnung unabhängige Anteile aufzuspalten.

Mit den Abkürzungen

$$f_z(rac{z}{b}, C_1, C_2) = rac{1}{2} \int\limits_{0}^{2rac{z}{b}} \ln[rac{2}{\pi}(k_1k+h)]{0, 5C_1t+C_2} + 1] dt$$

und

$$f_x(\frac{z}{b}, C_1, C_2) = \int_0^{2\frac{z}{b}} \ln[\frac{\frac{1}{\pi}(k_2k - h)}{0, 5C_1t + C_2} + 1]dt$$

folgt dann für die Setzung analog Gleichung (2.16):

$$s = \frac{1-\mu}{1-\mu-2\mu^2} \cdot \frac{b}{v_e} \cdot \{f_z(\frac{z}{b}, C_1, C_2) - \mu f_x(\frac{z}{b}, C_1, C_2)\} \quad (2.18)$$

### 3. Stochastisches Bodenmodell

#### 3.1. Zeitreihenanalyse ALBER/REITMEIER (1986)

Der Variationsbereich, innerhalb dessen die Eigenschaften eines zu beschreibenden Baustoffes streuen, ist auch bei homogen anzusprechenden Bodenarten mit den unvermeidlichen Toleranzen der meisten anderen Werkstoffe nicht zu vergleichen. Für den Baugrund lassen sich im Wesentlichen zwei Ursachen unterscheiden.

Gewachsene Böden sind das Ergebnis eines zeitlich langen Prozesses von Verwitterung und Ablagerung. Neben den dabei in der Natur gegebenen Zufälligkeiten ist auch innerhalb von üblichen Baustellengrößen mit systematischen Änderungen zu rechnen.

Diese systematischen Änderungen werden in der Statistik als Trend bezeichnet und können, sofern sie bekannt sind auch rechnerisch leicht erfaßt werden.

Dabei ist die Unterscheidung zwischen Trend und Zufallsschwankungen eine Frage des Maßstabs (siehe Bild 9).



#### Bild 9 Verlauf von Bodenkennwerten in horizontaler Richtung

Wie in Bild 9 dargestellt, können in Abhängigkeit der Länge des betrachteten Ausschnitts Veränderungen des Mittelwerts zufällig oder systematisch sein.

Da sich in der Praxis nur in Ausnahmefällen eine Aussage über die zu erwartenden Mittelwertsänderungen machen läßt, muß das stochastische Bodenmodell in der Lage sein, diese Randbedingungen befriedigend zu erfassen.

Wohl ist es möglich durch umfangreiche Probennahme in situ den innerhalb einer Baustelle veränderlichen Mittelwert der interessierenden Bodenkenngröße zu bestimmen, der hierzu notwendige Aufwand liefert aber gleichzeitig so viel Information über die örtlichen Verhältnisse, daß eine stochastische Betrachtungsweise überflüssig wird.

Es ist daher für die Anwendung und Verallgemeinerung der Ergebnisse sinnvoll, diese physikalisch nicht begründbaren und damit nicht vorhersagbaren Trends als stochastische Mittelwertsänderungen innerhalb des Bodenmodells mit zu erfassen.

Stochastische Bodenmodelle sind in der Literatur mehrfach vorgeschlagen worden. Dabei gehen die Verfasser häufig von einem gewählten Modell aus und bestimmen mit Hilfe von Zeitreihen die zugehörigen Parameter. (In Anlehnung an die einschlägige Literatur werden im Weiteren Versuchsergebnisse bzw. Daten, die aus den in gleichen Abständen untersuchten Bodenproben bestehen mit dem Begriff Zeitreihen bezeichnet auch wenn es sich hier im eigentlichen Sinne um eine Ortskoordinate handelt.)

Diese Vorgehensweise führt im Einzelfall zum Erfolg. Bislang war aber gerade die Übertragbarkeit der gewonnenen Parameter auch bei vergleichbaren Bodenarten unbefriedigend. Somit konnten auch keine allgemein gültigen Aussagen abgeleitet werden.

-26-

Erst durch umfangreiche Auswertungen von Zeitreihen an gewachsenen und geschütteten Böden ließ sich diese Lücke schließen.

Sowohl für bindige als auch für nichtbindige Bodenarten konnte mit Hilfe eines ARIMA(1,1,1) - Prozesses die beste Übereinstimmung des Datenmaterials mit dem theoretischen Modell erzielt werden.

Andere Prozesse mögen im Einzelfall auch schärfere Aussagen zulassen. Die Frage der Übertragbarkeit auf möglichst alle Zeitreihen und insbesondere auch auf andere Bodenparameter sollte hier jedoch zur Ableitung allgemein gültiger Aussagen im Vordergrund stehen. Daher ist es sinnvoll, für die gestellte Aufgabe ein ausreichend robustes Modell zu wählen, auch wenn in Einzelfällen mit auf die jeweiligen Baustellenverhältnisse spezifisch angepaßten Modellen schärfere Aussagen denkbar sind.

Der ARIMA(1,1,1)-Prozeß kann in der Box/Jenkins-Schreibweise geschrieben werden:

$$z_t - (1+\phi)z_{t-1} + \phi z_{t-2} = a_t - \Theta a_{t-1}$$
(3.1)

Die Parameter  $\phi$  und  $\Theta$  steuern den Autoregressiven- bzw. Moving-Average Anteil und können aus den gemessenen Zeitreihen geschätzt werden.

Dieses stochastische Modell entsteht quasi durch lineare Filterung von zufälligen Streuungen a<sub>t</sub>, die üblicher Weise normalverteilt angenommen werden.

Die stochastische Abhängigkeit einer Realisierung bzw. Bodenkenngröße im Abstand t von einer Realisierung (t-1) ergibt sich aus den Parametern  $\phi$  und  $\Theta$ . Trägt man diese stochastische Abhängigkeit als kontinuierliche Funktion des Abstands auf, so entsteht die Autokorrelationsfunktion. Da die Probe mit sich selbst identisch ist und die Korrelationskoeffizienten entsprechend ihrer Definition zwischen +1 und -1 liegen müssen, bedeutet dies für den Abstand Null eine Korrelation von +1.

Bei der Berechnung der Fundamentverformungen interessieren nur die mittleren Eigenschaften repräsentativ für das an der Verformung beteiligte Bodenvolumen.

Würde man die statistisch-räumliche Abhängigkeit der Bodeneigenschaften vernachlässigen, führte dies vor allem bei der Mittelbildung zu einer drastischen Reduzierung der tatsächlich vorhandenen Streuungen. Damit lägen die Ergebnisse auf der "unsicheren" Seite und sind somit nicht brauchbar.

Insbesondere für die Abschätzung der zu erwartenden Setzungsdifferenzen und der hierfür notwendigen Korrelationsberechnungen sind analytische Aussagen über die räumlich-statistische Abhängigkeit der Bodeneigenschaften unerlässlich.

Dies ist mit dem von ALBER/REITMEIER (1986) vorgestellten Bodenmodell möglich, wobei die Parameter  $_{\phi}$  und  $_{\odot}$  auf alle Bodenkenngrößen übertragen werden können.

# 3.2. Theoretische Untersuchungen und rechentechnische Aufbereitung des ARIMA(1,1,1)-Prozesses nach ALBER (1987)

Aufgrund seiner Instationarität ist die Autokovarianz des ARIMA(1,1,1) Prozesses ortsabhängig. Um daher nutzbare Ergebnisse zu erhalten muß der instationäre ARIMA(1,1,1) - Prozeß in einen stationären übergeführt werden.

Bodeneigenschaften interessieren innerhalb des Gebietes, den das Bauwerk bzw. die Baustelle einnimmt. Das heißt, der Zufallsprozeß braucht nur innerhalb dieses begrenzten Bereichs betrachtet werden.
Diese gewissermaßen erzwungene Stationarität gewährleistet einen konstanten Mittelwert und die Invarianz der Kovarianzmatrix gegen räumliche Verschiebungen.

Bei Beschränkung auf die ersten beiden Momente hat ALBER (1987) aufgezeigt, daß sich der ARIMA(1,1,1) - Prozeß durch einen stationären AR(1) - Prozeß mit unabhängigem Mittelwertsprozeß (random walk) ersetzen läßt.

Beide Anteile lassen sich, da unkorreliert, hinsichtlich der Momente getrennt untersuchen.

Mit dem Quotienten p aus den Varianzen des stationären und instationären Anteils

$$p = \frac{VAR[\text{Mittelwertsproze}\beta]}{VAR[\text{AR}(1)-\text{Proze}\beta]}$$
(3.2)

und der Erweiterung auf räumliche Verhältnisse folgt für die Autokorrelationsfunktion des Gesamtprozesses

$$\varrho(\xi) = \frac{1}{1 + p(1 + \frac{B}{A} + \frac{C}{A})} \cdot \{e^{-\Delta|\xi|} + p(1 + \frac{B}{A} + \frac{C}{A})\varrho_{\mu}(\xi)\} \quad (3.3)$$

mit

$$arrho_{\mu}(\xi) = [2(1 - rac{\mid \xi \mid}{A + B + C})^2 - 1] \cdot$$

$$\cdot \left[1 - \frac{|\xi|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \left(1 + \frac{B + C}{4A} \cdot \left(1 - \frac{\xi^2}{A^2 + B^2 + C^2}\right)\right)\right] \quad (3.4)$$

wobei A, B, C für die Abmessungen des Bezugsvolumens (Untersuchungsbzw. Baustellengröße) steht. Damit stehen die für die rechentechnische Bearbeitung erforderlichen Hilfsmittel zur Verfügung, so daß insbesondere auch bei der Mittelbildung geschlossene Lösungen angegeben werden können.

## 4. Varianzreduktion gleitender Mittel

### 4.1. Prinzip der Varianzreduktion

Für die analytische Bearbeitung geotechnischer Aufgaben ist eine rechentechnische Aufbereitung der stochastischen Prozesse erforderlich. Bei den Fragestellungen des Grundbaus haben wir es mit einem Kontinuum zu tun, in dem örtliches Versagen nur in wenigen Ausnahmefällen zum Versagen des Gesamtsystems führt (v. SOOS, 1978). Es interessieren daher weniger die Eigenschaften an einem einzelnen gedachten Punkt innerhalb des am Bruch- bzw. Verformungsverhalten beteiligten Bodenkörpers.

Die Abschätzung des Gesamtsystems, also der Belastbarkeit von parallel geschalteten Widerständen, ist bei sogenannten Mittelungsaufgaben erforderlich.

Umfangreiche Untersuchungen der Varianzreduktion gleitender Mittel wurden von VANMARCKE (1977, 1979) für verschiedene Autokorrelationsfunktionen durchgeführt.

Zur einfachen Handhabung führte VANMARCKE den Varianzreduktionsfaktor

$$\Gamma^{2}(\Delta w) = \frac{VAR[u_{\Delta w}]}{VAR[y_{t}]}$$
(4.1)

ein, der die Abnahme der Varianz eines Kennwerts quantifiziert, wenn er durch Mittelung auf ein größeres Volumen bezogen wird, als demjenigen, an dem er versuchsmäßig bestimmt wurde. Der Quotient  $\Gamma^2(\Delta w)$  wird

-30-

-31-

um so kleiner, je größer das Volumen (Fläche) des Bruch- bzw. Verformungskörpers angenommen werden kann.

Interessieren also die stochastischen Eigenschaften innerhalb eines geometrisch bekannten Volumens, so berechnet sich die zugehörige Varianz durch Multiplikation der Varianz des ursprünglichen Prozesses mit dem Reduktionsfaktor  $\Gamma^2(\Delta w)$  (vereinfachend wird der Mittelungsbereich  $\Delta w$  im weiteren kurz w genannt). Die ersten beiden Momente des durch die Mittelbildung gedanklich neu entstehenden Prozesses u(w) lassen sich bei vorausgesetzter Stationarität elementar wie folgt berechnen:

Der Erwartungswert E(u(w)) des Prozesses

$$u_w = \frac{1}{w} \int_0^w y_t dt \tag{4.2}$$

ist wegen

$$E[\frac{1}{w}\int_{0}^{w} y_{t}dt] = \frac{1}{w}\int_{0}^{w} E[y_{t}]dt = \frac{1}{w}E[y_{t}]\int_{0}^{w} dt = E[y_{t}]$$
<sup>(4.3)</sup>

gleich dem Erwartungswert des ursprünglichen Prozesses y<sub>t</sub>.

Für die Varianz folgt mit der bekannten Umformung:

$$VAR[u_w] = E[u_w^2] - E^2[u_w]$$
(4.4)

Damit ergibt sich mit (4.2) und der Umbenennung einer Integrationsvariablen

$$E[(\frac{1}{w}\int_{0}^{w}y_{t}dt)^{2}] = \frac{1}{w^{2}}\int_{0}^{w}\int_{0}^{w}E[y_{t}y_{s}]dtds$$
(4.5)

Da für die Kovarianz

$$COV[y_t, y_s] = E[y_t \cdot y_s] - E[y_t] \cdot E[y_s]$$
(4.6)

geschrieben werden kann, folgt mit Gleichung (4.7)

$$COV[y_t, y_s] = \rho_{y_t}(t-s) \cdot \sigma_{y_t} \cdot \sigma_{y_s}$$
(4.7)

als geschlossener Ausdruck für die Varianz des Mittelungsprozesses u(w)

$$VAR[u(w)] = \frac{1}{w^2} \cdot VAR[y_t] \int_0^w \int_0^w \varrho_{y_t}(t-s)dtds \qquad (4.8)$$

Das in Gleichung (4.8) zu lösende Doppelintegral gilt für den eindimensionalen Fall und erweitert sich auf sechs Dimensionen für die Mittelbildung eines Quaders mit den Abmessungen a\*b\*c (siehe Gleichung 4.10).

Bezeichnen wir den räumlichen Abstand von Bodenproben mit der Länge d, so gilt für den AR(1) - Prozeß und homogenen Bodenverhältnissen

$$\varrho_{AR} = e^{-\Delta|d|} \tag{4.9}$$

Nach BAECHER/VENEZIANO (1981) ist der AR(1) - Prozeß für stochastisch isotrope Verhältnisse in jeder beliebigen Dimension zulässig, so daß bei Erweiterung auf drei Dimensionen auch der Prozeßparameter unverändert übernommen werden kann (siehe ALBER, 1987). Damit ergibt sich für die Varianz des gemittelten autoregressiven -Prozeßanteils:

$$VAR = [u(w)] =$$

$$\frac{1}{V^2} \int_0^a \int_0^a \int_0^b \int_0^b \int_0^c \int_0^c e^{-\Delta \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + (x_3 - y_3)^2}} dx_1 dx_2 dx_3 dy_1 dy_2 dy_3$$

Diese in Gleichung (4.10) angegebene numerische **Faltung** bedingt einen erheblichen Rechenaufwand, so daß sich auch bei modernen Rechenanlagen unserer Tage lange Rechenzeiten nicht vermeiden lassen.

In der vorliegenden Arbeit wurde dies aber bewußt in Kauf genommen, da vor allem bei kleinen räumlichen Abständen die VANMARCKsche Approximation der Varianzreduktion eines Quaders mit den Seitenlängen a\*b\*c

$$\Gamma^2_{AR}(a,b,c) = \frac{8}{abc\Delta^3} \qquad \text{für a,b,c} \ge \frac{2}{\Delta}$$
(4.11)

unbefriedigende Genauigkeit zur Folge hätte.

## 4.2. Varianzreduktion des ARIMA(1,1,1) - Prozesses

Da sich nach ALBER (1987) der ARIMA(1,1,1) - Prozeß in zwei miteinander nicht korrelierte Anteile aufspalten läßt, können auch die durch Mittelung entstehenden Varianzreduktionen voneinander getrennt berechnet werden.

Mit Hilfe der in ALBER/REITMEIER (1986) untersuchten Zeitreihen läßt sich zeigen, daß für den stationären Anteil, also den AR(1) - Prozeß,

die Baustellengröße als Bezugsmaßstab nicht unmittelbar erforderlich ist.

Der AR(1) - Anteil beschreibt also im Wesentlichen die um einen veränderlichen Mittelwert beobachteten zufälligen Streuungen.

Dagegen muß bei dem instationären Prozeßanteil die Baustellengröße als Bezugsmaßstab sowohl in der Autokorrelationsfunktion, als auch der damit abgeleiteten Varianzreduktionsfunktion mit erfaßt werden.

ALBER gibt für die Varianzreduktion eines Quaders mit den Seitenlängen a\*b\*c innerhalb der Baustelle mit den Abmessungen A\*B\*C die Varianzreduktionsfunktion des instationären Mittelwertprozesses an mit

$$\Gamma^2_{\mu}(a,b,c) \simeq (1 - \frac{a+b+c}{A+B+C})^2$$
(4.12)

Mit dem nach ALBER in Gleichung (3.2) definierten Prozeßparameters p und der Erweiterung auf drei Dimensionen folgt für die Varianzreduktion des ARIMA(1,1,1) - Prozesses als Summe der Gleichungen (4.10) und (4.12) somit

$$\Gamma_{ARIMA}^{2}(a,b,c) = \frac{1}{1+p(1+\frac{B}{A}+\frac{C}{A})} \cdot (4.13)$$

$$\cdot \{\frac{1}{(abc)^{2}} \int_{0}^{a} \int_{0}^{a} \int_{0}^{b} \int_{0}^{c} \int_{0}^{c} \int_{0}^{c} e^{-\Delta\sqrt{(x_{1}-y_{1})^{2}+(x_{2}-y_{2})^{2}+(x_{3}-y_{3})^{2}}} dx_{1} dx_{2} dx_{3} dy_{1} dy_{2} dy_{3} + p(1+\frac{B}{A}+\frac{C}{A}) \cdot (1-\frac{a+b+c}{A+B+C})^{2}\}$$

#### 4.3. Gewichtete Mittelbildung

Die in Gleichung (4.13) wiedergegebene Varianzreduktion berücksichtigt bei der Mittelbildung alle Raumpunkte mit der gleichen Wertigkeit.

