

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Heidrich, Werner

Die Baugrunduntersuchung für dynamisch angeregte Fundamente auf rolligem Untergrund

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

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106029>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Heidrich, Werner (1962): Die Baugrunduntersuchung für dynamisch angeregte Fundamente auf rolligem Untergrund. In: Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau 4. Berlin: Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau. S. 190-203.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

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

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



Die Baugrunduntersuchung für dynamisch angeregte
Fundamente auf rolligem Untergrund

Dipl.-Math. Werner H e i d r i c h

Die Aufgabenstellung der Baugrunduntersuchung für dynamisch angeregte Fundamente auf rolligem Untergrund wird von der Praxis diktiert und gliedert sich in mehrere spezifische Einzelfragen, deren Beantwortung für den Konstrukteur von Bedeutung ist.

Die primäre Frage ist die nach der Veränderung des Untergrundes durch dynamische Einwirkung, d.h. nach der Möglichkeit des Auftretens von Schäden am Bauwerk selbst oder in unmittelbarer Nachbarschaft desselben infolge von Setzungen oder Umlagerungen, die durch Schwingungen oder Erschütterungen hervorgerufen werden. Diese Frage ist bei rolligem Untergrund durchaus anders zu behandeln als bei bindigem Material infolge des verschiedenen Verhaltens dieser beiden Erdstoffarten gegenüber dynamischen Kräften.

Daneben stehen zwei Fragen, bei denen zwar die Materialkennzahlen des Untergrundes ebenfalls von Bedeutung sind, aber der Unterschied von rolligem und bindigem Material keine wesentliche Rolle spielt. Einmal taucht die Frage auf, ob durch dynamisch angeregte Fundamente benachbarte Bauwerke zu Schwingungen angeregt werden können, die in irgendeiner Form im oder am Bauwerk selbst schädlich wirken; zum anderen gehen bei der Schwingungsberechnung von mehrgliedrigen Fundamenten die dynamischen Eigenschaften des Baugrundes mit ein. Man wird also bei der Berechnung eines Fundamentes den Einfluß des Untergrundes nicht vernachlässigen können, und es ist Aufgabe der Baugrunduntersuchung, dem Projektanten die erforderlichen Angaben zu machen.

Selbstverständlich werden manchmal auch Spezialfragen auftreten; z.B. ob ein Schwingungsmeßlabor durch ein geplantes Maschinenfundament gestört werden kann und ähnliches. Doch sind alle diese Fragen prinzipiell in den drei erwähnten Grundfragen enthalten, lediglich die Grenzen der zulässigen dynamischen Wirkungen werden hier stark variiert. Selbstverständlich ist auch bei eventuell auftretenden Schadensfällen die Beantwortung der Frage, ob einer der drei angeführten Schadensgründe vorliegt, entscheidend für die Feststellung, ob dynamisch hervorgerufene Schäden vorliegen.

Das wohl schwierigste Problem, das, wenn es vollständig gelöst werden könnte, die beiden anderen automatisch mit einschließen würde,

ist das an erster Stelle erwähnte. Selbst unter der Annahme, daß man den zeitlichen Ablauf der Setzungen nicht zu wissen braucht, sondern sich mit dem Endzustand begnügt, wäre für eine Vorausberechnung notwendig:

1. Die Kenntnis der Verteilung der stationären Schwingungen im Boden, also eine Angabe über die Teilchenbewegung im Boden an jeder Stelle nach Abklingen der Setzungen.
2. Eine Angabe, bis zu welcher Lagerungsdichte sich das jeweilige Erdmaterial durch Schwingungen verdichten läßt, wobei als Parameter eingehen:
 - a) der Feuchtigkeitsgehalt des Untergrundes
 - b) die Amplitude der Schwingungen (vertikal und horizontal)
 - c) die Frequenz der Schwingungen
 - d) der statische Druck, unter dem sich das Material befindet

Für die Kenntnis der Verteilung der stationären Schwingungen ist selbstverständlich Voraussetzung, daß man über die "Schwingungsquelle", also das Fundament und die erregende Maschine, alle Angaben hat, d.h. auch z.B. die Exzentrizität von rotierenden Teilen usw. Meist können vom Herstellerbetrieb der Maschinen nur Grenzwerte angegeben werden, so daß hier bereits die erste Fehlerquelle liegt.