Dies wäre dann der Fall, wenn v $_{\rm e}$  als von z unabhängige Größe vor das Integral (Gleichung 2.16) gezogen werden könnte.

Der Integrand in Gleichung (2.16) besteht aber bei stochastischer Betrachtung aus dem Produkt von zwei miteinander nicht korrelierten, aber jeweils von z bzw. t abhängigen Anteilen.

Dies bedeutet, daß durch die Formulierung von v<sub>e</sub> als stochastischen Prozeß nun auch eine von z abhängige Bodenkenngröße entsteht, so daß bei der Mittelbildung v<sub>e</sub>(z) nicht mehr von dem Integranden getrennt betrachtet werden kann.

Im Unterschied zu den nach Gleichung (4.2) bis (4.8) berechneten Momenten  $E(u_{(w)})$  und  $VAR(u_{(w)})$  wird der stochastische Prozeß y(t) hier mit einem ortsabhängigen Faktor f(t) **zusammen** integriert.

Damit entsteht faktisch eine unterschiedliche Gewichtung der bei der Mittelbildung zu berücksichtigenden Raumpunkte.

Für die Bestimmung der von z abhängigen Gewichtungsfaktoren wird das am Verformungsverhalten zu berücksichtigende Bodenvolumen in n gleiche Abschnitte aufgeteilt. Diskretisiert man die Spannungsflächen von  $\sigma_z$ und  $\sigma_x$  in Form einer Treppenfunktion, so ergeben sich abschnittsweise für die Gewichtungsfaktoren unter dem Integral konstante, von z unabhängige Ausdrücke. Das Integral wird also durch eine endliche Summe ersetzt.

Jeder Summand besteht aus dem Produkt der in diesem Abschnitt durch Prozeßmittelung zu bestimmenden Zufallsvariablen mit dem zugehörigen Gewichtungsfaktor.

-35-

Dies bedeutet, daß sich bei der gewichteten Mittelbildung die Wichtungsfaktoren aus dem Verhältnis der im jeweiligen Abschnitt gelegenen Spannungsfläche zur Spannungsfläche aller Abschnitte des am Verformungsverhalten berücksichtigten Bodenvolumens insgesamt bestimmen lassen.

 $V_{e}(z)$  kann nach Gleichung (4.13) innerhalb der Volumenabschnitte ungewichtet gemittelt werden. Ebenso darf die statistische Abhängigkeit der einzelnen Abschnitte untereinander, ungewichtet, mit der von VANMARCKE angegebenen Beziehung (Gleichung 4.20) berechnet werden.

Damit lassen sich mit den bekannten Gleichungen (5.3) bzw. (5.5) näherungsweise die ersten beiden Momente der zu erwartenden Fundamentsetzungen S unter Berücksichtigung der erforderlichen Gewichtung berechnen.

Durch den funktionalen Zusammenhang der Verteilungsparameter von V<sub>ei</sub> und S läßt sich der Einfluß der gewichteten Mittelbildung auf die Varianzreduktion von V<sub>e</sub> abspalten. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die in Abschnitt 5.2. beschriebene Trennung der Einflußgrößen in einen Geometrie- und Lastanteil vorteilhaft.



# Bild 10 Spannungsverteilung bzw. Aufteilung zur gewichteten Mittelbildung

In dem Bestreben, geschlossene analytische Ausdrücke mit vertretbarem Rechenaufwand abzuleiten, wird die maßgebliche Spannungsfläche für die Mittelbildung linearisiert und in einzelne Abschnitte aufgeteilt (siehe Bild 10).

Innerhalb dieser Abschnitte kann mit dem in Abschnitt 4.2. beschriebenen Verfahren die Varianzreduktion von V $_{\rm em}$  und die Kovarianzmatrix von V $_{\rm emii}$  berechnet werden.

Die Summe über alle n Abschnitte, also die Varianzreduktion des gesamten Volumens unter Berücksichtigung der durch die linearisierte Spannungsfläche vorgegebenen Gewichtung kann nach BAECHER mit Gleichung (4.14) berechnet werden.

$$VAR[V_{e_{GM}}] = \underline{p}^{T} \cdot \underline{\underline{C}}_{\underline{V_{emij}}} \cdot \underline{\underline{p}}$$
(4.14)

Hierin bezeichnet der Vektor p die Gewichtungsanteile der einzelnen Abschnitte.

Mit der Randbedingung

$$\sum_{i=1}^{n} p_i = 1,0 \tag{4.15}$$

 $0 \le p_i \le 1,0 \tag{4.16}$ 

und

folgt für die Gewichtungsfaktoren bei Aufteilung der Spannungsfläche in z.B. drei Abschnitte 5/9, 3/9 und 1/9.

Mit Hilfe der Kovarianzmatrix wird die stochastische Abhängigkeit der einzelnen Abschnitte untereinander erfaßt.

Je kleiner die Abschnitte gewählt werden, desto genauer lassen sich natürlich auch die Spannungsflächen diskretisieren.

Vereinfacht man jedoch bei der gewichteten Mittelbildung die setzungswirksamen Spannungen in der beschriebenen Weise, ist auch bei einer feineren Unterteilung der Spannungsfläche nur noch eine unverhältnismäßig geringe Zunahme der Varianzreduktion für V<sub>e</sub> möglich. Darüber hinaus liegt diesbezüglich eine numerische Vereinfachung auf der sicheren Seite, da sich durch eine größere Varianz auch größere Setzungsdifferenzen ergeben.

Zudem steigt der erforderliche Rechenaufwand bei übertriebener Aufteilung gerade auch im Hinblick auf die zu bestimmende Kovarianzmatrix drastisch an, so daß eine dadurch vermeintlich gewonnene Verbesserung aus numerischer Sicht überdacht werden sollte.

Daher wurde in der vorliegenden Arbeit das an der Verformung zu berücksichtigende Bodenvolumen für die gewichtete Mittelbildung unter jedem Fundament vereinfachend in zwei Abschnitte aufgeteilt.

Aus der linearisierten Spannungsfläche ergeben sich die zugehörigen Gewichtungsfaktoren mit  $p_1 = 0,75$  und  $p_2 = 0,25$ .

Die Varianz des in einem Quader mit den Seitenlängen a\*b\*c gewichtet gemittelten stochastischen Prozesses kann allgemein in der in Gleichung (4.17) wiedergegebenen multiplikativen Form geschrieben werden,

$$VAR[V_{e_{GM}}] = \Gamma_{GM}^2 \cdot \Gamma_{Abschn}^2 \cdot VAR[v_e]$$
(4.17)

wobei  $r^2_{GM}$  durch den nachfolgenden Ausdruck zu berechnen ist.

$$\Gamma_{GM}^2 = p^T \cdot \begin{pmatrix} 1 & \cdot & \cdot & \rho \\ \rho & \cdot & \cdot & 1 \end{pmatrix} \cdot p \tag{4.18}$$

 $r^2_{\rm Absch.}$ erfaßt den Reduktionsanteil, der durch die ungewichtete Mittelbildung in den einzelnen Quaderabschnitten mit Gleichung (4.13) berechnet werden kann.

Für die Aufteilung des an der Verformung beteiligten Bodenvolumens in zwei Abschnitte folgt für den Ausdruck  $\Gamma^2_{\ GM}$  in geschlossener Form

$$\Gamma_{GM}^2 = \frac{5}{8} + \frac{3}{8}\varrho_{1/2} \tag{4.19}$$

wobei  $\rho_{1/2}$  die stochastische Abhängikeit der beiden Abschnitte (Teil-volumen) zueinander erfaßt.

#### 4.4. Gewichtete Korrelationsschätzung

Durch den analytischen Zusammenhang zwischen der beobachteten Varianz innerhalb der Baustelle und den zu erwartenden mittleren Schwankungen, repräsentativ, für das an der Verformung beteiligte Bodenvolumen, ist es möglich ,auch eine Aussage hinsichtlich der stochastischen Abhängigkeit der Mittelungsbereiche zueinander zu machen. Hierfür ist neben den geometrischen Abmessungen der Mittelungsbereiche deren gegenseitiger Abstand r erforderlich.

Bei statistisch homogenen Verhältnissen (ungewichtet), läßt sich mit Hilfe der Varianzreduktionsfunktion (Gleichung 4.1) durch die nachfolgende Gleichung die Korrelation  $\rho_{I/II}$  zwischen zwei Referenzvolumina nach VANMARCKE (1977) bequem berechnen.

$$\varrho_{I/II} = \frac{D_0^2 \Gamma^2(D_0) - D_{01}^2 \Gamma^2(D_{01}) - D_{02}^2 \Gamma^2(D_{02}) + D_{012}^2 \Gamma^2(D_{012})}{2D_1 D_2 \Gamma(D_1) \Gamma(D_2)}$$
(4.20)

Hierin bezeichnen D<sub>0</sub> das Volumen zwischen den Mittelungsbereichen, D<sub>1</sub> bzw. D<sub>2</sub> das Volumen des an der Verformung beteiligten Bodens unterhalb der Fundamente und D<sub>01</sub>, D<sub>02</sub>, D<sub>012</sub> deren jeweilige Kombination. Gleichung (4.20) kann für die Berechnung der gewichteten Mittelung nach (4.19) noch etwas vereinfacht werden, so daß sich bei Einteilung des Volumens in zwei Abschnitte die zugehörige Korrelation mit

$$\varrho_{1/2} = \frac{1}{2} \frac{D_{012}^2}{D_1^2} \cdot \frac{\Gamma^2(D_{012})}{\Gamma^2(D_1)} - 1 \tag{4.21}$$

berechnen läßt.

Analog der in Abschnitt 4.3. aufgezeigten gewichteten Mittelbildung unterhalb des Gründungskörpers muß der Gewichtungseinfluß auch bei der Korrelationsschätzung der Mittelungsbereiche unterschiedlicher Fundamente zueinander berücksichtigt werden.

Proportional der linearisierten Spannungsfläche werden hierzu die erforderlichen Reduktionsfaktoren  $\Gamma^2(.)$  entsprechend dem im Abschnitt 4.3. beschriebenen Verfahren berechnet.

Der in den einzelnen Faktoren  $\Gamma^2(.)$  verarbeitete Gewichtungseinfluß läßt sich somit auch bei der Abschätzung der Korrelation  $\rho_{I/II}$  nach Gleichung (4.20) bequem berücksichtigen.

Damit existieren insbesondere für quadratische Einzelfundamente, aber auch für Fundamentabmessungen, deren zugewandte Seiten gleich groß sind, analytisch geschlossene Lösungen, die mit einem vertretbaren Rechenaufwand die statistische Abhängigkeit zweier Fundamentsetzungen zueinander berechnen lassen.

Prinzipiell lassen sich durch numerische Faltung beliebige Fundamentformen berücksichtigen, dies führt aber zwangsläufig zu der bereits in Abschnitt 4.1. erwähnten Vervielfachung des Rechenaufwands. Es bleibt daher im einzelnen zu prüfen, inwieweit die angestrebte Genauigkeit nicht durch die immense Flut von Rechenoperationen als unrealistisch eingeschätzt werden muß. Zur klaren Trennung und Begrenzung der verschiedenen Einflüsse auf das unterschiedliche Setzungsverhalten von Einzelfundamenten bei homogenen Baugrundverhältnissen werden in dieser Arbeit nur quadratische Einzelfundamente untersucht.

Damit ergeben sich automatisch gleich große Einflußtiefen für das an der Verformungsberechnung beteiligte Bodenvolumen.

#### 5. Quantifizierung von Setzungsdifferenzen

## 5.1. Ableitung der ersten beiden Momente VAR( $\Delta$ S) und E( $\Delta$ S)

Mit Hilfe der in Abschnitt 2 und 4 aufgezeigten Verfahren können sowohl die zu erwartenden Setzungen eines quadratischen Einzelfundaments, dessen Varianz, als auch die Korrelation zwischen zwei Einzelfundamenten bestimmt werden.

Der in Abschnitt 2.3 eingeführte Quotient  $(s \cdot v_e)/b = f_c$  (Lastfaktor) ist dimensionslos und enthält neben der Fundamentbreite b die Setzung s unter dem Mittelpunkt eines quadratischen Einzelfundaments als deterministische Größen.

Die zu erwartenden Setzungsdifferenzen sind also allein infolge der räumlichen Variabilität des Bodenparameters v<sub>e</sub>, modelliert durch einen stochastischen Prozess, bedingt.

Mit den bekannten Regeln der Statistik lassen sich durch eine mehrdimensionale Taylor-Entwicklung somit geschlossene Lösungen für die ersten beiden Momente der zu erwartenden Setzungsdifferenzen entwickeln.

Für den allgemeinen Fall unterschiedlicher Sohlnormalspannungen ergibt sich mit den Beziehungen nach Abschnitt 2 für die Setzungsdifferenz quadratischer Einzelfundamente

$$\Delta S = b \mid \frac{f_{c_1}}{V_{e_I}} - \frac{f_{c_2}}{V_{e_{II}}} \mid$$
(5.1)

In Gleichung (5.1) setzen sich also die zu erwartenden Setzungsdifferenzen aus der Summe zweier mit deterministischen Faktoren multiplizierten Zufallsvariablen zusammen.

Die Differenzsetzungen werden durch die gemeinsame Verteilung von  $V_{eI}$  und  $V_{eII}$ , der Verteilung von  $\Delta S$ , vollständig beschrieben. In allgemeiner Form gibt Gleichung (5.2) den Zusammenhang für die beiden miteinander korrelierten Zufallsvariablen wieder.

$$g \equiv \Delta S - f(V_{eI}, V_{eII}) = 0 \tag{5.2}$$

Hierin beschreibt  $g(V_{eI}, V_{eII}, \Delta S = \Delta s_g)$  den Grenzzustand, d. h. alle Funktionswerte in g(.) > 0 erfassen die Differenzsetzungen, die kleiner als  $\Delta s_{\alpha}$  sind.

Negative Werte von g(.) bedeuten, daß die zugehörigen Setzungsdifferenzen größer als der vorgegebene Grenzwert  $\Delta s_g$  sind. Die Wahrscheinlichkeit für diesen Fall quantifiziert also das Risiko, daß größere Setzungsdifferenzen eintreten als z. B. für die Bemessung mit  $\Delta s_g$ zugrunde gelegt wurden.

Die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit erfordert für den hier vorliegenden Fall eine zweidimensionale Integration des Wahrscheinlichkeitsinhaltes in den durch die Grenzzustandsfunktion mit g(.) > 0 bzw. g(.) < 0 unterschiedenen Bereichen. Im allgemeinen ist eine analytische Lösung nicht möglich.

Zur einfachen approximativen Berechnung der sog. Versagenswahrscheinlichkeit ist man daher auf Näherungen angewiesen, die durch die jeweilige Zielsetzung der Aussagen bzw. den damit verbundenen Genauigkeitsanforderungen einen mehr oder weniger großen Rechenaufwand bedingen. Auf der Basis der Arbeiten von HASHOFER/LIND (1974) wurde die Zuverlässigkeitstheorie I. Ordnung (FORM = First-Order-Reliability Method) entwickelt. Dieses Verfahren linearisiert die Grenzzustandsfunktion mit Hilfe einer Taylor-Entwicklung im sog. ß-Punkt und erreicht damit eine höhere Genauigkeit der Aussage unmittelbar im Bereich der zugehörigen Wahrscheinlichkeit.

Für eine zusammenfassende Darstellung sei auf die Arbeiten von RACKWITZ z. B. (1976) hingewiesen. Insbesondere bei stark gekrümmten Grenzzustandsfunktionen ist es ratsam, diesen Einfluß, also den der Linearisierung zugrunde liegenden Punkt der Grenzzustandsfunktion, näher zu beleuchten.

Ist man jedoch an einer vom Wahrscheinlichkeitsniveau möglichst unabhängigen, allgemeinen Aussage interessiert, sind Zugeständnisse an die erreichbare Genauigkeit der Ergebnisse unumgänglich.

Für die hier vorliegenden Verhältnisse haben Vergleichsrechnungen mit dem Programm FORM gezeigt, daß für die Varianz  $\Delta$ S eine Linearisierung im Mittelwert gegenüber der Methode I. Ordnung eine Abweichung der absoluten Ergebnisse von weniger als einem Prozent zur Folge hat. Diese, auch im Hinblick auf eine möglichst einfache Darstellung der Ergebnisse befriedigende Größenordnung liegt vor allem an den geringen räumlichen ( $\Delta$ s<sub>g</sub>) Krümmungen der Grenzzustandsfunktion bei Variationskoeffizienten bis etwa 30 %.

Im Vergleich dazu müssen allerdings bereits bei Wahrscheinlichkeitsaussagen im Bereich der doppelten Standardabweichung von ΔS Unterschiede, absolut, in einer Größenordnung von ein bis zwei Prozent in Kauf genommen werden. Dies entspricht etwa einem Faktor von zwei.

Zu jeder vorgegebenen Differenzsetzung läßt sich mit Hilfe der Zuverlässigkeitstheorie I. Ordnung die zugehörige Überschreitungswahrscheinlichkeit berechnen. Damit folgt, daß die Verteilung und damit die gesuchte Varianz von  $\Delta S$ , aus der punktweise zu ermittelnden Dichtefunktion abzuleiten wäre.

Beschränkt man sich auf die Ermittlung der ersten beiden Momente, ist es möglich, Lösungen zu erarbeiten, die wiederum nur die ersten beiden Momente der unabhängigen Zufallsvariablen erfordern.

Diese Näherung führt hinsichtlich der gesuchten Momente von △S zu einfachen geschlossenen Lösungen und wird daher im weiteren für die Ableitung der praktischen Hilfsmittel (Kapitel 6) verwendet.

Damit folgt für den Erwartungswert von AS näherungsweise:

$$E[\Delta S] \approx g(m_{V_{eI}}, m_{V_{eII}}) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{2} \frac{\partial^2 g}{\partial_{V_{ei}} \cdot \partial_{V_{ej}}} \bigg|_{m} \cdot COV[V_{eI}, V_{eII}]$$
(5.3)

Alle gemischten zweiten Ableitungen müssen Null sein, wodurch sich Gleichung (5.3) noch weiter vereinfachen läßt.

$$E[\Delta S] \approx \quad b \cdot \left[\frac{f_{c_1}}{m_{V_{eI}}} - \frac{f_{c_2}}{m_{V_{eII}}}\right] \tag{5.4}$$

Schließlich folgt, wie erwartet, daß bei gleichen Sohlnormalspannungen und Fundamentabmessungen der zu erwartende Setzungsunterschied gleich Null sein muß.

In dieser Arbeit werden also die infolge von unterschiedlicher Belastung, Geometrie oder Mächtigkeit der Bodenschichten bedingten Verformungsunterschiede bewußt ausgeschlossen. Deren Einfluß auf den Erwartungswert kann durch eine deterministische Berechnung überschlägig abgeschätzt werden. Insbesondere die Berücksichtigung unterschiedlicher Einflußtiefen, bedingt durch schwankende bzw. unsichere Schichttiefen, ist ohnehin nur im Einzelfall mit vertretbarem Rechenaufwand möglich.

Der Erwartungswert der quadratischen, mittleren Abweichnung von  $\Delta S$  läßt sich näherungsweise mit

$$VAR[\Delta S] \approx \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=2}^{2} \frac{\partial g}{\partial V_{ei}} \left| \frac{\partial g}{m} \cdot \frac{\partial g}{\partial V_{ej}} \right|_{\overline{m}} \quad COV[V_{eI}, V_{eII}] \quad (5.5)$$

berechnen.

Aus Gleichung (5.1) und (5.5) folgt schließlich

$$VAR[\Delta S] \approx \left(\frac{bf_{c_1}}{m_{V_{eI}}^2}\right)^2 \cdot VAR[V_{eI}] + \left(\frac{bf_{c_2}}{m_{V_{eII}}^2}\right)^2 \cdot VAR[V_{eII}] - \frac{5.6}{m_{V_{eII}}^2} - \frac{bf_{c_1}}{m_{V_{eII}}^2} \frac{bf_{c_2}}{m_{V_{eII}}^2} \sqrt{VAR[V_{eII}]VAR[V_{eII}]} \cdot \frac{\rho_{I/II}}{\rho_{I/II}}$$

Bei gleichen Sohlnormalspannungen, Fundamentabmessungen und Einflußtiefen vereinfacht sich Gleichung (5.6) zu

$$VAR[\Delta S] = 2 \cdot (1 - \rho_{I/II}) \cdot \frac{b^2 f_c^2}{m_{v_{eI}}^4} \cdot VAR[V_{eI}]$$
(5.7)

Hierin bedeuten  $ho_{I/II}$  die Korrelation der am Verformungsverhalten beteiligten Bodenvolumina, m<sub>veI</sub> den Mittelwert und VAR(v<sub>eI</sub>) die Varianz des in diesem Bodenvolumen gewichtet gemittelten Bodenkennwerts v<sub>e</sub>.

# 5.2. Abspaltung des Last- und Geometriefaktors f bzw. f

Im vierten Abschnitt wurde gezeigt, daß die Varianz des gewichtet gemittelten Bodenkennwerts  $v_e$  multiplikativ nach Gleichung (4.17) geschrieben werden kann. Damit lassen sich in einem ersten Schritt alle von den geometrischen Randbedingungen beeinflußten Größen zu einem Faktor zusammenfassen. Dieser, hier als Geometriefaktor bezeichnete Multiplikator enthält gewissermaßen den Anteil der zu erwartenden Streuungen, die durch die jeweiligen Abmessungen der Baustelle, Fundamente und dem Abstand der Fundamente zueinander verursacht werden.

In dimensionsloser Form gilt

$$f_g = \sqrt{2(1 - \varrho_{I/II})\Gamma_{GM}^2} = f(b, r, A, B, C, \Delta, p)$$
(5.8)

Mit Hinweis auf Gleichung (4.3) ist es möglich, die Varianz der zu erwartenden Setzungsdifferenzen durch einen weiteren Faktor in schließlich drei von einander unabhängige Anteile aufzuspalten.

$$f_c = f(\mu, C_1, C_2) \tag{5.9}$$

(5.10b)

Mit den gewählten Kurzbezeichnungen folgt schließlich

$$VAR[\Delta S] = f_g^2 \cdot f_c^2 \cdot b^2 \cdot \frac{VAR[v_e]}{E^4[v_e]}$$
(5.10a)

oder

$$VAR[\Delta S] = (f_g \cdot f_c \cdot b \cdot \frac{V_{v_e}}{E[v_e]})^2$$

 $({\rm V_v}$  steht für den Variationskoeffizient (s/ $\!\overline{\rm x})$  der Zufallsvariablen  ${\rm V_e})^e$ 

Diese multiplikative Verknüpfung von miteinander nicht korrelierten Einflußgrößen reduziert die erforderlichen Parameterstudien beträchtlich.

Darüber hinaus lassen sich in dieser Form bequem die einzelnen Eingangsgrößen in ihrer Gewichtigkeit zueinander beurteilen.

Wie von PEINTINGER/REITMEIER (1983) nachgewiesen, spielt die Unsicherheit über den Mittelwert eine dominierende Rolle.

# 5.3. Zusammenstellung der theoretischen Ergebnisse für die Einflußfaktoren f $_{\rm c}$ und f $_{\rm q}$

Für den Lastfaktor f<sub>c</sub> folgt mit den in Gleichung (2.15) bis T = 2b integrierten Verzerrungen

$$f_{c} = \frac{1-\mu}{1-\mu-2\mu^{2}} \left\{ \frac{1}{2} \int_{0}^{4} \ln(\frac{\frac{2}{\pi}(k_{1}k+h)}{0,5C_{1}t+C_{2}}+1)dt - \frac{1}{2} \int_{0}^{4} \ln(\frac{\frac{1}{\pi}(k_{2}k-h)}{0,5C_{1}t+C_{2}}+1)dt \right\}$$
(5.11)

(k1, k2, k, h siehe Abschnitt 2.3)

Mit den Beziehungen nach Gleichung (4.19) folgt schließlich für den Geometriefaktor f $_{\alpha}$ 

$$f_g = \sqrt{2(1 - \varrho_{I/II})(\frac{5}{8} + \frac{3}{8}\varrho_{1/2})}$$
(5.12)

# 5.4. Abschätzung der zu erwartenden Setzungsdifferenzen bei vorgegebenem Zuverlässigkeitsniveau

Für die praktische Anwendung wird nach Gleichung (5.10) zunächst die Varianz VAR( $\Delta$ S) bestimmt. Die hierzu notwendigen Faktoren f<sub>c</sub> und f<sub>g</sub> können aus den Tabellen bzw. Bildern im Abschnitt 6 entnommen werden.

Bislang konnte auf die Wahl eines stochastischen Verteilungsgesetzes verzichtet werden. Nur so war es möglich geschlossene Lösungen für diese komplexe Problemstellung zu erarbeiten.

Nach ALBER/FLOSS (1983) zeigen viele Auswertungen von Bodenuntersuchungen ein normalverteiltes Verhalten. Dies läßt sich auch mit Hilfe des Zentralen Grenzwertsatzes der Statistik folgern, nachdem eine Bodeneigenschaft, die aus einer Summe von statistisch unabhängigen Zufallsvariablen gebildet wird, annähernd normalverteilt ist.

Abschätzungen von Setzungsdifferenzen bei vorgegebener Zuverlässigkeit bedingen die Annahme einer theoretischen Verteilungsfunktion.

Dies bedeutet konkret, daß erst durch die Zuordnung einer Verteilungsfunktion Aussagen über die zu erwartenden Setzungsunterschiede in Abhängigkeit eines zugeordneten Sicherheitsniveaus, der **operativen Ver**sagenswahrscheinlichkeit, möglich sind.

In Anlehnung an ALBER/FLOSS (1983) wird für die Verteilung der zu erwartenden Setzungsdifferenzen eine Normalverteilung (Mittelwert Null) vorgeschlagen. Setzungsunterschiede sind nach Gleichung (5.1) Absolutwerte, bzw. als solche im Regelfall für die Praxis von Interesse.

-48-

Dies bedeutet, daß die Wahrscheinlichkeit, mit der die zu erwartende Setzungsdifferenz einen bestimmten Wert überschreitet, sich aus zwei gleichen Anteilen rechts bzw. links des Mittelwerts zusammensetzt. Das Zuverlässigkeitsniveau, also die Wahrscheinlichkeit mit der eine nach Gleichung (5.10) ermittelte Setzungsdifferenz nicht überschritten wird, besteht also immer aus zwei gleich großen Anteilen, die symmetrisch um die Mittelachse der Wahrscheinlichkeitsdichte liegen.

Ganz allgemein ergibt sich daraus für normalverteilte Zufallsvariablen, daß z. B. mit einer Wahrscheinlichkeit von 32 % mit höheren Setzungsdifferenzen als der nach Gleichung (5.10) ermittelten Standardabweichung  $\sigma = \sqrt{VAR(\Delta S)}$  zu rechnen ist.

Den funktionalen Zusammenhang zwischen Setzungsgrößen und deren Auftretenswahrscheinlichkeit gibt Gleichung (5.13) überschlägig wieder.

$$P_f(\Delta s_g) \approx 2 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi VAR[\Delta s]}} \int_{-\infty}^{\Delta s_g} e^{-\frac{1}{2} \frac{t^2}{VAR[\Delta s]}} dt \right) \quad (5.13)$$

Hierin bedeutet  $P_f(\Delta s_g)$  die Wahrscheinlichkeit, mit der vorgegebene Setzungsgrenzwerte ( $\Delta s_g$ ) überschritten werden können.

Mit den nach Abschnitt 5.1. bzw. 5.2. ermittelten Momenten E( $\Delta$ S) und VAR( $\Delta$ S) läßt sich also rechnerisch jedem Zuverlässigkeitsniveau eine deterministische Setzungsdifferenz  $\Delta$ s<sub>a</sub> zuordnen.

Insbesondere für sehr kleine Versagenswahrscheinlichkeiten ist hier allerdings anzumerken, daß durch die gewählte Linearisierung am Mittelwert gegenüber der Linearisierung im sog. ß-Punkt Abweichungen bis zu einem Faktor von zwei und mehr möglich sind. Für die baupraktische Beurteilung des unterschiedlichen Setzungsverhaltens von verschiedenen Gründungsvarianten hat dies jedoch einen vernachlässigbaren Einfluß, wenn die jeweiligen Ergebnisse nach Gleichung (5.10) direkt miteinander verglichen werden.

Mit Hilfe der Inversen Normalverteilung kann die maximale Setzung bei vorgegebener Überschreitungswahrscheinlichkeit P<sub>f</sub> mit Gleichung (5.14) überschlägig ermittelt werden.

$$\Delta s_g \approx \phi^{-1} (1 - \frac{P_f}{2}) \tag{5.14}$$

Dieser Zusammenhang eignet sich beispielsweise zur Optimierung bei wirtschaftlichen Überlegungen hinsichtlich der im Schadensfall eintretenden Sanierungskosten.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, daß das nach Gleichung (5.13) bzw. (5.14) ermittelte Zuverlässigkeitsniveau als **operative Wahrscheinlichkeit** zu verstehen ist. Richt- bzw. Grenzwerte sind in den "Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen", kurz Grusibau, 1981 für drei verschiedene Sicherheitsklassen zusammengestellt worden.

#### 6. Hilfsmittel für die Anwendung

6.1. Lastfaktor f

19 Tabellen (6.1 bis 6.19) für  $C_2 = 0.0$  bis 3.0

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma * b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c/\sigma_0$   
 $C_2 = 0.00 (-)$ 

C <sub>1</sub>	µ=0.25	μ=0.30	µ=0.325	μ=0.35	μ=0.375	μ=0.40
.250	2.5756	2.7164	2.8436	3.0323	3.3184	3.7733
.240	2.6224	2.7656	2.8951	3.0872	3.3784	3.8415
.230	2.6717	2.8175	2.9493	3.1450	3.4416	3.9132
.220	2.7238	2.8723	3.0066	3.2061	3.5083	3.9890
.210	2.7789	2.9303	3.0673	3.2706	3.5789	4.0691
.200	2.8374	2.9918	3.1316	3.3391	3.6537	4.1541
.190	2.8996	3.0573	3.2000	3.4119	3.7333	4.2444
.180	2.9660	3.1271	3.2729	3.4896	3.8181	4.3406
.170	3.0370	3.2018	3.3510	3.5727	3.9089	4.4436
.160	3.1134	3.2820	3.4349	3.6620	4.0063	4.5542
.150	3.1958	3.3686	3.5253	3.7581	4.1113	4.6732
.140	3.2851	3.4624	3.6232	3.8623	4.2250	4.8021
.130	3.3824	3.5645	3.7298	3.9757	4.3487	4.9423
.120	3.4890	3.6763	3.8466	4.0998	4.4841	5.0957
.110	3.6066	3.7997	3.9753	4.2366	4.6332	5.2646
.100	3.7375	3.9368	4.1183	4.3885	4.7987	5.4519
.095	3.8087	4.0114	4.1961	4.4711	4.8887	5.5538
.090	3.8844	4.0906	4.2787	4.5587	4.9842	5.6618
.085	3.9651	4.1750	4.3666	4.6521	5.0858	5.7767
.080	4.0514	4.2652	4.4606	4.7518	5.1943	5.8993
.075	4.1441	4.3620	4.5614	4.8587	5.3106	6.0307
.070	4.2439	4.4663	4.6699	4.9737	5.4357	6.1719
.065	4.3521	4.5791	4.7873	5.0981	5.5709	6.3245
.060	4.4699	4.7019	4.9150	5.2334	5.7177	6.4901
.055	4.5990	4.8364	5.0548	5.3813	5.8783	6.6711
.050	4.7416	4.9847	5.2089	5.5442	6.0550	6.8701
.045	4.9005	5.1497	5.3802	5.7252	6.2511	7.0907
.040	5.0795	5.3353	5.5727	5.9284	6.4711	7.3379
.035	5.2839	5.5469	5.7918	6.1595	6.7209	7.6181
.030	5.5213	5.7920	6.0454	6.4265	7.0090	7.9408
.025	5.8035	6.0825	6.3453	6.7417	7.3485	8.3202
.020	6.1497	6.4374	6.7111	7.1250	7.7602	8.7789
.015	6.5954	6.8919	7.1778	7.6126	8.2818	9.3573
.010	7.2179	7.5212	7.8211	8.2807	8.9921	10.1396
.005	8.2535	8.5521	8.8650	9.3538	10.1194	11.3640

Tabelle 6.1. Lastfaktor  $f_c$  für T = 2b = konstant

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma \cdot b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c/\sigma_0$   
 $C_2 = 0.05 (-)$ 

c1	μ=0.25	µ=0.30	ν=0.325	μ=0.35	μ=0.375	μ=0.40
.250	2.1691	2.3138	2.4371	2.6161	2.8830	3.3026
.240	2.2021	2.3492	2.4747	2.6565	2.9277	3.3541
.230	2.2366	2.3863	2.5139	2.6988	2.9745	3.4079
.220	2.2728	2.4252	2.5549	2.7430	3.0235	3.4643
.210	2.3107	2.4659	2.5980	2.7895	3.0749	3.5235
.200	2.3505	2.5087	2.6433	2.8383	3.1289	3.5857
.190	2.3925	2.5538	2.6910	2.8897	3.1859	3.6513
.180	2.4367	2.6014	2.7413	2.9440	3.2460	3.7205
.170	2.4835	2.6517	2.7946	3.0014	3.3095	3.7937
.160	2.5330	2.7050	2.8510	3.0623	3.3769	3.8713
.150	2.5857	2.7617	2.9110	3.1269	3.4486	3.9538
.140	2.6418	2.8221	2.9749	3.1959	3.5250	4.0418
.130	2.7019	2.8867	3.0433	3.2697	3.6068	4.1361
.120	2.7663	2.9561	3.1168	3.3490	3.6946	4.2373
.110	2.8358	3.0309	3.1959	3.4344	3.7893	4.3464
.100	2.9109	3.1119	3.2817	3.5270	3.8919	4.4647
.095	2.9510	3.1550	3.3274	3.5763	3.9466	4.5277
.090	2.9928	3.2001	3.3751	3.6278	4.0037	4.5935
.085	3.0365	3.2472	3.4250	3.6818	4.0635	4.6625
.080	3.0824	3.2967	3.4774	3.7383	4.1262	4.7348
.075	3.1306	3.3486	3.5324	3.7977	4.1921	4.8108
.070	3.1813	3.4033	3.5904	3.8603	4.2615	4.8908
.065	3.2347	3.4610	3.6514	3.9263	4.3346	4.9752
.060	3.2913	3.5219	3.7160	3.9960	4.4120	5.0644
.055	3.3512	3.5866	3.7845	4.0700	4.4941	5.1591
.050	3.4149	3.6553	3.8574	4.1487	4.5814	5.2598
.045	3.4828	3.7286	3.9351	4.2327	4.6746	5.3673
.040	3.5556	3.8071	4.0183	4.3226	4.7744	5.4825
.035	3.6338	3.8916	4.1078	4.4193	4.8817	5.6063
.030	3.7183	3.9828	4.2045	4.5239	4.9977	5.7402
.025 .020 .015 .010	3.8101 3.9105 4.0211 4.1442 4.2827	4.0819 4.1903 4.3098 4.4428 4.5924	4.3096 4.4246 4.5513 4.6923 4.8510	4.6374 4.7617 4.8986 5.0510 5.2226	5.1238 5.2617 5.4137 5.5829 5.7734	5.8857 6.0449 6.2205 6.4158 6.6357

Tabelle 6.2. Lastfaktor  $f_c$  für T = 2b = konstant

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (Y * b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c/\sigma_0$   
 $C_2 = 0.10 (-)$ 