Aus diesen Angaben und aus den Bodeneigenschaften muß nun zunächst die Schwingung der Grundfläche des Fundamentes berechnet werden. Hierfür sind zur Zeit zwei Verfahren üblich. Das eine betrachtet den Boden als eine Feder, eventuell mit Dämpfung und nicht linear, so daß man auf dieses System die üblichen Schwingungsgleichungen anwenden kann. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in seiner Übersichtlichkeit und Einfachheit. Man muß für den Boden die Federkonstante und die Dämpfung bestimmen. Dazu wird ein mechanischer Einmassen-Schwingungserreger verwendet, der rotierende Unwuchten besitzt, deren Größe und Exzentrizität bekannt und gewöhnlich verstellbar sind. Wenn man eine Reihe von Messungen bei verschiedenen Frequenzen durchführt, erhält man eine Resonanzkurve, bei der die Amplitude als Funktion der Frequenz aufgetragen ist. Natürlich ist es für die genaue Auswertung notwendig, daß eine scharfe Resonanzstelle innerhalb des Meßbereiches liegt. Dies bedingt, daß der Schwingungserreger ein verhältnismäßig hohes Gewicht besitzt; mit Geräten unter einer Tonne dürften derartige Messungen kaum Sinn

haben. Aus der Resonanzstelle und der Amplitude läßt sich dann eine äquivalente Federkennzahl und Dämpfung ausrechnen, wobei die Federkennzahl in der Baugruddynamik als "dynamische Bettungsziffer" bezeichnet wird.

Dieses Verfahren führt nun leider auf einige Schwierigkeiten beim Versuch, die im Kleinexperiment gewonnenen Ergebnisse auf die Großausführung zu übertragen. Es scheint logisch, die Bettungsziffer proportional der Grundfläche des Fundamentes anzusetzen, doch Versuche zeigten immer wieder, daß ein derartig einfacher Zusammenhang nicht besteht. Auch die Annahme einer mitschwingenden Bodenmasse, deren Größe rein experimentell festgelegt wird, ist letzten Endes unbefriedigend. Aus der Sowjetunion sind Methoden bekannt, eine Abhängigkeit der Bettungsziffer von der Grundfläche abzuschätzen. Noch erheblich größere Schwierigkeiten treten bei dem Versuch auf, die sogenannte "Dämpfung" des Bodens zu übertragen.

Alle diese Schwierigkeiten sind auf die Tatsache zurückzuführen, daß man im Interesse der Vereinfachung des Problems ein physikalisch falsches Modell benutzt hat. Der Boden ist nicht eine Feder, die endliche Abmessungen und - innerhalb gewisser Grenzen - eine feste Federkonstante besitzt, sondern ein praktisch unendliches Medium, das elastische Wellen fortleitet, wobei dem Schwingungserreger Energie entzogen wird. Aus diesem Grunde ist zu erwarten, daß ein rechnerischer Ansatz, der von einer derartigen Konzeption ausgeht, zu erheblich genaueren und trotz anfänglich größerer mathematischer Schwierigkeiten letzten Endes in der Praxis zu einfacheren Methoden der Baugrunduntersuchung führen wird.