Cl	μ=0.25	μ=0.30	µ=0.325	µ=0.35	μ=0.375	μ=0.40
.250	1.9282	2.0667	2.1825	2.3491	2.5961	2.9830
.240	1.9542	2.0948	2.2124	2.3814	2.6320	3.0245
.230	1.9813	2.1241	2.2435	2.4151	2.6694	3.0678
.220	2.0095	2.1546	2.2759	2.4501	2.7084	3.1129
.210	2.0389	2.1865	2.3097	2.4868	2.7491	3.1599
.200	2.0696	2.2198	2.3450	2.5250	2.7917	3.2091
.190	2.1018	2.2546	2.3820	2.5651	2.8362	3.2606
.180	2.1354	2.2911	2.4208	2.6071	2.8829	3.3146
.170	2.1708	2.3294	2.4615	2.6511	2.9320	3.3714
.160	2.2080	2.3698	2.5044	2.6975	2.9836	3.4311
.150	2.2472	2.4123	2.5495	2.7465	3.0380	3.4941
.140	2.2886	2.4572	2.5972	2.7982	3.0956	3.5606
.130	2.3324	2.5047	2.6478	2.8529	3.1565	3.6312
.120	2.3789	2.5552	2.7015	2.9111	3.2213	3.7062
.110	2.4285	2.6090	2.7586	2.9731	3.2903	3.7861
.100	2.4814	2.6664	2.8197	3.0393	3.3640	3.8715
.095	2.5092	2.6967	2.8519	3.0742	3.4029	3.9165
.090	2.5381	2.7280	2.8853	3.1104	3.4432	3.9631
.085	2.5680	2.7606	2.9199	3.1479	3.4850	4.0116
.080	2.5991	2.7944	2.9558	3.1869	3.5284	4.0619
.075	2.6315	2.8295	2.9932	3.2275	3.5736	4.1143
.070	2.6652	2.8662	3.0322	3.2698	3.6207	4.1689
.065	2.7003	2.9043	3.0728	3.3139	3.6699	4.2259
.060	2.7370	2.9442	3.1153	3.3599	3.7212	4.2854
.055	2.7753	2.9859	3.1597	3.4081	3.7749	4.3476
.050	2.8155	3.0297	3.2062	3.4586	3.8312	4.4129
.045	2.8576	3.0756	3.2551	3.5117	3.8904	4.4815
.040	2.9020	3.1238	3.3065	3.5675	3.9526	4.5537
.035	2.9488	3.1748	3.3607	3.6263	4.0182	4.6298
.030	2.9982	3.2286	3.4180	3.6886	4.0876	4.7103
.025	3.0505	3.2856	3.4788	3.7545	4.1612	4.7957
.020	3.1062	3.3462	3.5434	3.8247	4.2395	4.8865
.015	3.1655	3.4109	3.6123	3.8995	4.3230	4.9834
.010	3.2291	3.4802	3.6861	3.9797	4.4125	5.0873
.005	3.2974	3.5547	3.7655	4.0660	4.5088	5.1991

Tabelle 6.3. Lastfaktor  $f_c$  für T = 2b = konstant

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma * b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c / \sigma_0$   
 $C_2 = 0.15 (-)$ 

C1	μ=0.25	μ=0.30	µ=0.325	μ=0.35	μ=0.375	µ=0.40
.250	1.7468	1.8781	1.9866	2.1419	2.3715	2.7301
.240	1.7681	1.9012	2.0112	2.1686	2.4012	2.7645
.230	1.7902	1.9252	2.0367	2.1963	2.4321	2.8003
.220	1.8131	1.9501	2.0632	2.2250	2.4641	2.8374
.210	1.8368	1.9759	2.0907	2.2549	2.4974	2.8760
.200	1.8616	2.0029	2.1194	2.2860	2.5320	2.9162
.190	1.8874	2.0309	2.1492	2.3184	2.5681	2.9580
.180	1.9142	2.0601	2.1804	2.3522	2.6058	3.0017
.170	1.9423	2.0907	2.2129	2.3875	2.6452	3.0474
.160	1.9716	2.1226	2.2469	2.4244	2.6864	3.0951
.150	2.0023	2.1561	2.2825	2.4631	2.7295	3.1452
.140	2.0346	2.1912	2.3200	2.5038	2.7749	3.1978
.130	2.0685	2.2281	2.3593	2.5465	2.8225	3.2531
.120	2.1042	2.2670	2.4008	2.5915	2.8728	3.3115
.110	2.1418	2.3081	2.4445	2.6391	2.9259	3.3731
.100	2.1817	2.3516	2.4909	2.6895	2.9821	3.4384
.095	2.2026	2.3744	2.5151	2.7158	3.0115	3.4725
.090	2.2240	2.3978	2.5401	2.7430	3.0418	3.5077
.085	2.2462	2.4220	2.5659	2.7710	3.0731	3.5441
.080	2.2691	2.4470	2.5925	2.7999	3.1055	3.5816
.075	2.2927	2.4728	2.6200	2.8299	3.1389	3.6205
.070	2.3172	2.4995	2.6485	2.8608	3.1735	3.6606
.065	2.3425	2.5271	2.6780	2.8929	3.2093	3.7022
.060	2.3687	2.5557	2.7085	2.9261	3.2464	3.7454
.055	2.3959	2.5855	2.7403	2.9606	3.2849	3.7901
.050	2.4242	2.6163	2.7732	2.9964	3.3250	3.8367
.045	2.4535	2.6485	2.8075	3.0337	3.3666	3.8851
.040	2.4841	2.6819	2.8432	3.0725	3.4100	3.9356
.035	2.5160	2.7168	2.8804	3.1130	3.4553	3.9882
.030	2.5493	2.7532	2.9193	3.1554	3.5026	4.0432
.025	2.5842	2.7913	2.9599	3.1996	3.5521	4.1008
.020	2.6207	2.8313	3.0026	3.2461	3.6040	4.1611
.015	2.6590	2.8732	3.0474	3.2948	3.6585	4.2246
.010	2.6993	2.9174	3.0945	3.3462	3.7160	4.2914
.005	2.7419	2.9639	3.1443	3.4003	3.7765	4.3619

Tabelle 6.4. Lastfaktor  $f_c$  für T = 2b = konstant

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma * b) / \sigma_0$   $C_2 = \sigma_c / \sigma_0$   
 $C_2 = 0.20 (-)$ 

<sup>C</sup> 1	1=0.25	µ=0.30	μ=0.325	μ=0.35	μ=0.3/5	μ=0.40
.250	1.6016	1.7258	1.8277	1.9730	2.1873	2.5214
.240	1.6194	1.7452	1.8484	1.9955	2.2124	2.5506
.230	1.6379	1.7653	1.8698	2.0188	2.2384	2.5807
.220	1.6570	1.7861	1.8920	2.0429	2.2653	2.6120
.210	1.6767	1.8077	1.9149	2.0678	2.2931	2.6443
.200	1.6972	1.8300	1.9387	2.0937	2.3220	2.6779
.190	1.7184	1.8532	1.9635	2.1206	2.3520	2.7127
.180	1.7405	1.8773	1.9891	2.1485	2.3832	2.7489
.170	1.7634	1.9023	2.0158	2.1775	2.4156	2.7866
.160	1.7873	1.9284	2.0436	2.2078	2.4494	2.8258
.150	1.8122	1.9556	2.0726	2.2393	2.4846	2.8667
.140	1.8382	1.9840	2.1029	2.2722	2.5214	2.9095
.130	1.8653	2.0136	2.1346	2.3067	2.5599	2.9543
.120	1.8938	2.0447	2.1678	2.3428	2.6003	3.0012
.110	1.9236	2.0774	2.2026	2.3807	2.6426	3.0504
.100	1.9550	2.1117	2.2392	2.4206	2.6872	3.1022
.095	1.9713	2.1295	2.2583	2.4413	2.7103	3.1292
.090	1.9880	2.1478	2.2778	2.4626	2.7341	3.1568
.085	2.0052	2.1666	2.2979	2.4844	2.7586	3.1853
.080	2.0229	2.1860	2.3186	2.5069	2.7837	3.2146
.075	2.0411	2.2059	2.3398	2.5300	2.8096	3.2447
.070	2.0598	2.2264	2.3617	2.5539	2.8363	3.2757
.065	2.0791	2.2475	2.3842	2.5784	2.8638	3.3076
.060	2.0989	2.2692	2.4075	2.6037	2.8921	3.3406
.055	2.1194	2.2917	2.4315	2.6299	2.9213	3.3746
.050	2.1406	2.3149	2.4562	2.6569	2.9515	3.4098
.045	2.1625	2.3389	2.4819	2.6848	2.9827	3.4461
.040	2.1851	2.3637	2.5084	2.7136	3.0150	3.4837
.035	2.2085	2.3893	2.5358	2.7435	3.0485	3.5227
.030	2.2328	2.4160	2.5642	2.7745	3.0832	3.5631
.025	2.2580	2.4436	2.5938	2.8067	3.1192	3.6051
.020	2.2842	2.4723	2.6244	2.8401	3.1567	3.6487
.015	2.3114	2.5021	2.6564	2.8749	3.1956	3.6940
.010	2.3397	2.5332	2.6896	2.9112	3.2362	3.7413
.005	2.3693	2.5657	2.7243	2.9490	3.2786	3.7907

Tabelle 6.5 Lastfaktor  $f_c$  für T = 2b = konstant

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma * b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c/\sigma_0$   
 $C_2 = 0.25 (-)$ 

C1	µ=0.25	μ=0.30	μ=0.325	µ=0.35	µ=0.375	μ=0.40
.250	1.4814	1.5989	1.6948	1.8313	2.0322	2.3451
.240	1.4966	1.6155	1.7126	1.8506	2.0537	2.3701
.230	1.5123	1.6327	1.7309	1.8705	2.0760	2.3959
.220	1.5284	1.6504	1.7497	1.8910	2.0989	2.4226
.210	1.5452	1.6686	1.7692	1.9123	2.1226	2.4502
.200	1.5624	1.6875	1.7894	1.9342	2.1471	2.4787
.190	1.5803	1.7071	1.8102	1.9569	2.1725	2.5082
.180	1.5988	1.7273	1.8318	1.9804	2.1988	2.5387
.170	1.6180	1.7483	1.8542	2.0048	2.2260	2.5704
.160	1.6378	1.7700	1.8774	2.0300	2.2543	2.6033
.150	1.6585	1.7926	1.9016	2.0563	2.2837	2.6375
.140	1.6800	1.8161	1.9267	2.0837	2.3143	2.6731
.130	1.7023	1.8406	1.9528	2.1121	2.3461	2.7101
.120	1.7256	1.8661	1.9801	2.1418	2.3793	2.7488
.110	1.7499	1.8928	2.0085	2.1728	2.4140	2.7891
.100	1.7753	1.9206	2.0383	2.2052	2.4503	2.8314
.095	1.7885	1.9350	2.0537	2.2220	2.4691	2.8533
.090	1.8020	1.9498	2.0695	2.2392	2.4883	2.8757
.085	1.8158	1.9649	2.0856	2.2568	2.5081	2.8986
.080	1.8299	1.9804	2.1022	2.2749	2.5283	2.9222
.075	1.8444	1.9963	2.1192	2.2934	2.5490	2.9463
.070	1.8592	2.0126	2.1366	2.3124	2.5703	2.9711
.065	1.8745	2.0293	2.1545	2.3319	2.5921	2.9965
.060	1.8901	2.0465	2.1729	2.3519	2.6145	3.0226
.055	1.9062	2.0642	2.1917	2.3725	2.6376	3.0495
.050	1.9228	2.0823	2.2112	2.3936	2.6613	3.0771
.045	1.9398	2.1010	2.2311	2.4154	2.6857	3.1055
.040	1.9573	2.1202	2.2517	2.4379	2.7108	3.1348
.035	1.9754	2.1401	2.2729	2.4610	2.7367	3.1650
.030	1.9940	2.1605	2.2948	2.4848	2.7634	3.1961
.025 .020 .015 .010	2.0132 2.0330 2.0535 2.0747 2.0967	2.1816 2.2034 2.2259 2.2492 2.2733	2.3173 2.3406 2.3647 2.3897 2.4155	2.5094 2.5349 2.5611 2.5883 2.6165	2.7910 2.8195 2.8489 2.8794 2.9110	3.2283 3.2615 3.2958 3.3314 3.3682

Tabelle 6.6. Lastfaktor  $f_c$  für T = 2b = konstant

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma * b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c/\sigma_0$   
 $C_2 = 0.30 (-)$ 

C <sub>1</sub>	µ=0.25	µ=0.30	μ=0.325	µ=0.35	μ=0.375	μ=0.40
.250	1.3795	1.4910	1.5815	1.7102	1.8992	2.1934
.240	1.3927	1.5054	1.5969	1.7269	1.9179	2.2151
.230	1.4062	1.5202	1.6127	1.7441	1.9372	2.2376
.220	1.4201	1.5354	1.6290	1.7619	1.9571	2.2606
.210	1.4345	1.5512	1.6458	1.7802	1.9775	2.2844
.200	1.4493	1.5674	1.6631	1.7990	1.9986	2.3090
.190	1.4646	1.5841	1.6810	1.8185	2.0204	2.3343
.180	1.4803	1.6014	1.6995	1.8386	2.0429	2.3605
.170	1.4966	1.6192	1.7185	1.8594	2.0661	2.3876
.160	1.5135	1.6377	1.7383	1.8809	2.0902	2.4156
.150	1.5309	1.6568	1.7587	1.9031	2.1151	2.4446
.140	1.5490	1.6766	1.7799	1.9262	2.1410	2.4747
.130	1.5677	1.6972	1.8019	1.9502	2.1678	2.5060
.120	1.5872	1.7186	1.8247	1.9751	2.1957	2.5384
.110	1.6075	1.7408	1.8485	2.0010	2.2246	2.5722
.100	1.6285	1.7639	1.8732	2.0279	2.2548	2.6074
.095	1.6394	1.7758	1.8859	2.0418	2.2704	2.6255
.090	1.6505	1.7880	1.8990	2.0560	2.2863	2.6441
.085	1.6618	1.8005	1.9123	2.0706	2.3026	2.6630
.080	1.6734	1.8132	1.9259	2.0854	2.3192	2.6824
.075	1.6853	1.8262	1.9398	2.1006	2.3363	2.7023
.070	1.6974	1.8395	1.9541	2.1161	2.3537	2.7225
.065	1.7098	1.8532	1.9686	2.1320	2.3715	2.7433
.060	1.7225	1.8671	1.9836	2.1483	2.3897	2.7646
.055	1.7355	1.8814	1.9989	2.1650	2.4084	2.7864
.050	1.7489	1.8961	2.0145	2.1821	2.4276	2.8087
.045	1.7625	1.9111	2.0306	2.1997	2.4473	2.8317
.040	1.7766	1.9265	2.0471	2.2177	2.4675	2.8552
.035	1.7909	1.9423	2.0641	2.2361	2.4882	2.8794
.030	1.8057	1.9586	2.0814	2.2551	2.5095	2.9042
.025	1.8209	1.9753	2.0993	2.2746	2.5313	2.9297
.020	1.8365	1.9925	2.1177	2.2947	2.5539	2.9560
.015	1.8526	2.0101	2.1366	2.3154	2.5770	2.9830
.010	1.8692	2.0284	2.1561	2.3367	2.6009	3.0109
.005	1.8862	2.0471	2.1762	2.3586	2.6255	3.0396

Tabelle 6.7. Lastfaktor  $f_c$  für T = 2b = konstant

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma * b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c/\sigma_0$   
 $C_2 = 0.40 (-)$ 

с <sub>1</sub>	µ=0.25	µ=0.30	µ=0.325	μ=0.35	μ=0.375	μ=0.40
.250	1.2152	1.3160	1.3975	1.5128	1.6820	1.9448
.240	1.2254	1.3272	1.4094	1.5258	1.6965	1.9617
.230	1.2358	1.3386	1.4216	1.5391	1.7114	1.9791
.220	1.2465	1.3503	1.4341	1.5528	1.7267	1.9969
.210	1.2574	1.3624	1.4470	1.5668	1.7424	2.0152
.200	1.2687	1.3747	1.4602	1.5812	1.7586	2.0341
.190	1.2803	1.3874	1.4738	1.5960	1.7752	2.0534
.180	1.2921	1.4005	1.4878	1.6113	1.7923	2.0733
.170	1.3044	1.4139	1.5022	1.6270	1.8098	2.0938
.160	1.3170	1.4278	1.5170	1.6431	1.8279	2.1149
.150	1.3300	1.4420	1.5322	1.6598	1.8466	2.1366
.140	1.3433	1.4567	1.5480	1.6769	1.8658	2.1590
.130	1.3571	1.4719	1.5642	1.6946	1.8857	2.1822
.120	1.3714	1.4876	1.5810	1.7129	1.9062	2.2061
.110	1.3861	1.5038	1.5983	1.7318	1.9274	2.2308
.100	1.4014	1.5205	1.6162	1.7514	1.9493	2.2564
.095	1.4092	1.5291	1.6254	1.7615	1.9606	2.2695
.090	1.4171	1.5379	1.6348	1.7717	1.9720	2.2829
.085	1.4252	1.5468	1.6443	1.7821	1.9837	2.2965
.080	1.4335	1.5558	1.6540	1.7927	1.9956	2.3104
.075	1.4419	1.5651	1.6639	1.8035	2.0077	2.3245
.070	1.4504	1.5745	1.6740	1.8145	2.0201	2.3390
.065	1.4592	1.5841	1.6843	1.8257	2.0327	2.3536
.060	1.4680	1.5939	1.6948	1.8372	2.0455	2.3686
.055	1.4771	1.6039	1.7054	1.8488	2.0586	2.3839
.050	1.4864	1.6140	1.7163	1.8607	2.0719	2.3995
.045	1.4958	1.6244	1.7275	1.8729	2.0856	2.4154
.040	1.5054	1.6350	1.7388	1.8853	2.0995	2.4316
.035	1.5153	1.6459	1.7504	1.8980	2.1137	2.4482
.030	1.5253	1.6569	1.7623	1.9109	2.1282	2.4652
.025	1.5356	1.6682	1.7744	1.9241	2.1431	2.4825
.020	1.5461	1.6798	1.7868	1.9377	2.1583	2.5003
.015	1.5568	1.6916	1.7995	1.9515	2.1738	2.5184
.010	1.5678	1.7037	1.8124	1.9657	2.1897	2.5370
.005	1.5790	1.7161	1.8257	1.9802	2.2060	2.5560