Bei den verschiedenen in dieser Art durchgeführten Arbeiten, von denen ich hier Reissner als ersten erwähne, obwohl seine Arbeit einen Vorzeichenfehler enthält, Arnold, Bycroft und Warburton einerseits und Sechter andererseits, die unabhängig voneinander an dieses Problem gingen, wobei für alle die Arbeit von Lamb aus dem Jahre 1903 der Ausgangspunkt ist, wird generell ein elastisches Medium als Halbraum angenommen. Gemeinsam ist den drei erwähnten Arbeiten weiter, daß die Oberfläche des Halbraumes spannungsfrei sein soll, lediglich für eine Kreisfläche wird eine harmonische Normalspannung angesetzt. Eine derartige Voraussetzung ist nicht physikalisch einwandfrei, da die Spannungen, die zwischen der Grundfläche des Schwin-

gungserregers und dem Boden auftreten, in ihrer Verteilung nicht bekannt sind. Reissner nahm konstante Druckamplitude an und berechnete daraus die Schwingungen; Sechter benutzte den gleichen Ansatz, stellte aber nicht nur einen Vorzeichenfehler bei Reissner fest, sondern auch, daß sich der Grundkreis bei einer derartigen Voraussetzung durchbiegen müßte, da Mitte und Außenkante beträchtliche Amplitudenunterschiede aufweisen. Aus diesem Grunde nahm sie als Näherungslösung einen Mittelwert dieser beiden Amplituden. Arnold, Bycroft und Warburton schließlich nahmen als Verteilung der Spannungsamplitude diejenige, die beim statischen Fall unter einer belasteten starren Platte auftritt und wiesen in ihrer Arbeit nach, daß dies den wahren Werten sehr nahe kommt, solange die Frequenzen nicht allzu groß werden. Auch unter diesen Voraussetzungen würde aber eine geringe Verbiegung auftreten. Der physikalisch einwandfreie Ansatz, daß die Bewegungen aller Teilchen dieser Fläche gleiche Amplituden und Phasen besitzen müssen, führt auf derartige mathematische Schwierigkeiten, daß mir noch keine Lösung bekannt geworden ist.

Abgesehen von gewissen Differenzen in der Definition, die zu verschiedenen Vorzeichen führen, wird die vertikale Komponente der Schwingung in den 3 zitierten Arbeiten dargestellt durch

$$w = \frac{P_0 e^{ipt}}{r_0 \mu} (f_1 + i f_2)$$

Hierbei sind f_1 und f_2 zwei reelle Funktionen der dimensionslosen Größe $a_0 = \left(\frac{\rho}{\mu}\right)^{1/2} \cdot p \cdot r_0$, wobei die Poisson'sche Konstante des Bodens als Parameter eingeht. ρ ist die Dichte des Bodens im natürlichen erdfuchten Zustand. P ist die Kraftamplitude, p die Winkelgeschwindigkeit der Schwingung, also das 2π -fache der Frequenz und μ ist eine Lamé'sche Konstante. Leider ist die Bezeichnungweise auf diesem Gebiet nicht einheitlich. In der Technik werden gewöhnlich der Elastizitätsmodul und der Schubmodul benutzt; in der Schwingungs- und Wellentheorie erweisen sich die Lamé'schen Konstanten λ und μ als praktischer, wobei μ mit dem Schubmodul übereinstimmt. Als unschöne Tatsache sei noch erwähnt, daß μ auch teilweise für die Poisson'sche Konstante in der Literatur verwendet wird, ebenso auch σ oder ν . Mit r_0 ist der Radius des die Schwingung erregenden Grundkreises bezeichnet.

Da die Funktionen f_1 und f_2 unter den verschiedenen erwähnten Annahmen vorliegen, ist es möglich, auch unter Annahme einer starren Masse, die kreisförmige Grundfläche besitzt und auf die eine harmonische Kraft wirkt, die Schwingung nach Phase und Amplitude zu berechnen. Dies ist von den erwähnten Autoren durchgeführt worden, und von Dr. Just und dem Vortragenden ist für die Fälle einer Poisson'schen Konstanten $\sigma = 0,25$, wie es im erdfeuchten Zustand etwa zutrifft, und für $\sigma = 0,5$, wie es im wassergesättigten Zustand nahezu gilt, ein kompletter Satz Musterkurven veröffentlicht worden, der sich auf die Berechnungen von Arnold, Bycroft und Warburton stützt.

Hierbei wurde sowohl der Fall konstanter Kraftamplitude als auch der einer proportional dem Quadrat der Frequenz veränderlichen Kraftamplitude, wie er bei exzentrisch rotierenden Massen auftritt, angegeben. Auffallend ist, daß die Maximalamplitude eines derartigen Einmassenschwingers mit rotierenden Unwuchten, wenn die Poisson'sche Konstante bekannt ist, nur von der Dichte des Untergrundes und den Daten des Schwingungserregers abhängt, aber nicht von den anderen Kennzahlen des Bodens (Elastizitäts- und Schubmodul). Diese bestimmen lediglich die Resonanzfrequenz. Bei diesen Berechnungen spielt die Dämpfung des Bodens keine Rolle, da hierdurch nur die Wellen im Boden in geringerer Entfernung bereits abklingen, aber die Bewegung des Schwingungserregers kaum beeinflusst wird.

Die Richtigkeit der theoretischen Berechnungen wurde durch Messungen des Instituts für Baugrundmechanik der TU Dresden in eindrucksvoller Weise bestätigt (Bild 1).

Mit Hilfe eines Schwingungserregers können also, ebenso wie bereits zuvor erwähnt, die Amplituden in Abhängigkeit von der Frequenz bei konstanter Exzentrizität gemessen werden. Die Dichte des Bodens ist in den meisten Fällen bereits aus Bodenuntersuchungen bekannt, sonst ist sie leicht festzustellen. Mit Hilfe der Musterkurven für den Schwingungserreger sind dann die Bodenkennwerte unter Annahme einer Poisson'schen Konstanten leicht zu errechnen. Hierbei treten aber in der Praxis zwei Schwierigkeiten auf:

1. Die Transversalwellengeschwindigkeit $\sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$, deren reziproker Wert bei sämtlichen Untersuchungen eine große Rolle spielt, hängt