Tabelle 6.8. Lastfaktor  $f_c$  für T = 2b = konstant

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma^*b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c/\sigma_0$   
 $C_2 = 0.50 (-)$ 

C <sub>1</sub>	μ=0.25	μ=0.30	μ=0.325	µ=0.35	µ=0.375	μ=0.40
.250	1.0876	1.1796	1.2535	1.3581	1.5112	1.7488
.240	1.0957	1.1885	1.2631	1.3685	1.5228	1.7624
.230	1.1040	1.1976	1.2728	1.3791	1.5347	1.7762
.220	1.1125	1.2069	1.2828	1.3900	1.5469	1.7905
.210	1.1212	1.2164	1.2930	1.4011	1.5594	1.8050
.200	1.1300	1.2262	1.3034	1.4125	1.5722	1.8199
.190	1.1391	1.2362	1.3141	1.4242	1.5853	1.8352
.180	1.1485	1.2465	1.3251	1.4362	1.5987	1.8509
.170	1.1580	1.2570	1.3363	1.4484	1.6125	1.8669
.160	1.1678	1.2678	1.3479	1.4610	1.6266	1.8834
.150	1.1779	1.2788	1.3597	1.4740	1.6411	1.9003
.140	1.1882	1.2902	1.3719	1.4873	1.6560	1.9177
.130	1.1988	1.3019	1.3844	1.5009	1.6714	1.9356
.120	1.2097	1.3139	1.3973	1.5150	1.6871	1.9540
.110	1.2210	1.3263	1.4106	1.5295	1.7034	1.9730
.100	1.2325	1.3390	1.4242	1.5444	1.7201	1.9925
.095	1.2385	1.3455	1.4312	1.5520	1.7286	2.0025
.090	1.2445	1.3521	1.4382	1.5597	1.7373	2.0126
.085	1.2506	1.3588	1.4454	1.5676	1.7461	2.0229
.080	1.2567	1.3657	1.4527	1.5756	1.7551	2.0333
.075	1.2630	1.3726	1.4602	1.5837	1.7642	2.0440
.070	1.2694	1.3796	1.4677	1.5919	1.7734	2.0548
.065	1.2759	1.3868	1.4754	1.6003	1.7828	2.0657
.060	1.2825	1.3940	1.4832	1.6088	1.7924	2.0769
.055	1.2892	1.4014	1.4911	1.6174	1.8021	2.0882
.050	1.2960	1.4089	1.4991	1.6262	1.8120	2.0998
.045	1.3030	1.4166	1.5073	1.6352	1.8220	2.1115
.040	1.3100	1.4244	1.5157	1.6443	1.8322	2.1235
.035	1.3172	1.4323	1.5241	1.6536	1.8427	2.1356
.030	1.3245	1.4404	1.5328	1.6630	1.8533	2.1480
.025	1.3320	1.4486	1.5416	1.6726	1.8641	2.1606
.020	1.3395	1.4569	1.5505	1.6824	1.8751	2.1735
.015	1.3473	1.4654	1.5597	1.6924	1.8863	2.1866
.010	1.3551	1.4741	1.5690	1.7026	1.8977	2.1999
.005	1.3631	1.4830	1.5785	1.7129	1.9093	2.2135

Tabelle 6.9. Lastfaktor  $f_c$  für T = 2b = konstant

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma * b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c/\sigma_0$   
 $C_2 = 0.60 (-)$ 

c <sub>1</sub>	⊭0.25	µ=0.30	µ=0.325	μ=0.35	µ≃0.375	μ=0.40
.250	.9852	1.0697	1.1374	1.2330	1.3729	1.5897
.240	.9919	1.0770	1.1452	1.2415	1.3824	1.6009
.230	.9986	1.0844	1.1532	1.2502	1.3922	1.6122
.220	1.0055	1.0920	1.1613	1.2591	1.4021	1.6239
.210	1.0126	1.0998	1.1696	1.2682	1.4123	1.6357
.200	1.0198	1.1077	1.1781	1.2774	1.4227	1.6478
.190	1.0271	1.1158	1.1868	1.2869	1.4333	1.6602
.180	1.0346	1.1241	1.1956	1.2965	1.4441	1.6729
.170	1.0423	1.1325	1.2047	1.3064	1.4552	1.6859
.160	1.0502	1.1412	1.2139	1.3166	1.4666	1.6991
.150	1.0582	1.1500	1.2234	1.3269	1.4782	1.7127
.140	1.0664	1.1591	1.2332	1.3376	1.4901	1.7266
.130	1.0749	1.1684	1.2431	1.3484	1.5024	1.7409
.120	1.0835	1.1779	1.2533	1.3596	1.5149	1.7555
.110	1.0924	1.1877	1.2638	1.3710	1.5277	1.7705
.100	1.1015	1.1977	1.2745	1.3828	1.5409	1.7859
.095	1.1061	1.2028	1.2800	1.3888	1.5476	1.7937
.090	1.1108	1.2080	1.2856	1.3948	1.5544	1.8017
.085	1.1156	1.2133	1.2912	1.4010	1.5613	1.8098
.080	1.1204	1.2186	1.2969	1.4072	1.5683	1.8179
.075	1.1253	1.2240	1.3027	1.4135	1.5754	1.8262
.070	1.1303	1.2295	1.3086	1.4200	1.5826	1.8346
.065	1.1353	1.2350	1.3145	1.4265	1.5899	1.8432
.060	1.1404	1.2406	1.3205	1.4330	1.5973	1.8518
.055	1.1456	1.2463	1.3267	1.4397	1.6049	1.8606
.050	1.1508	1.2521	1.3329	1.4465	1.6125	1.8695
.045	1.1562	1.2580	1.3392	1.4534	1.6202	1.8785
.040	1.1616	1.2640	1.3456	1.4604	1.6281	1.8877
.035	1.1671	1.2700	1.3521	1.4675	1.6361	1.8970
.030	1.1726	1.2762	1.3587	1.4747	1.6442	1.9065
.025	1.1783	1.2824	1.3654	1.4821	1.6524	1.9161
.020	1.1840	1.2888	1.3722	1.4895	1.6607	1.9259
.015	1.1899	1.2952	1.3791	1.4971	1.6692	1.9358
.010	1.1958	1.3018	1.3861	1.5047	1.6779	1.9459
.005	1.2019	1.3084	1.3932	1.5125	1.6866	1.9562

Tabelle 6.10. Lastfaktor  $f_c$  für T = tb = constant

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma^*b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c/\sigma_0$   
 $C_2 = 0.70 (-)$ 

с <sub>1</sub>	µ=0.25	μ=0.30	µ=0.325	μ=0.35	$\mu = 0.375$	μ=0.40
.250	.9010	.9791	1.0416	1.1296	1.2584	1.4579
.240	.9065	.9852	1.0481	1.1367	1.2663	1.4672
.230	.9122	.9914	1.0547	1.1440	1.2745	1.4767
.220	.9179	.9977	1.0615	1.1514	1.2827	1.4863
.210	.9237	1.0041	1.0684	1.1589	1.2912	1.4962
.200	.9297	1.0107	1.0754	1.1666	1.2998	1.5063
.190	.9358	1.0174	1.0825	1.1744	1.3086	1.5165
.180	.9419	1.0242	1.0899	1.1824	1.3176	1.5270
.170	.9483	1.0312	1.0973	1.1905	1.3267	1.5377
.160	.9547	1.0383	1.1049	1.1989	1.3360	1.5486
.150	.9613	1.0455	1.1127	1.2074	1.3456	1.5597
.140	.9680	1.0529	1.1207	1.2160	1.3553	1.5711
.130	.9749	1.0605	1.1288	1.2249	1.3653	1.5828
.120	.9819	1.0683	1.1371	1.2340	1.3755	1.5947
.110	.9891	1.0762	1.1456	1.2433	1.3859	1.6069
.100	.9965	1.0843	1.1543	1.2528	1.3966	1.6193
.095	1.0002	1.0884	1.1587	1.2576	1.4020	1.6257
.090	1.0040	1.0926	1.1632	1.2625	1.4075	1.6321
.085	1.0078	1.0968	1.1677	1.2675	1.4131	1.6386
.080	1.0117	1.1011	1.1723	1.2725	1.4187	1.6452
.075	1.0156	1.1054	1.1769	1.2776	1.4244	1.6518
.070	1.0196	1.1098	1.1816	1.2827	1.4302	1.6586
.065	1.0236	1.1143	1.1864	1.2879	1.4360	1.6654
.060	1.0277	1.1187	1.1912	1.2932	1.4420	1.6723
.055	1.0318	1.1233	1.1961	1.2985	1.4480	1.6793
.050	1.0360	1.1279	1.2010	1.3039	1.4540	1.6864
.045	1.0402	1.1326	1.2060	1.3094	1.4602	1.6936
.040	1.0445	1.1373	1.2111	1.3149	1.4664	1.7009
.035	1.0488	1.1421	1.2163	1.3206	1.4727	1.7083
.030	1.0532	1.1470	1.2215	1.3263	1.4791	1.7158
.025	1.0577	1.1519	1.2267	1.3320	1.4856	1.7234
.020	1.0622	1.1569	1.2321	1.3379	1.4922	1.7310
.015	1.0668	1.1619	1.2375	1.3438	1.4989	1.7388
.010	1.0714	1.1671	1.2430	1.3498	1.5056	1.7468
.005	1.0762	1.1723	1.2486	1.3560	1.5125	1.7548

Tabelle 6.11. Lastfaktor  $f_c$  für T = 2b = konstant

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma * b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c/\sigma_0$   
 $C_2 = 0.80 (-)$ 

c1	μ=0.25	μ=0.30	μ=0.325	μ=0.35	₽ =0.375	<sup>μ</sup> =0.40
.250	-8304	.9030	.9610	1.0426	1.1619	1.3466
.240	-8351	.9082	.9665	1.0486	1.1686	1.3545
.230	-8398	.9134	.9721	1.0548	1.1755	1.3626
.220	-8447	.9187	.9778	1.0610	1.1825	1.3708
.210	-8496	.9242	.9836	1.0674	1.1897	1.3791
.200	.8546	.9297	.9895	1.0738	1.1969	1.3876
.190	.8597	.9353	.9956	1.0804	1.2043	1.3962
.180	.8649	.9410	1.0017	1.0871	1.2118	1.4050
.170	.8702	.9469	1.0080	1.0940	1.2195	1.4140
.160	.8756	.9528	1.0143	1.1009	1.2273	1.4231
.150	.8811	.9589	1.0208	1.1080	1.2353	1.4324
.140	.8867	.9651	1.0275	1.1153	1.2435	1.4419
.130	.8924	.9714	1.0342	1.1227	1.2518	1.4516
.120	.8982	.9778	1.0411	1.1302	1.2602	1.4615
.110	.9042	.9844	1.0481	1.1379	1.2689	1.4716
.100	.9102	.9911	1.0553	1.1457	1.2777	1.4819
.095	.9133	.9945	1.0590	1.1497	1.2822	1.4872
.090	.9164	.9979	1.0627	1.1538	1.2867	1.4925
.085	.9196	1.0014	1.0664	1.1579	1.2913	1.4978
.080	.9228	1.0049	1.0702	1.1620	1.2959	1.5032
.075	.9260	1.0084	1.0740	1.1661	1.3006	1.5087
.070	.9292	1.0120	1.0778	1.1704	1.3053	1.5142
.065	.9325	1.0157	1.0817	1.1746	1.3101	1.5198
.060	.9359	1.0193	1.0857	1.1789	1.3150	1.5255
.055	.9392	1.0231	1.0897	1.1833	1.3199	1.5312
.050 .045 .040 .035 .030	.9426 .9461 .9496 .9531 .9566	1.0268 1.0306 1.0345 1.0384 1.0423	1.0937 1.0978 1.1019 1.1061 1.1103	1.1877 1.1922 1.1967 1.2012 1.2059	1.3248 1.3298 1.3349 1.3400 1.3452	1.5370 1.5429 1.5488 1.5548 1.5548 1.5609
.025	.9603	1.0463	1.1146	1.2105	1.3505	1.5670
.020	.9639	1.0503	1.1189	1.2153	1.3558	1.5733
.015	.9676	1.0544	1.1233	1.2201	1.3612	1.5796
.010	.9713	1.0585	1.1277	1.2249	1.3667	1.5859
.005	.9751	1.0627	1.1322	1.2298	1.3722	1.5924

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma/\sigma_0$   
 $C_2 = 0.90 (-)$ 

C <sub>1</sub>	µ=0.25	µ=0.30	μ=0.325	μ=0.35	µ=0.375	<sup>μ</sup> =0.40
.250	.7703	.8381	.8922	.9683	1.0794	1.2514
.240	.7743	.8426	.8969	.9734	1.0852	1.2582
.230	.7784	.8470	.9017	.9787	1.0911	1.2651
.220	.7825	.8516	.9066	.9841	1.0971	1.2721
.210	.7867	.8563	.9116	.9895	1.1032	1.2793
.200	.7910	.8610	.9167	.9950	1.1094	1.2865
.190	.7954	.8658	.9218	1.0006	1.1157	1.2939
.180	.7998	.8706	.9270	1.0064	1.1222	1.3014
.170	.8043	.8756	.9323	1.0122	1.1287	1.3090
.160	.8088	.8807	.9378	1.0181	1.1353	1.3168
.150	.8135	.8858	.9433	1.0241	1.1421	1.3247
.140	.8182	.8910	.9489	1.0303	1.1490	1.3328
.130	.8231	.8963	.9546	1.0365	1.1560	1.3410
.120	.8280	.9018	.9604	1.0429	1.1632	1.3493
.110	.8330	.9073	.9663	1.0494	1.1704	1.3578
.100	.8381	.9129	.9724	1.0560	1.1779	1.3665
.095	.8407	.9158	.9754	1.0593	1.1816	1.3709
.090	.8433	.9187	.9785	1.0627	1.1854	1.3754
.085	.8459	.9216	.9817	1.0661	1.1893	1.3799
.080	.8486	.9245	.9848	1.0696	1.1932	1.3844
.075	.8513	.9275	.9880	1.0731	1.1971	1.3890
.070	.8540	.9305	.9912	1.0766	1.2010	1.3936
.065	.8567	.9335	.9945	1.0801	1.2050	1.3983
.060	.8595	.9366	.9978	1.0837	1.2091	1.4030
.055	.8623	.9397	1.0011	1.0874	1.2132	1.4078
.050	.8651	.9428	1.0044	1.0910	1.2173	1.4126
.045	.8680	.9460	1.0078	1.0947	1.2214	1.4175
.040	.8709	.9492	1.0112	1.0985	1.2257	1.4224
.035	.8738	.9524	1.0147	1.1023	1.2299	1.4274
.030	.8768	.9556	1.0182	1.1061	1.2342	1.4274
.025	.8797	.9589	1.0217	1.1100	1.2386	1.4375
.020	.8828	.9623	1.0253	1.1139	1.2430	1.4426
.015	.8858	.9656	1.0289	1.1178	1.2474	1.4478
.010	.8889	.9690	1.0326	1.1218	1.2519	1.4531
.005	.8920	.9725	1.0363	1.1259	1.2565	1.4584

Tabelle 6.13. Lastfaktor  $f_c$  für T = 2b = konstant

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma^* b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c/\sigma_0$   
 $C_2 = 1.00 (-)$ 

с <sub>1</sub>	µ=0.25	μ=0.30	μ=0.325	µ=0.35	µ=0.375	μ=0.40
.250	.7184	.7821	.8327	.9040	1.0080	1.1690
.240	.7219	.7859	.8369	.9085	1.0130	1.1749
.230	.7255	.7898	.8410	.9131	1.0182	1.1809
.220	.7290	.7938	.8453	.9177	1.0234	1.1870
.210	.7327	.7978	.8496	.9224	1.0287	1.1932
.200	.7364	.8019	.8539	.9272	1.0340	1.1994
.190	.7401	.8060	.8584	.9320	1.0395	1.2058
.180	.7439	.8102	.8629	.9370	1.0450	1.2123
.170	.7478	.8145	.8675	.9420	1.0507	1.2189
.160	.7517	.8188	.8721	.9471	1.0564	1.2256
.150	.7557	.8233	-8769	.9523	1.0622	1.2324
.140	.7598	.8277	-8817	.9575	1.0681	1.2393
.130	.7639	.8323	-8866	.9629	1.0741	1.2463
.120	.7681	.8369	-8916	.9683	1.0803	1.2535
.110	.7724	.8417	-8966	.9739	1.0865	1.2607
.100	.7768	.8465	.9018	.9795	1.0928	1.2681
.095	.7790	.8489	.9044	.9823	1.0960	1.2719
.090	.7812	.8513	.9070	.9852	1.0993	1.2757
.085	.7834	.8538	.9097	.9881	1.1025	1.2795
.080	.7857	.8563	.9124	.9911	1.1058	1.2834
.075	.7880	.8588	.9151	.9940	1.1092	1.2872
.070	.7903	.8614	.9178	.9970	1.1125	1.2912
.065	.7926	.8640	.9205	1.0000	1.1159	1.2951
.060	.7949	.8666	.9233	1.0031	1.1193	1.2991
.055	.7973	.8692	.9261	1.0062	1.1228	1.3032
.050	.7997	.8718	.9290	1.0093	1.1263	1.3073
.045	.8021	.8745	.9318	1.0124	1.1298	1.3114
.040	.8046	.8772	.9347	1.0155	1.1333	1.3155
.035	.8070	.8799	.9376	1.0187	1.1369	1.3197
.030	.8095	.8826	.9406	1.0220	1.1406	1.3240
.025	.8120	.8854	.9436	1.0252	1.1442	1.3283
.020	.8145	.8882	.9466	1.0285	1.1479	1.3326
.015	.8171	.8910	.9496	1.0318	1.1517	1.3369
.010	.8197	.8939	.9527	1.0352	1.1554	1.3414
.005	.8223	.8968	.9558	1.0386	1.1592	1.3458

Tabelle 6.14. Lastfaktor  $f_c$  für T = 2b = konstant
Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma * b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c/\sigma_0$   
 $C_2 = 1.25 (-)$ 

с <sub>1</sub>	µ=0.25	µ=0.30	μ=0.325	μ=0.35	μ=0.375	μ=0.40
.250	.6153	.6704	.7142	.7757	.8654	1.0042
.240	.6179	.6733	.7172	.7790	.8691	1.0085
.230	.6204	.6761	.7203	.7823	.8728	1.0129
.220	.6230	.6790	.7233	.7857	.8766	1.0173
.210	.6257	.6819	.7265	.7891	.8805	1.0218
.200	.6283	.6848	.7296	.7926	.8844	1.0263
.190	.6311	.6878	.7329	.7961	.8883	1.0310
.180	.6338	.6909	.7361	.7997	.8923	1.0356
.170	.6366	.6939	.7394	.8033	.8964	1.0404
.160	.6394	.6970	.7427	.8069	.9005	1.0452
.150	.6423	.7002	.7461	.8106	.9046	1.0500
.140	.6452	.7034	.7496	.8144	.9089	1.0550
.130	.6481	.7066	.7530	.8182	.9131	1.0600
.120	.6511	.7099	.7566	.8221	.9175	1.0651
.110	.6541	.7133	.7602	.8260	.9219	1.0702
.100	.6572	.7167	.7638	.8300	.9264	1.0755
.095	.6587	.7184	.7656	.8320	.9286	1.0781
.090	.6603	.7201	.7675	.8340	.9309	1.0808
.085	.6618	.7218	.7694	.8360	.9332	1.0835
.080	.6634	.7236	.7712	.8381	.9355	1.0862
.075	.6650	.7254	.7731	.8402	.9379	1.0889
.070	.6666	.7271	.7750	.8423	.9402	1.0916
.065	.6682	.7289	.7770	.8444	.9426	1.0944
.060	.6699	.7307	.7789	.8465	.9450	1.0972
.055	.6715	.7325	.7808	.8486	.9474	1.1000
.050	.6732	.7344	.7828	.8508	.9498	1.1028
.045	.6749	.7362	.7848	.8529	.9522	1.1057
.040	.6765	.7381	.7868	.8551	.9547	1.1086
.035	.6782	.7400	.7888	.8573	.9572	1.1115
.030	.6799	.7419	.7888	.8596	.9597	1.1144
.025	.6817	.7438	.7929	.8618	.9622	1.1173
.020	.6834	.7457	.7949	.8641	.9647	1.1203
.015	.6852	.7476	.7970	.8663	.9673	1.1233
.010	.6869	.7496	.7991	.8686	.9699	1.1263
.005	.6887	.7515	.8012	.8709	.9725	1.1294

Tabelle 6.15. Lastfaktor  $f_c$  für T = 2b = konstant

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma^* b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c/\sigma_0$   
 $C_2 = 1.50 (-)$ 

C1	⊫0.25	μ=0.30	µ=0.325	μ=0.35	µ=0.375	μ=0.40
.250	.5383	.5870	.6255	.6796	.7585	.8804
.240	.5403	.5891	.6278	.6821	.7613	.8837
.230	.5422	.5913	.6301	.6847	.7641	.8870
.220	.5442	.5935	.6325	.6872	.7670	.8904
.210	.5462	.5957	.6348	.6898	.7699	.8938
.200	.5482	.5979	.6372	.6925	.7729	.8973
.190	.5503	.6002	.6397	.6951	.7759	.9008
.180	.5524	.6025	.6421	.6978	.7789	.9043
.170	.5545	.6048	.6446	.7005	.7820	.9079
.160	.5566	.6071	.6471	.7033	.7851	.9115
.150	.5587	.6095	.6497	.7061	.7882	.9152
.140	.5609	.6119	.6522	.7089	.7914	.9189
.130	.5631	.6143	.6549	.7117	.7946	.9226
.120	.5653	.6168	.6575	.7146	.7978	.9264
.110	.5676	.6193	.6602	.7175	.8011	.9303
.100	.5699	.6218	.6629	.7205	.8044	.9342
.095	.5710	.6231	.6642	.7220	.8061	.9362
.090	.5722	.6243	.6656	.7235	.8078	.9381
.085	.5733	.6256	.6670	.7250	.8095	.9401
.080	.5745	.6269	.6684	.7265	.8112	.9421
.075	.5757	.6282	.6698	.7281	.8130	.9441
.070	.5769	.6295	.6712	.7296	.8147	.9462
.065	.5781	.6309	.6726	.7312	.8164	.9482
.060	.5793	.6322	.6740	.7327	.8182	.9503
.055	.5805	.6335	.6755	.7343	.8200	.9524
.050	.5817	.6349	.6769	.7359	.8217	.9544
.045	.5829	.6362	.6784	.7375	.8235	.9565
.040	.5841	.6376	.6798	.7391	.8253	.9586
.035	.5854	.6390	.6813	.7407	.8272	.9608
.030	.5866	.6404	.6828	.7423	.8290	.9629
.025	.5879	.6418	.6843	.7440	.8308	.9651
.020	.5892	.6432	.6858	.7456	.8327	.9672
.015	.5904	.6446	.6873	.7473	.8346	.9694
.010	.5917	.6460	.6888	.7489	.8364	.9716
.005	.5930	.6474	.6904	.7506	.8383	.9738

Tabelle 6.16. Lastfaktor  $f_c$  für T = 2b = konstant

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c/\sigma_0$   
 $C_2 = 2.00 (-)$ 

C <sub>1</sub>	μ=0.25	µ=0.30	μ=0.325	μ=0.35	μ=0.375	μ= <b>0.4</b> 0
.250	.4309	.4702	.5013	.5450	.6085	.7067
.240	.4321	.4716	.5028	.5466	.6103	.7088
.230	.4334	.4730	.5043	.5482	.6121	.7109
.220	.4346	.4744	.5058	.5498	.6140	.7131
.210	.4359	.4758	.5073	.5515	.6158	.7153
.200	.4372	.4772	.5088	.5531	.6177	.7174
.190	.4385	.4786	.5103	.5548	.6196	.7197
.180	.4398	.4801	.5119	.5565	.6215	.7219
.170	.4411	.4815	.5134	.5582	.6234	.7241
.160	.4424	.4830	.5150	.5599	.6253	.7264
.150	.4438	.4845	.5166	.5617	.6273	.7287
.140	.4451	.4860	.5182	.5634	.6293	.7310
.130	.4465	.4875	.5198	.5652	.6313	.7333
.120	.4479	.4890	.5215	.5670	.6333	.7357
.110	.4492	.4905	.5231	.5688	.6353	.7381
.100	.4506	.4921	.5248	.5706	.6374	.7405
.095	.4514	.4929	.5256	.5716	.6384	.7417
.090	.4521	.4936	.5265	.5725	.6394	.7429
.085	.4528	.4944	.5273	.5734	.6405	.7441
.080	.4535	.4952	.5282	.5743	.6415	.7453
.075	.4542	.4960	.5290	.5753	.6426	.7466
.070	.4549	.4968	.5299	.5762	.6436	.7478
.065	.4557	.4976	.5307	.5772	.6447	.7491
.060	.4564	.4984	.5316	.5781	.6458	.7503
.055	.4571	.4993	.5325	.5791	.6469	.7516
.050	.4579	.5001	.5334	.5800	.6479	.7528
.045	.4586	.5009	.5342	.5810	.6490	.7541
.040	.4594	.5017	.5351	.5820	.6501	.7554
.035	.4601	.5025	.5360	.5829	.6512	.7567
.030	.4609	.5034	.5369	.5839	.6523	.7580
.025	.4616	.5042	.5378	.5849	.6534	.7593
.020	.4624	.5051	.5387	.5859	.6545	.7606
.015	.4631	.5059	.5396	.5869	.6557	.7619
.010	.4639	.5068	.5406	.5879	.6568	.7632
.005	.4647	.5076	.5415	.5889	.6579	.7645

Tabelle 6.17. Lastfaktor  $f_c$  für T = 2b = konstant

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma * b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c/\sigma_0$   
 $C_2 = 2.50 (-)$ 

с <sub>1</sub>	µ=0.25	µ=0.30	µ=0.325	μ=0.35	µ=0.375	µ=0.40
.250	.3594	.3924	.4185	.4550	.5083	.5905
.240	.3602	.3934	.4195	.4562	.5095	.5919
.230	.3611	.3943	.4205	.4573	.5108	.5934
.220	.3620	.3953	.4216	.4584	.5120	.5949
.210	.3628	.3962	.4226	.4595	.5133	.5964
.200	.3637	.3972	.4236	.4607	.5146	.5979
.190	.3646	.3982	.4247	.4618	.5159	.5994
.180	.3655	.3992	.4258	.4630	.5172	.6010
.170	.3664	.4002	.4268	.4642	.5185	.6025
.160	.3673	.4012	.4279	.4654	.5199	.6041
.150	.3682	.4022	.4290	.4666	.5212	.6056
.140	.3691	.4032	.4301	.4678	.5226	.6072
.130	.3701	.4042	.4312	.4690	.5239	.6088
.120	.3710	.4053	.4323	.4702	.5253	.6104
.110	.3720	.4063	.4334	.4714	.5267	.6120
.100	.3729	.4074	.4346	.4726	.5281	.6136
.095	.3734	.4079	.4351	.4733	.5288	.6145
.090	.3739	.4084	.4357	.4739	.5295	.6153
.085	.3743	.4090	.4363	.4745	.5302	.6161
.080	.3748	.4095	.4369	.4752	.5309	.6169
.075	.3753	.4100	.4374	.4758	.5316	.6178
.070	.3758	.4106	.4380	.4764	.5323	.6186
.065	.3763	.4111	.4386	.4771	.5330	.6195
.060	.3768	.4117	.4392	.4777	.5337	.6203
.055	.3773	.4122	.4398	.4783	.5345	.6211
.050	.3778	.4128	.4404	.4790	.5352	.6220
.045	.3783	.4133	.4409	.4796	.5359	.6228
.040	.3788	.4139	.4415	.4803	.5367	.6237
.035	.3793	.4144	.4421	.4809	.5374	.6246
.030	.3798	.4150	.4427	.4816	.5381	.6254
.025 .020 .015 .010	.3803 .3808 .3813 .3818 .3823	.4155 .4161 .4167 .4172 .4178	.4433 .4439 .4445 .4452 .4458	.4823 .4829 .4836 .4842 .4849	.5389 .5396 .5404 .5411 .5419	.6263 .6272 .6280 .6289 .6298

Tabelle 6.18. Lastfaktor  $f_c$  für T = 2b = konstant

Lastfaktor 
$$f_c = f(C_1, C_2, \mu)$$
  $C_1 = (\gamma * b)/\sigma_0$   $C_2 = \sigma_c/\sigma_0$   
 $C_2 = 3.00 (-)$ 

C <sub>1</sub>	μ=0.25	µ=0.30	μ=0.325	μ=0.35	µ=0.375	μ=0.40
.250	.3083	.3368	.3592	.3907	.4364	.5072
.240	.3089	.3375	.3600	.3915	.4374	.5082
.230	.3095	.3382	.3607	.3923	.4383	.5093
.220	.3102	.3389	.3615	.3931	.4392	.5104
.210	.3108	.3396	.3622	.3940	.4402	.5115
.200	.3115	.3403	.3630	.3948	.4411	.5126
.190	.3121	.3410	.3638	.3957	.4421	.5137
.180	.3128	.3417	.3645	.3965	.4430	.5148
.170	.3134	.3424	.3653	.3974	.4440	.5160
.160	.3141	.3432	.3651	.3982	.4449	.5171
.150	.3147	.3439	.3669	.3991	.4459	.5182
.140	.3154	.3446	.3677	.4000	.4469	.5194
.130	.3161	.3454	.3685	.4008	.4479	.5205
.120	.3168	.3461	.3693	.4017	.4489	.5217
.110	.3174	.3469	.3701	.4026	.4489	.5229
.100	.3181	.3477	.3709	.4035	.4509	.5240
.095	.3185	.3480	.3713	.4039	.4514	.5246
.090	.3188	.3484	.3717	.4044	.4519	.5252
.085	.3192	.3488	.3722	.4048	.4524	.5258
.080	.3195	.3492	.3726	.4053	.4529	.5264
.075	.3199	.3496	.3730	.4058	.4534	.5270
.070	.3202	.3500	.3734	.4062	.4539	.5276
.065	.3206	.3504	.3738	.4067	.4545	.5282
.060	.3209	.3508	.3742	.4071	.4550	.5288
.055	.3213	.3511	.3747	.4076	.4555	.5295
.050	.3216	.3515	.3751	.4081	.4560	.5301
.045	.3220	.3519	.3755	.4085	.4565	.5307
.040	.3224	.3523	.3759	.4090	.4571	.5313
.035	.3227	.3527	.3764	.4095	.4576	.5319
.030	.3231	.3531	.3768	.4099	.4581	.5325
.025	.3234	.3535	.3772	.4104	.4586	.5331
.020	.3238	.3539	.3777	.4109	.4592	.5338
.015	.3242	.3543	.3781	.4113	.4597	.5344
.010	.3245	.3547	.3785	.4118	.4603	.5350
.005	.3249	.3551	.3790	.4123	.4608	.5357

# -70-

# 6.2. Geometriefaktor f

Für die Darstellung des nach Gleichung (5.8) zu ermittelnden Geometriefaktors besteht zunächst die Schwierigkeit, sieben Parameter in allen für die praktische Anwendung erforderlichen Kombinationen zu variieren. Dieses leidlich bekannte Problem wird noch durch die für die Auswertung dieses Einflusses erforderlichen hohen Rechenzeiten erheblich verstärkt.

Durch umfangreiche Vorstudien hatte sich allerdings deutlich gezeigt, daß der Einfluß der in Abschnitt 3 beschriebenen Prozeßanteile auch bei der Bestimmung von  $f_a$  noch getrennt verfolgt werden kann.

Wie erwartet, dominiert bei kleinen Abmessungen und Fundamentabständen der autoregressive Prozeßanteil gegenüber dem "Random Walk".

Untersucht man innerhalb eines 95,5 % =  $2\sigma$ -Intervalls den Bereich aller möglichen Kombinationen der Parameter  $\Delta$  und p hinsichtlich der Maximalwerte von f<sub>g</sub>, ist ein charakteristisches Verhalten zu beobachten.

Bis zu einem gewissen Abstand r der beiden Gründungskörper erhält man das Maximum für den Geometriefaktor  $f_g$  durch diejenige Kombination von  $\Delta$  und p, die den Anteil der zufälligen Streuungen gegenüber den Mittelwertsunsicherheiten erhöhen. Dies ist im allgemeinen der Fall, wenn wir p klein und  $\Delta$  groß annehmen dürfen.

Umgekehrt ist bei größeren Fundamentabständen der Einfluß zufälliger Schwankungen um den auf die Baustellengröße bezogenen veränderlichen Mittelwert von untergeordneter Bedeutung. Das Maximum für den daraus abgeleiteten Geometriefaktor  $f_g$  ist für eine Kombination der Prozeßparameter mit p-groß und  $\Delta$ -klein zu suchen.

Es genügt demnach bei der Maximasuche am oberen und unteren Rand des Prozeßparameters p den autoregressiven Parameter  $^{\Delta}$  innerhalb des ge-

wünschten Zuverlässigkeitsintervalls (hier  $\pm 20$ ) so lange zu variieren, bis f<sub>a</sub> ein Maximum annimmt.

Entsprechend den jeweiligen Randbedingungen liegt von diesen beiden Grenzwerten dann beispielsweise bei kleinen Fundamentabmessungen und kleinem Fundamentabstand der Wert des Geometriefaktors  $f_g$  an der unteren Zuverlässigkeitsgrenze (-2  $_{0}$ ) über dem Ergebnis, das sich durch die Annahme eines großen Mittelwertanteils p ergeben würde.

Alle Kombinationen dazwischen sind natürlich auch in der Natur möglich, liefern aber einen etwas kleineren Wert, so daß auf der "Sicheren" Seite liegend die Einbeziehung der Verteilungsparameter von  $\Delta$ und p bei der Ermittlung von f<sub>a</sub> nicht unbedingt erforderlich ist.

Für diese Vorgehensweise spricht auch der relativ enge Bereich, in dem die Werte von  $f_g$  liegen, wenn alle Kombinationen von  $\Delta$  und p innerhalb des 95,5 %-Intervalls untersucht werden.

Damit ist es möglich, den stochastischen Einfluß der Prozeßparameter indirekt mit zu berücksichtigen ohne die Verteilungsparameter exakt kennen zu müssen.

Bei den in ALBER/REITMEIER (1986) ausgewerteten Zeitreihen der Tongrube Zolling läßt sich zeigen, daß mit zunehmendem Probenabstand der autoregressive Prozeßanteil abnimmt bzw. bedingt durch die großen Abstände in der Auswertung nicht mehr erfaßt werden konnte.

Die Mittelwertsunsicherheit hat naturgemäß einen engen Bezug zur Baustellengröße A\*B\*C, also der Grundgesamtheit des betrachteten Bodenvolumens.

Für die stochastische Beschreibung der räumlichen Bodeneigenschaften ist die Unterscheidung zwischen Trend und zufälligen Schwankungen nur sinnvoll, wenn über den Verlauf des Trends Angaben gemacht werden können. VANMARCKE bemerkt dazu, daß die Unterscheidung zwischen Trend und zufälliger Streuung eine Frage des jeweiligen Maßstabs ist (siehe Bild 9).

Bei erdstatischen Berechnungen steht der Aufwand einen gegebenenfalls vorhandenen Trend durch Probennahme zu bestimmen und räumlich zu fixieren in keinem Verhältnis zu den erforderlichen Kosten. Darüber hinaus würde sich dann auch die Vorgehensweise erübrigen, Unsicherheiten über den wahren Verlauf von Bodeneigenschaften durch ein stochastisches Modell zu quantifizieren und bei Berechnungen mit zu erfassen, wenn gewissermaßen alles durch die Probennahme bekannt ist.