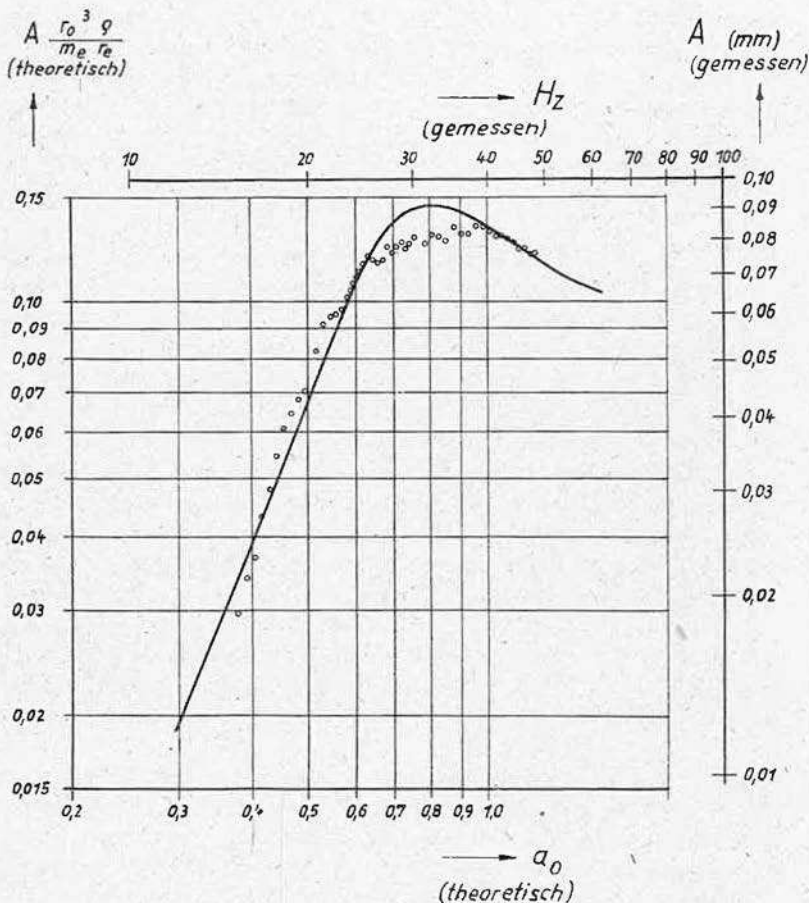


Bild 1

Theoretische Kurve für $b = 10$ bei konstanter Exzentrizität und $\sigma = 0,25$ im doppeltlogarithmischen Maßstab dargestellt. Die zugehörigen Einheiten sind links und unten in der Zeichnung. Dazu eingetragen sind die Meßpunkte, wie sie bei der Messung des Instituts für Grundbau und Baugrundmechanik der TU Dresden auf dem Heller gewonnen wurden. Die zugehörigen Einheiten befinden sich oben und rechts.

außer von der Lagerungsdichte auch vom Druck ab. Es ist also notwendig, Schwingungsuntersuchungen mit verschiedener Bodenpressung durchzuführen, um einen Anhalt über die Abhängigkeit der Transversalwellengeschwindigkeit vom statischen Druck zu gewinnen.

2. Dadurch, daß der Untergrund gewöhnlich geschichtet ist, besteht die Möglichkeit der Reflexion von Wellen und für das Auftreten von stehenden Wellen. Hierdurch wird die theoretische Amplitudenkurve wellenförmig überlagert. Das Fundament bzw. der Schwingungserreger übernimmt nämlich von der reflektierten Welle eine in der Frequenz zwar gleiche, in Phasenlage und Amplitude gewöhnlich verschiedene Schwingung. Infolge seiner Massenträgheit wird diese Welle selbst noch verändert und gleichzeitig eine überlagernde Störschwingung im Boden erzeugt, die ihrerseits einen entsprechenden Reflexionsprozeß durchläuft.

Das Verhalten einer Masse auf dem schwingenden elastischen Halbraum ist von Herrn Dr. Just und mir auf Grund der Untersuchungen, die an die Arbeit von Arnold, Bycroft und Warburton anknüpften, berechnet worden; die Ergebnisse liegen ebenfalls in Form einer Veröffentlichung vor, bei der aus Musterkurven die Amplitudenveränderung und Phasenverschiebung der Bodenbewegung durch das Aufsetzen einer Masse mit kreisförmiger Grundfläche und auch die zusätzliche Störschwingung, die im Boden entsteht, nach Phasenlage und Amplitude entnommen werden können.

Trotzdem scheint es aber unmöglich, die durch Reflexion hervorgerufenen Veränderungen des Schwingungsbildes genau zu analysieren. Dagegen ist es möglich, unter der Annahme, daß ein fester Prozentsatz der Schwingungsamplitude durch Reflexion wieder an die Oberfläche kommt und der weiteren Annahme, daß die reflektierte Welle eine genau in Phase bzw. Gegenphase laufende Zusatzbewegung des Schwingungserregers hervorruft, Grenzkurven für die Amplituden anzugeben, zwischen denen sie irgendwie pendeln werden. Es zeigt sich, daß durch derartige Grenzkurven die Auswertung der Meßergebnisse erleichtert wird.

Auf diese Art ist es also möglich, die Eigenbewegungen eines dynamisch angeregten Fundamentes einigermaßen vorauszuberechnen und eventuell sogar gewisse Angaben über die möglichen Abweichungen dieser Bewegung auf Grund von Reflexionen zu machen. Ebenfalls ist es möglich, im voraus zu errechnen, welche Schwingungen ein Gebäude aus dem Boden übernehmen wird, wenn man die Schwingungen vor Errichten des Gebäudes messen kann.