Daher war bei der Suche nach einem stochastischen Bodenmodell von eminenter Wichtigkeit, beide in der Natur zu beobachtende Erscheinungen, also Zufallsschwankungen und stochastische Trends gemeinsam, mit zu erfassen.

Repräsentativ wurde an einem Bodenvolumen von 5000 m<sup>3</sup> der Einfluß der Baustellengeometrie A/B/C auf den Geometriefaktor  $f_g$  untersucht. Es zeigt sich wiederum sehr deutlich, daß erst im Bereich der maßgeblichen Mittelwertsunsicherheit die Baustellenform das Ergebnis spürbar beeinflußt. Die hierfür gewählten Einteilungen, Fundamentabstände und Ergebnisse sind in der Tabelle (6.20) zusammengestellt.

Da bei zunehmender Baustellengröße statistische Trends mit erfaßt werden, unterscheiden sich die in den nachfolgenden Bildern (12 bis 16) wiedergegebenen Kurvenverläufe erst ab einem Fundamentabstand von r größer ca. fünf Metern.



				r=3,0m
A/B= a-A	C=3,0m	C=4,Om	C=5,0m	C=6,0m
α =1,0	0.8338	0.8556	0.8369	0.8379
α =0,8	0.8359	0.8374	0.8386	0.8395
α =0,6	0.8377	0.8391	0.8401	0.8409
α =0,4	0.8392	0.8404	0.8413	0.8419
α =0,2	0.8401	0.8409	0.8416	0.8421

				r=9,0m
	C=3,0m	C=4,0m	C=5,0m	C=6,0m
α =1,0	1.1275	1.1317	1.1350	1.1376
α =0 <b>,</b> 8	1.1284	1.1322	1.1352	1.1376
α =0,6	1.1289	1.1323	1.1349	1.1370
α =0,4	1.1285	1.1314	1.1337	1.1355
α =0,2	1.1266	1.1288	1.1306	1.1320

				r=18,0m
	C=3,Om	C=4,Om	C=5,Om	C=6,0m
α =1,0	1.3322	1.3769	1.4072	1.4283
α =0,8	1.3285	1.3728	1.4029	1.4240
α =0,6	1.3178	1.3620	1.3923	1.4138
α =0,4	1.2920	1.3368	1.3682	1.3911
α =0,2	1.2250	1.2705	1.3039	1.3294

Tabelle 6.20. Einfluß der Baustellenform auf den Geometriefaktor f $_g$  (V=5000 m<sup>3</sup>=konstant, Fundamentbreite b=1,5 m = konstant)

Innerhalb dieses Spielraums können für den Geometriefaktor Aussagen gemacht werden, die, bedingt durch den von der Baustellengröße unabhängigen stationären Prozeßanteil AR(1), für alle üblichen Baustellengrößen zutreffen.

Mit hohem Rechenaufwand und einer Genauigkeit für die sechsdimensionale Integration von einem halben Prozent sind für diesen Bereich die in Bild 11 wiedergegebenen Kurvenverläufe auch für sehr kleine Fundamentabmessungen gerechnet worden.



Bild 11 Geometriefaktor f<sub>g</sub> bei kleinen Fundamentabmessungen bzw. Fundamentabständen



Bild 12 Geometriefaktor f $_{\rm g}$  in Abhängigkeit der Fundamentbreite b und des Abstandes r

-75-



Bild 13 Geometriefaktor f in Abhängigkeit der Fundamentbreite b und des Abstandes r (in Metern)



Bild 14 Geometriefaktor  ${\rm f}_{\rm q}$  in Abhängigkeit der Fundamentbreite und des Abstands r

-77-



Bild 15 Geometriefaktor  ${\rm f}_{\rm q}$  in Abhängigkeit der Fundamentbreite b und des Abstands r

-78-



•

Bild 16 Geometriefaktor  $f_q$  in Abhängigkeit der Fundamentbreite b und des Abstands r

-79-

#### 6.3. Lineare Regression und Bayes-Ansatz

Nach Gleichung (5.10) müssen zur Abschätzung der zu erwartenden Setzungsdifferenzen die ersten beiden Momente des Verdichtungsbeiwerts v<sub>e</sub> bekannt sein. Der versuchstechnische Aufwand zur Bestimmung von v<sub>e</sub>, im besonderen bei einer statistischen Betrachtungsweise, macht es naheliegend, diese Zielgröße indirekt mit Hilfe von möglichst einfach zu bestimmenden Kenngrößen wie Dichte, natürlicher Wassergehalt oder Plastizitätseigenschaften zu bestimmen.

In der Literatur finden sich hierzu zahlreiche Arbeiten, die mit Hilfe einer linearen Regression Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Bodenkennwerten aufzeigen.

Dabei sind nach KOPPULA (1978) mit Hilfe der linearen Regression im Vergleich zu aufwendigeren Regressionsmodellen befriedigende Ergebnisse zu erwarten, so daß im weiteren nur lineare Regressionsansätze betrachtet werden.

Eine übersichtliche Zusammenstellung der theoretischen Grundlagen findet man z.B. in v. SOOS (1983) oder BENJAMIN/CORNELL (1970).

Zur vollständigen Beschreibung der Unsicherheiten eines über Regression bestimmten Bodenkennwerts sind neben der Regressionsgleichung noch die Parameter Standardfehler s, Stichprobenumfang N und die ersten beiden Momente der unabhängigen Zufallsgröße erforderlich.

Diese Daten werden in der Literatur leider nicht immer vollständig genannt, so daß die Regressionsgleichung allein nur Rückschlüsse auf den Mittelwert der abhängigen Zufallsgröße zuläßt.

LAMBE/WHITEMAN (1979) haben an über 160 Proben den natürlichen Wassergehalt w $_{\rm n}$  und das Kompressionsverhältnis (compression ratio) C $_{\rm r}$  bestimmt.





Bild 17 Lineare Regression zwischen dem natürlichen Wassergehalt w<sub>n</sub> und dem Kompressionsverhältnis C<sub>r</sub> (Cambridge Ton, erstbelastet)

Zum Vergleich wurde die von AZZOUZ ET AL. (1976) anhand von 717 Proben bestimmten Regressionsparameter mit eingetragen.

Die Auswertung an ungestörten Bodenproben zeigt trotz unterschiedlicher Herkunft der einzelnen Proben eine gute Übereinstimmung mit den von LAMBE/WHITEMAN ermittelten Ergebnissen. Teilt man den Gültigkeitsbereich in zwei Abschnitte auf, so lassen sich die Aussagen über die Zielgröße  $C_r$  noch geringfügig verschärfen. In Bild 18 wurde mit dem gleichen Datensatz wie in Bild 17 für die Bereiche 10 %  $\leq w_n \leq 50$  % und 50 %  $\leq w_n \leq 120$  % jeweils getrennt die zugehörigen Ergebnisse eingetragen.



Bild 18 Lineare Regression bei Aufteilung des Gültigkeitsbereichs in zwei Abschnitte (Intervalle)

Infolge der hohen stochastischen Abhängigkeit zwischen dem natürlichen Wassergehalt w<sub>n</sub> und dem Kompressionsverhältnis C<sub>r</sub> sind selbst bei Böden unterschiedlicher Herkunft brauchbare Abschätzungen des Verformungsverhaltens möglich.

Dabei können die aus einer Regressionsbeziehung ermittelten Parameter zur Abschätzung des unterschiedlichen Setzungsverhaltens in erster Näherung verwendet werden. Bei dieser Vorgehensweise ist zu beachten, daß bei der Regression allein mit einem festen Wert  $x_0$  einer unabhängigen Eingangsgröße auf eine abhängige Größe (Zielgröße) geschlossen wird.

Bei stochastischer Betrachtung des Baugrunds lassen sich, wie in Kapitel 3 ausführlich beschrieben, die Verformungseigenschaften des Bodens nicht mehr durch einen einzelnen Zahlenwert charakterisieren. Daher muß auch die Eingangsgröße als Zufallsvariable mit ihren ersten beiden Momenten berücksichtigt werden können.

Dies bedeutet, daß für r  $\neq$  l die zu erwartenden Streuungen der Zielgröße aus dem Regressionsmodell größer sein müssen als die mittlere quadratische Abweichung der Zielgröße bei vorgegebenem **festen** Eingangswert x<sub>n</sub>.

Setzen wir die Regressionsparameter als bekannt und fest voraus, lassen sich die Varianzen der einzelnen Anteile, da unkorreliert, addieren.

Für eine Stichprobe x\* als Eingangsgröße folgt schließlich mit Beschränkung auf die ersten beiden Momente

 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i^*$ 

 $\sigma_r^2$ 

$$E[y] = \alpha + \beta \bar{x} \tag{6.1}$$

$$VAR[y] = \beta^2 \sigma_{x^*}^2 + \frac{N}{N-2} (1-r^2) s_y^2$$
(6.2)

$$=rac{1}{n}\sum_{i=1}^n (x_i^*-ar{x})^2$$
 ist.

und

Bislang wurde davon ausgegangen, daß die Information über die unabhängige Eingangsgröße allein aus der Stichprobe vom Umfang n berücksichtigt werden soll.

Beabsichtigen wir vorhandene Informationen mit aktuellen Daten aus einer Stichprobe zu vereinen, lassen sich mit Hilfe einer Baysianischen Betrachtungsweise geschlossene Lösungen erarbeiten.

Gewissermaßen als Vorstufe für die Verarbeitung im Regressionsmodell, kann die Aussage über die Eingangsgrößen aus Vorinformationen (a-priori) durch aktuelle Daten verschärft werden.

Beschränken wir uns im weiteren auf eine diffuse Vorkenntnis der Verteilungsparameter, empfiehlt JEFFREYS (1957) für die ersten beiden Momente ( $\mu$  bzw. log  $\sigma$ ) der a-priori Verteilung eine Gleichverteilung anzunehmen.

Verknüpft man die aus einer aktuellen Stichprobe x\* gewonnene Information mit der diffusen Prioriverteilung, folgt für die Erwartungswerte von  $\mu$  und  $\sigma$  nach ZELLNER (1971)

$$E[\mu \mid x^*] = \bar{x} \tag{6.3}$$

$$E[\sigma \mid x^*] = \frac{\sqrt{\frac{\nu}{2}} \cdot \Gamma(\frac{\nu-1}{2})}{\Gamma(\frac{\nu}{2})} \cdot s \tag{6.4}$$

mit v = n-1.

x bezeichnet den geschätzten Mittelwert und s $^2$  die geschätzte Varianz aus der aktuellen Stichprobe x $^*$ .

In den Ergebnissen von Gleichung (6.3) und (6.4) wurde vorausgesetzt, daß der wahre Mittelwert  $\mu$  bzw. die Varianz  $\sigma^2$  unbekannt sind.

Diese Annahme ist für die überwiegende Mehrzahl der in der Praxis denkbaren Randbedingungen sinnvoll, so daß auf die einfacheren Ergebnisse bei bekannter Varianz hier verzichtet wird.

Unter anderem zeigt hierzu RACKWITZ (1983) Lösungen mit unterschiedlichen Randbedingungen auf.

r(.) steht hier im Unterschied für die gebräuchliche Abkürzung der Gammafunktion.

r(.) kann nach Gleichung (6.5) berechnet werden und ist in z.B. KREYSZIG (1985) tabelliert.

$$\Gamma(\alpha) = \int_{0}^{\infty} e^{-t} t^{\alpha - 1} dt \qquad (\alpha > 0)$$
<sup>(6.5)</sup>

# 6.4. Zahlenbeispiel

Die zu erwartenden Setzungsdifferenzen der in Bild 19 dargestellten quadratischen Einzelfundamemte werden für zwei verschiedene Informationszustände berechnet.



Bild 19 Gründungssituation für das Zahlenbeispiel

 $\sigma_0 = (675 \text{ kN})/(1,5m)^2 = 300 \text{ kN/m}^2$  $C_1 = (\gamma \cdot b)/\sigma_0 = 20,0 \cdot 1,5/300 = 0,10$  (-)

## Informationszustand I:

Mittelwert und Varianz von v<sub>e</sub> sind bekannt. v<sub>e</sub> ~ N(16,5;3,3<sup>2</sup>) Variationskoeffizient V =  $s/\bar{x}$  = 20%

$$\begin{split} & E_0 = v_e \cdot (\sigma_c + \sigma = 0) = 16,5 \cdot 450 = 7425 \text{ kN/m}^2 \\ & C_2 = \sigma_c / \sigma_0 = 450/300 = 1,50 \text{ (-)} \\ & f_c (C_1 = 0,10; C_2 = 1,5; \mu = 0,3) = 0,6218 \text{ (-)} \text{ aus Tab. 6.16} \\ & f_g (b = 1,5m; r = 7,50m; A/B/C = 40/40/5m) = 1,09 \text{ (-)} \\ & f_c (b = 1,5m; r = 15,0m; A/B/C = 40/40/5m) = 1,25 \text{ (-)} \end{split}$$

Nach Gleichung (5.10b) folgt mit den bekannten Parametern für den Informationszustand I:

$$VAR(\Delta s) = (f_g \cdot f_c \cdot b \cdot V/E(v_e))^2$$
  
= (1,09 \cdot 0,6218 \cdot 1,5 \cdot 0,20/16,5)^2 = (0,012m)^2  
= (1,25 \cdot 0,6218 \cdot 1,5 \cdot 0,20/16,5)^2 = (0,014m)^2

Die mittlere quadratische Abweichung der zu erwartenden Setzungsdifferenzen beträgt für die Fundamente (1) / (2) bzw. (2) / (3) =  $(1,2 \text{ cm})^2$  und für die Randfundamente (1) / (3) =  $(1,4 \text{ cm})^2$ .

Dies bedeutet, daß mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,27 % keine größeren Setzungsdifferenzen als 1,2 cm bzw. 1,4 cm zu erwarten sind (angenommener Verteilungstyp - Normalverteilung - siehe Kap. 5.4.).

Interessieren die zu erwartenden Setzungsdifferenzen mit einer anderen Zuverlässigkeitsgrenze, z. B. 99 %, kann dies näherungsweise wie folgt berechnet werden. Mit Hilfe der Normalverteilungsfunktion folgt:

u(Zuverlässigkeitsniveau = 99 %) = 2,33 (Gleichung 5.14)

VAR( $\Delta s$ ) = (2,33.0,012)<sup>2</sup> = (0,028 m)<sup>2</sup> = (2,33.0,014)<sup>2</sup> = (0,033 m)<sup>2</sup>

Dies bedeutet, daß größere Setzungsdifferenzen als 2,8 cm bzw. 3,3 cm nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 % zu erwarten sind.

#### Informationszustand II:

Mittelwert und Varianz von  $v_e$  sind unbekannt und werden über eine Regressionsbeziehung abgeschätzt.

Innerhalb der Baustelle wurde der Wassergehalt an 10 verschiedenen Orten mit ausreichend gegenseitigem Abstand bestimmt, so daß die Proben näherungsweise im statistischen Sinn als voneinander unabhängig betrachtet werden können.

Ergebnis: Wassergehalt  $w_n = x^* \sim N(x;s^2) = N(40\%; 8\%)$ mit den Gleichungen (6.3) und (6.4) folgt:

 $E(\mu/x^*) = x = 40 \%$   $E(\sigma/x^*) = (\sqrt{0.5} v r(0.5(v-1)) \cdot s)/r(0.5v)$   $= \sqrt{4.5} \cdot r(4) \cdot s/r(4.5)$  $= 1.094 \cdot 8 \% = 8.75 \%$ 

Mit den Regressionsparametern in Bild 18 folgt nach Gleichung (6.1) bzw. (6.2) :

$$x \approx N(40\%; 8,75^2\%^2)$$

$$E(y) = \alpha + 8\overline{x} = 0,5213 + 0,2653 \cdot 40 \% = 11,133\%$$
  
VAR(y) =  $B^2 \cdot \sigma_{X^*}^2 + N(1-r^2) s_y^2 / (N-2)$   
= 0,2653<sup>2</sup> \cdot 8,75<sup>2</sup> + 96 \cdot (1-0,7113<sup>2</sup>) \cdot 3,591<sup>2</sup> / (96-2)  
= 2,32<sup>2</sup> + 2,55<sup>2</sup> = (3,45 \%)<sup>2</sup>

Mit Hilfe der in Gleichung (2.7) wiedergegebenen Beziehung zwischen v<sub>e</sub> und C<sub>r</sub> können daraus die Verteilungsparameter von v<sub>e</sub> wie folgt berechnet werden:

$$E(v_{p}) \approx g(E(C_{p})) = 2,3/0,11133 = 20,66$$
 (-) mit Gleichung (5.3)

und

$$\sqrt{VAR(v_e)} \approx \frac{\partial g(C_r)}{\partial C_r} \bigg|_{m_{C_r}} \cdot \sqrt{VAR[C_r]}$$

$$= 2,3.0,0345/0,11133^2 = 6,40$$
 (-)

 $\sigma_{\rm C}$  = (7425 kN/m<sup>2</sup>)/v<sub>e</sub> = 7425/20,66 = 359,4 kN/m<sup>2</sup> C<sub>2</sub> = 359,4/300 = 1,1980 (-)

 $f_{c}(C_{1}=0,10; C_{2}=1,1980; \mu=0,3) = 0,74371$  (-) (ermittelt mit Hilfe der Tabelle 6.14 bzw. 6.15)

mit Gleichung (5.10a) folgt:

VAR( $\Delta s$ ) = (1,09.0,7437.1,5.6,40/20,66<sup>2</sup>)<sup>2</sup> = (0,018 m)<sup>2</sup> = (1,25.0,7437.1,5.6,40/20,66<sup>2</sup>)<sup>2</sup> = (0,021 m)<sup>2</sup> Damit beträgt die mittlere quadratische Abweichnung der zu erwartenden Setzungsdifferenzen für den Informationszustand II: (1,8 cm)<sup>2</sup> bzw (2,1 cm)<sup>2</sup>.

Überschlägige Abschätzungen der zu erwartenden Setzungsdifferenzen sind für ein anderes Zuverlässigkeitsniveau mit Hilfe der für den Zustand I aufgezeigten Näherung möglich.