Vom Praktiker wird nun immer wieder gefragt, welche Tiefe bei Messungen mittels eines Schwingungserregers erfaßt wird. Wir sahen schon, daß die Reflexionen auch aus größeren Tiefen Einfluß haben, daß also praktisch der ganze Halbraum erfaßt wird. Aber die Frage ist ja wohl die nach der Übertragbarkeit der Modellversuche mit Hilfe des Schwingungserregers; welcher Bereich des Bodens wirklich Einfluß auf die Bewegung unter Vernachlässigung von Reflexionen hat. Diese Frage ist bisher noch nicht geklärt; es scheint aber naheliegend, daß die Wellenlänge der erzeugten elastischen Wellen im Boden hierbei eine große Rolle spielt. Es ist also anzustreben, daß das System Schwingungserreger + Boden seine Resonanzstelle - aus der ja in erster Linie die Aussagen über die Bodeneigenschaften gewonnen werden - in dem Frequenzbereich hat, über den die Aussagen verlangt werden. Dies bedingt aber entweder mehrere Schwingungserreger oder eine extreme Variationsmöglichkeit für einen einzelnen Schwingungserreger, wenn man allen anfallenden Aufgaben gerecht werden will.

Wenn auch auf die Schwingungserreger und die Arbeit mit ihnen hier nicht näher eingegangen werden soll, so möchte ich doch auf zwei Punkte hinweisen:

1. Aus dem oben gesagten geht hervor, daß die Messungen auf der geplanten Gründungssohle erfolgen sollen.
2. Die Messungen müssen im stationären Zustand erfolgen. Es ist zwar sehr bequem, den Schwingungserreger auf Höchsttouren zu bringen, dann auszuschalten und den Auslaufvorgang zu registrieren. Dieser instationäre Vorgang ist aber auswertetechnisch kaum zu erfassen; Resonanzstellen werden dabei abgeflacht und in ihrer Frequenz verschoben; durch Reflexionen von Wellen anderer Frequenz treten Schwebungen und Oberwellen auf und damit ist eine brauchbare Aussage fast unmöglich.

Selbstverständlich sind die für kreisförmige Grundflächen gültigen Formeln näherungsweise für quadratische und rechteckige Grundflächen gleicher Größe verwendbar, so daß gewöhnlich keine Bedenken bei ihrer Verwendung bestehen; es ist aber noch eine genauere Untersuchung erforderlich, bis zu welchem Seitenverhältnis bei Rechtecken dies zulässig ist.

Mit Hilfe der Funktionen f_1 und f_2 sind bei Kenntnis der Bodenkonzstanten auch die Berechnungen der Bewegungen von 2-Massenschwingern, d.h. von Gebilden, die aus 2 durch eine Feder mit Dämpfung verbundenen Massen bestehen, auf dem Boden möglich. Der hierfür benötigte Formelapparat ist von mir aufgestellt worden, und es wurde auch ein Beispiel durchgerechnet. Diese Berechnungen sind aber sehr zeitraubend und umständlich. Prinzipiell ist natürlich auch die Übertragung auf Mehrmassensysteme möglich, doch läßt sich in den meisten Fällen in guter Näherung ein 2-Massensystem als Grundlage verwenden.

Es bleibt lediglich die Frage, ob es in solchen Fällen nicht sinnvoller ist, dem Boden für den Einmassenschwinger entsprechender Dimensionen eine Federkonstante mit Dämpfung zuzuordnen, wie es im interessierenden Frequenzbereich möglich ist (von Sechter wurde darauf hingewiesen), und diese Werte in die Berechnungen für den Mehrmassenschwinger zu übernehmen. Eine Überprüfung der dadurch sich möglicherweise ergebenden Fehler steht allerdings noch aus, diese würde aber eine große Arbeitserleichterung bei den Berechnungen bedeuten.

Von den zitierten Autoren wurden auch horizontale Bewegungen und Schaukelbewegungen untersucht. Mit diesem Problem haben wir uns bisher nicht befaßt, und zwar aus folgendem Grunde:

In beiden Fällen ist wesentlich die Ankopplung der Bodenfläche an den Untergrund und besonders gehen auch die Verhältnisse an den vertikalen Fundamentwänden mit ein. Gerade letztere hängen aber von so vielen Zufälligkeiten bei der Herstellung der Fundamente ab, daß von einer Aussage genügender Genauigkeit keine Rede mehr sein kann, selbst wenn man bei der Untersuchung bei sauberster Arbeit noch einigmaßen zuverlässige Werte erhalten sollte. Wir

sind damit leider bereits am Ende dessen angelangt, was man als einigermaßen gesicherte wissenschaftliche Ergebnisse bezeichnen kann. Es besteht also die Möglichkeit, über das Verhalten eines dynamisch angeregten Fundamentes selbst einigermaßen sichere Voraussagen zu machen. Dagegen gibt es über das Verhalten des Sandes selbst noch keine endgültigen Aussagen. Aus einer Reihe von Versuchsserien, die auf dem Rütteltisch mit Probesanden in Gefäßen durchgeführt worden sind, geht hervor, daß die verwendeten Fein- bis Grobsande in einem bestimmten Frequenzbereich sehr stark auf Schwingungen reagieren; diese Frequenzen scheinen nicht von der Versuchsanordnung abzuhängen. In Übereinstimmung damit wurde festgestellt, daß die Rüttelverdichter (Vibrationsplatten) trotz ihrer erheblich niedrigeren Betriebsfrequenz im Boden gerade diese Frequenzen besonders stark erzeugen. Dagegen ist noch keine eindeutige Abhängigkeit etwa der erreichbaren Lagerungsdichte von der Schwingungsamplitude bei einer bestimmten Frequenz bekannt. Dieses Problem muß noch in umfangreichen Versuchsserien untersucht werden, ehe eine befriedigende Antwort auf die gestellte Frage zu erwarten ist, wobei hier nur auf die unterschiedlichen Bedingungen im Labor und in der Natur als erschwerender Umstand hingewiesen werden soll.

Es ist ja bekannt, daß die Einrüttelfähigkeit von Sanden stark von dem Feuchtigkeitsgehalt des Bodens abhängt; der Sand ist maximal einrüttelbar, wenn er wassergesättigt oder völlig trocken ist. Offensichtlich wirkt die Oberflächenspannung des Porenwassers einer Einrüttlung entgegen. Eine Bestätigung dieser Vermutung ist darin zu sehen, daß beim anfeuchten erdfeuchten Bodens mit entspanntem Wasser (wir haben eine Fit-Lösung benutzt) die Einrüttelfähigkeit sich merklich steigerte. Auch die Bedeutung von Kornverteilung und Kornform auf die Einrüttelfähigkeit soll hier als allgemein bekannt nur erwähnt werden. Auch die Erhöhung der notwendigen Energie zur Erzielung einer merklichen Wirkung beim Vorhandensein einer statischen Vorbelastung ist eine bekannte Tatsache. Diese Fakten sind alle zwar qualitativ bekannt, bisher gibt es aber noch keine quantitativen Beziehungen. Daher geht man von Erfahrungswerten aus, die besagen, daß bei einer relativen Lagerungsdichte von 0,7 auch im ungünstigsten Falle mit Umlagerungen im Untergrund durch dynamische Einwirkung nicht mehr zu rechnen ist. Allerdings ist die Voraussetzung, daß der Boden gleichförmig ist. Bei ungleichförmigem Boden

muß gefordert werden, daß der gesamte interessierende Bereich eine Lagerungsdichte besitzt, die größer oder gleich 0,7 ist. Allerdings treten so hohe Anregungen, daß man mit einer derartig starken Einrüttlung rechnen muß, nur selten auf. Wenn wir z. B. moderne Kraftwerke betrachten, dann können wir nach bisherigen Erfahrungen getrost voraussetzen, daß von den Turbinen und Generatoren nur ganz minimale Schwingungen im Boden erzeugt werden, die auch bei einer relativen Lagerungsdichte von 0,5 keine Schäden mehr hervorrufen. Dabei darf man aber nicht übersehen, daß in Kraftwerken auch Hilfsmaschinen laufen, die teilweise erheblich stärkere Schwingungen hervorrufen. Wenn derartige Maschinen dicht neben anderen Fundamenten arbeiten (z. B. neben Turbinen- oder Kesselfundamenten), dann kann neben einer eventuell zwar großen, aber harmlosen Setzung des Hilfsmaschinenfundamentes eine geringere ungleichmäßige Setzung des benachbarten Fundamentes hervorgerufen werden, die eventuell schwere Schäden hervorruft. Auf diesen Punkt ist bisher im Energiebau noch zu wenig geachtet worden.