### 7. Zusammenfassung und Wertung

Nach Vorlage eines anhand von umfangreichen Datenmaterials verifizierten stochastischen Bodenmodells und der für die rechentechnische Bearbeitung erforderlichen Aufbereitung wurde in dieser Arbeit der Versuch unternommen, Setzungsvorhersagen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit zu quantifizieren.

Ziel war die Ableitung von möglichst allgemein gültigen Aussagen über das Setzungsverhalten von quadratischen Einzelfundamenten zueinander auf gründungsfähigen bindigen Böden.

Es ist im Ergebnis gelungen, dieses von mehreren Einflüssen abhängige Problem in einzelne multiplikative Anteile aufzuspalten und in wenigen Tabellen bzw. Kurven darzustellen.

Für die praktische Anwendung wurden verschiedene Regressionsansätze aus der Literatur aufgenommen, aufbereitet und ihre Handhabung beispielhaft erläutert.

Das Verfahren bedingt ein Spannungs-Verformungsgesetz des Bodens, das dem Ansatz von Ohde genügt. Abschätzungen des Verformungsverhaltens von Bodenarten, die sich nicht mit diesem Ansatz beschreiben lassen, sind daher nicht möglich. Neben den Einflußfaktoren  $f_c$  und  $f_g$ , die aus den entsprechenden Tafeln und Tabellen zu entnehmen sind, müssen die für den zu beurteilenden Boden lokal vorhandenen Parameter Mittelwert und Varianz von v<sub>e</sub> bekannt sein. Beide sind durch Messungen bzw. Erfahrungen oder gegebenenfalls mit Hilfe einer Regressionsrechnung aus anderen Parametern abzuschätzen.

Die Güte der Vorhersage hängt natürlich wie bei jeder Berechnung auch von der zutreffenden Wahl der Eingangsparameter ab.

Eine Abschätzung der Differenzsetzungen von gleichen Gründungskörpern auf homogenem Baugrund ist nur über den Umweg einer stochastischen Betrachtungsweise möglich.

Da dieses an sich komplizierte Boden- und Rechenmodell aber nur intern für die Ableitung der vorliegenden Beziehungen notwendig ist, sind für die Anwendung der Ergebnisse in der Praxis keinerlei Kenntnisse über stochastische Prozesse und die damit verbundenen Rechenverfahren erforderlich.

Im Sinne der neueren Sicherheitsphilosophie, statistische Verfahren in den Entscheidungsprozeß mit einzubeziehen, werden für die gewählte Problemstellung ausführlich die hierzu erforderlichen Einzelschritte aufgezeigt.

## 8. Anhang

f

Ableitung der in Gleichung (2.16) wiedergegebenen geschlossenen Lösung für die Setzung unter einem quadratischen Einzelfundament (Integration über die Spannungen entlang der Lastachse)

aus (G1. 2.12) 
$$s = \int_{0}^{z} \frac{1}{E_{\sigma}} (\sigma_{z} - 2\mu\sigma_{x}) dz$$
$$= \int_{0}^{z} \frac{\sigma_{z}}{E_{\sigma}} dz - 2\mu \int_{0}^{z} \frac{\sigma_{x}}{E_{\sigma}} dz = s_{z} - 2\mu s_{x}$$
folgt mit (G1. 2.11) 
$$E_{\sigma} = \frac{1 - \mu - 2\mu^{2}}{1 - \mu} \cdot E_{s}$$

und (G1. 2.14) 
$$E_s = v_e(\sigma_c + \gamma z + \sigma)$$

$$\text{ in } \mathbf{s}_{z}: \qquad s_{z} = \int_{0}^{z} \frac{\sigma_{z}}{E_{\sigma}} dz = \int_{0}^{z} \sigma_{z} \cdot \{\frac{1}{\sigma_{z}} \int_{0}^{\sigma_{z}} \frac{d\sigma}{E_{\sigma}}\} dz = \int_{0}^{z} \int_{0}^{\sigma_{z}} \frac{d\sigma}{E_{\sigma}} dz$$

bzw. 
$$s_{\chi}$$
:  $s_{x} = \int_{0}^{z} \int_{0}^{\sigma_{x}} \frac{d\sigma}{E_{\sigma}} dz$ 

(für  $k_0 = 1$ , vereinfachende Abschätzung auf der sicheren Seite).

Das innere Integral läßt sich mit den in Kapitel 2.3 vorgeschlagenen Grenzen elementar analytisch lösen.

$$s_{z} = \int_{0}^{z} \left\{ \int_{0}^{\sigma_{z}} \frac{d\sigma}{\frac{1-\mu-2\mu^{2}}{1-\mu}} v_{e}(\sigma_{c}+\gamma z+\sigma) \right\} dz$$

$$s_{z} = \frac{1-\mu}{1-\mu-2\mu^{2}} \int_{0}^{z} \int_{0}^{\sigma_{z}} \frac{1}{v_{e}} \cdot \frac{d\sigma}{(\sigma_{c}+\gamma z+\sigma)} dz$$

$$s_{z} = \frac{1-\mu}{1-\mu-2\mu^{2}} \int_{0}^{z} \frac{1}{v_{e}} \cdot \left[ ln(\sigma_{c}+\gamma z+\sigma) \right]_{0}^{\sigma_{z}} dz$$

$$s_{z} = \frac{1-\mu}{1-\mu-2\mu^{2}} \int_{0}^{z} \frac{1}{v_{e}} ln(\frac{\sigma_{z}}{\gamma z+\sigma_{c}}+1) dz$$

00

Mit den nach (Gl. 2.16) angegebenen Abkürzungen und der nachfolgenden Substitution t =  $\frac{2z}{b}$  läßt sich (Gl. 2.1) bzw. (Gl. 2.2) in der einfachen Form

$$\sigma_z = 2rac{\sigma_0}{\pi}[k_1\cdot k+h]$$
 $\sigma_x = rac{\sigma_0}{\pi}[k_2\cdot k-h]$  schreiben.

bzw.

Für eine Integrationstiefe von z = T folgt schließlich für  $s_{z}$ :

$$s_{z} = \frac{1-\mu}{1-\mu-2\mu^{2}} \int_{0}^{2\frac{T}{b}} \frac{1}{v_{e}} ln \Big[ \frac{2\frac{\sigma_{0}}{\pi}(k_{1}k+h)}{\frac{\gamma b}{2}t + \sigma_{c}} + 1 \Big] \frac{b}{2} dt$$

bzw. nach Substitution für eine dimensionslose Darstellung mit den in (G1. 2.15) angegebenen Größen C $_1$  und C $_2$ :

$$s_{z} = \frac{1-\mu}{1-\mu-2\mu^{2}} \frac{b}{2} \int_{0}^{2\frac{T}{b}} \frac{1}{v_{e}} ln \Big[ \frac{\frac{2}{\pi}(k_{1}k+h)}{0,5C_{1}t+C_{2}} + 1 \Big] dt$$

Mit den gleichen Integrationsgrenzen werden vereinfachend, also für  $k_0 = 1$ , die Verformungsanteile aus  $\sigma_x$  bzw.  $\sigma_y$  ermittelt. Diese Annahme liegt bezüglich der Gesamtsetzung nach (Gl. 2.12) auf der sicheren Seite.

$$s_{x} = \frac{1-\mu}{1-\mu-2\mu^{2}} \frac{b}{2} \int_{0}^{2\frac{1}{b}} \frac{1}{v_{e}} ln \Big[ \frac{\frac{1}{\pi}(k_{2}k-h)}{0,5C_{1}t+C_{2}} + 1 \Big] dt$$

#### 9. Literatur

- AITCHISON, J.; DUNSMORE, J. R. (1975): Statistical Prediction Analysis, Cambridge
- ALBER, D. (1987): Ein stochastisches Bodenmodell für geotechnische Aufgaben, Schriftenreihe Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik TU München, Heft 8
- ALBER, D.; FLOSS, R. (1983): Stochastische Verfahren zur Schätzung von Bodenkennwerten. Beiträge zur Anwendung der Stochastik und Zuverlässigkeitstheorie in der Bodenmechanik, Schriftenreihe Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik TU München, Heft 2
- ALBER, D.; REITMEIER, W. (1986): Beschreibung der räumlichen Streuungen von Bodenkennwerten mit Hilfe der Zeitreihenanalyse. Schriftenreihe Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik TU München, Heft 7
- AZZOUZ, A. S.; KRIZEK, R. J. and COROTIS, R. B. (1976): Regression Analysis of Soil Compressibility. Soil and Foundation Vol. 16, No. 2, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, S. 19-29
- BAECHER, G. B. (1981): Optimal Estimators for Soil Properties; In: Probability and Statistics for Geotechnical Engineering, Short Course by G. B. Baecher and D. Veneziano of MIT at ISMES in Bergamo, Italy
- BAECHER; G. B.; INGRA T. S. (1981): Stochastic FEM in Settlement Predictions, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE 107, S. 449-463
- BENJAMIN, J. R.; CORNELL, C. A. (1970): Probability, Statistics and Decision for Engineers. Mc-Graw Hill
- BOX, E. P.; TIAO, G. (1973): Bayesian Inference in Statistical Analysis, Addison - Wesley Publishing Company
- BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. (1976): Time Series Analysis Forecasting and Control. Holden Day, Oakland
- CAQUOT, A.; KERISEL, J. (1967): Grundlagen der Bodenmechanik, Springer-Verlag
- DIN 4019 Bl.1 (Sept.1974): Setzungsdifferenzen bei lotrechter-, mittiger Belastung. Berlin und Köln, Beuth-Verlag

DRAPER, N.; SMITH, H. (1966): Applied Regression Analysis, John Wiley & Sons

FIESSLER, B.; HAWRANEK, R.; RACKWITZ, R. (1976): Numerische Methoden probabilistischer Bemessungsverfahren und Sicherheitsnachweise, Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, SFB 96, TUM, Heft 14

FLOSS, R. (1986/87): Umdrucke zur Vorlesung Bodenmechanik TU München

- FRÖHLICH, O. K. (1939): Druckverteilung im Baugrund, Springer-Verlag, Wien
- GOLLWITZER, S.; ABDO, T.; RACKWITZ, R. (1987): First Order Reliability Method, Handbuch des Programms FORM, RCP GmbH, München

GRUNDLAGEN zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen (1981): DIN, 1. Aufl., Berlin und Köln: Beuth- Verlag

HASHOFER, A. M.; LIND, N. C. (1974): An exact and Invariant First Order Reliability Format, Journal of Eng. Mech. Div., ASCE, Vol. 100, No. EM1, S. 111-121

HOUGH, B. K. (1957): Basic Soils Engineering, The Ronald Press Company New York

JEFFREYS, H. (1957): Scientific Inference, 2nd ed. Cambridge

JENKINS, G. M,; WATTS, D. G. (1968): Spectral analysis and its applications, Holden Day

KANY, M. (1976): Setzungsberechnungen mit Verwendung druckabhängiger Steifemoduln. Mitteilungen (Degebo) TU Berlin, Heft 32, S.89-92

KEZDI, A. (1964): Bodenmechanik, VEB Verlag für Bauwesen Berlin und Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften Budapest

KOLLBRUNNER, C. (1945): Fundation und Konsolidation, Band 1, Schweizer Druck- und Verlagshaus Zürich

KOPPULA, S. D. (1981): Statistical Estimation of Compression Index. Geotechnical Testing Journal, American Society for Testing and Material, S.68-73

KOTZIAS, P. (1961): Die Zusammendrückbarkeit von Schluff, Diss., TH Aachen

KREYSZIG, E. (1985): Statistische Methoden und ihre Anwendungen, 7. Auflage, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen

- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. (1979): Soil Mechanics, SI Version, John Wiley & Sons, Chapter 22, S.318-327
- LEUSSINK, H. (1963): Diskussionsbeitrag. Proc. Europ. Conf. Soil Mech. and Found. Engng. Wiesbaden, Bd. 2, S.74/75
- LIEBERMAN, G. J. (1961): Prediction Regions for Several Predictions from a Single Regression Line, Technometrics Vol. 3, No. 1, S.21-27
- LINDLEY, D. V. (1970): Introduction to Probability and Statistics from a Bayesian Viewpoint, Part 2 Inference, Cambridge
- MARIVOET, L. (1948): A simplified method for computing the bearing capacity of the soil supporting footings or piers. Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech. Rotterdam, Bd I, S.78-86
- MICHELL (1900): "On some elementary distributions of stress in three dimensions" und "Elementary distribution of plane stress", London, Mathem. Soc., Proceedings Vol. XXXII
- NEUBER, H. (1961): Setzungen von Bauwerken und ihre Vorhersage. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn
- OHDE, J. (1939): Zur Theorie der Druckverteilung im Baugrund. Bauingenieur 20, H 33/34, S.451-459
- OHDE, J. (1949): Vorbelastung und Verspannung des Baugrundes und ihr Einfluß auf Setzungen, Festigkeit und Gleitwiderstand. Die Bautechnik, Heft 5, S. 129-134
- OHDE, J. (1951): Eigenschaften der Böden. Grundbaumechanik, Hütte, Band III, 27. Auflage, S.886-902
- PAAL, T. (1971): Bemerkungen zum Ödometerversuch. Proc. 4th Conf. on Soil Mechanics, Budapest, S.225-234
- PAPOULIS, A. (1965): Probability, Random variables and Stochastic Processes, Mc.Graw Hill
- PEINTINGER, B. (1982): Auswirkung der räumlichen Streuungen von Bodenkennwerten. Baugrundtagung Braunschweig, DGEG, Essen, S.105-118
- PEINTINGER, B.; REITMEIER, W. (1983): Effects of statistical uncertainties about the parameters of a stochastic field modelling soil properties in slope stability. Proc. 4th ICASP, S.1325-1335
- RACKWITZ, R. (1976): Practical probabilistic approach to design, CEB Bulletin d'Information, No. 112, S. 13-72

RACKWITZ, R.; PEINTINGER, B. (1981): Ein wirklichkeitsnahes stochastisches Bodenmodell mit unsicheren Parametern und Anwendung auf die Stabilitätsuntersuchung von Böschungen. Bauingenieur 56, H. 6, S.215-221

RACKWITZ, R. (1983): Predictive distribution of strength under control. Matériaux et Constructions, Vol. 16, No. 94, S. 259-267

SCHULTZE, E.; MUHS, H. (1967): Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten, Springer-Verlag

SCOTT, J. C. (1976): Discussion on Regression Analysis of Soil Compressibility by Azzouz et al., Soils and Foundations Vol. 16 No. 4, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, \$.71

SKEMPTON, A. W. (1944): Notes of the compressibility of clays, J. Geol. Soc. London, Bd. C, S.119-135

v.SOOS, P. (1967): Das Setzungs- und Verformungsverhalten von Böden. VDI-Z 109, S.332-338

v.SOOS, P.(1978): Neues Sicherheitskonzept im Bauwesen aufgrund wahrscheinlichkeitstheoretischer Überlegungen – Folgerungen für den Grundbau unter Einbeziehung der Probenahme und der Versuchsauswertung. Vorträge der Baugrundtagung 1978 in Berlin, DGEG

v.SOOS, P. (1980): Die Eigenschaften von Boden und Fels; ihre Ermittlung im Labor. Grundbautaschenbuch 3. Auflage, Teil 1, W. Ernst & Sohn, Berlin-München-Düsseldorf, S.59-116

v.SOOS, P. (1982): Zur Ermittlung der Bodenkennwerte mit Berücksichtigung von Streuungen und Korrelationen. Baugrundtagung Braunschweig, DGEG, Essen, S.83-104

SCHULZE, E. (1980): Setzungen. Grundbautaschenbuch 3. Auflage, Teil 1, W. Ernst & Sohn, Berlin-München-Düsseldorf, S.407-436

STANGE, K. (1970): Angewandte Statistik, l.Teil: Eindimensionales Problem, Springer-Verlag

STANGE, K. (1977): Bayes-Verfahren, Schätz- und Testverfahren bei Berücksichtigung von Vorinformationen, Springer-Verlag

TAYLOR, D. W. (1965): Soil Mechanics, John Wiley & Sons

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. (1967): Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons VANMARCKE, E. H. (1977): Probability Modelling of Soil Profiles. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT11, Proc. Paper 13364, S.1227-1246

VANMARCKE, E. H. (1977): Reliability of Earth Slopes, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, No. GTII, Proc. Paper 13365, S.1247-1265

- VANMARCKE, E. H. (1979): On the Scale of Fluctuation of Random Functions, MIT Res. Rep. No. 79-19
- ZELLNER, A. (1971): An Introduction to Bayesian Inference in Econometrics, John Wiley & Sons



#### Schriftenreihe Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss Ordinarius für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik

Heft 1982	1	Tragfähigkeit von Verpreßankern in nichtbindigem Boden - vergriffen -
Heft 1983	2	Beiträge zur Anwendung der Stochastik und Zuverlässig- keitstheorie in der Bodenmechanik
Heft 1984	3	In-situ Versuche zur Ermittlung der Unterbausteifigkeit an zwei Pfeilern der Sinntalbrücke Schaippach
Heft 1985	4	Ein Beitrag zum Spannungs-Verformungsverhalten silikat- gel-injizierter Sande
Heft 1985	5	Beiträge zum Tragverhalten axial zyklisch belasteter Pfähle
Heft 1986	6	Forschungsbeiträge zum mechanischen Verhalten von Geotextilien
Heft 1986	7	Beschreibung der räumlichen Streuungen von Bodenkenn- werten mit Hilfe der Zeitreihenanalyse
Heft 1987	8	Ein stochastisches Bodenmodell für geotechnische Aufgaben
Heft 1987	9	Testing of bentonite suspensions
Heft 1987	10	Beiträge zur Felsmechanik
Heft 1988	11	Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrations- verdichtung von Böden
Heft 1988	12	Bruchvorgänge infolge der Isareintiefung südlich Münchens und die kritischen Höhen der Talhänge
Heft 1989	13	Quantifizierung von Setzungsdifferenzen mit Hilfe einer stochastischen Betrachtungsweise