Auch das Problem der Wellenausbreitung im Untergrund ist noch nicht geklärt. Grundsätzlich ist zwar bekannt, daß sowohl Oberflächenwellen, die sich kreisförmig ausbreiten und nach der Tiefe zu exponentiell abnehmen, als auch Raumwellen entstehen, die sich kugelförmig ausbreiten. Es ist aber weiter bekannt, daß in der Nähe der Quelle auch Wellen existieren, die schneller abklingen als die normalen Kugelwellen. Damit kann man nicht einfach aus der Bewegung des Schwingungserregers auf die Amplitude in einiger Entfernung vom Schwingungserreger schließen, denn es ist wahrscheinlich, daß die Amplituden schneller abklingen als nach den üblichen Überlegungen zu erwarten wäre. Dazu kommt noch eine Dämpfung im Boden, die eine weitere Verringerung der Amplitude hervorruft. Man sieht, daß man unter Annahme halbkugelförmiger Ausbreitung in größeren Tiefen bestimmt zu hohe Werte für die Amplituden erhält. In der Nähe der Oberfläche muß eine ebene Ausbreitung vorausgesetzt werden, für die praktisch die gleichen Überlegungen zutreffen.

Aus dem vorstehenden ist folgende ideale Arbeitsweise für die Baugrunduntersuchung für dynamisch belastete Fundamente notwendig:

In der Vorplanung sollte zusätzlich zu den üblichen Untersuchungen,

die aus einem geologischen Gutachten und gewöhnlich einigen wenigen Bohrungen bestehen, möglichst auch eine Flächenuntersuchung durchgeführt werden, um die Homogenität des Baugrundes in groben Zügen abzuschätzen. Hierfür eignet sich besonders die Methode der geoelektrischen Kartierung, die gleichzeitig anzeigt, an welchen Punkten genauere Untersuchungen besonders sinnvoll sind. Diese Untersuchungen müssen so genau sein, daß eine Standortwahl, bei der man meistens aus ökonomischen Gründen keinen sehr großen Spielraum hat, getroffen werden kann.

Für das Ausführungsprojekt sind nun zusätzlich zu den üblichen Untersuchungen folgende Überprüfungen notwendig:

Der Bereich, der als dynamisch gefährdet zu betrachten ist, muß auf seine Homogenität bzw. Inhomogenität untersucht werden, damit unterschiedliche Setzungen und ein Schrägstellen der Fundamente vermieden werden. Auch hierfür ist die Methode der geoelektrischen Kartierung mit einem dichten Raster das geeignete Mittel, da sie schnell und ohne Probenentnahme arbeitet. Dieses Verfahren gibt aber keine für die Praxis brauchbaren Bodenkennwerte an, sondern es zeigt nur, wie weit man die aus anderen Methoden gewonnenen Werte von der Bohrung aus noch seitlich als zutreffend ansehen kann. Das Verfahren der Refraktionsseismik, das durch die Angabe der Longitudinalwellengeschwindigkeit einen Anhaltspunkt für die Lagerungsdichte gibt, versagt leider praktisch unterhalb des Grundwasserspiegels, so daß es nur selten eingesetzt werden kann.

Wenn eine spezielle dynamische Untersuchung erforderlich ist, muß mit einem Schwingungserreger auf der Gründungssohle gemessen werden, wie es weiter oben geschildert worden ist. Diese Messungen erfordern einigen Aufwand, so daß man sie selbstverständlich nur bei besonders wichtigen Bauten durchführen wird.

Sollte die relative Lagerungsdichte des rolligen Bodens gering sein, etwa unter 0,5, dann ist eine genauere Untersuchung notwendig, soweit nicht von Anfang an eine Bodenverbesserung vorgesehen ist. Ein wesentliches Kriterium ist der prozentuale Betrag, um den sich der Boden einrütteln läßt. Ein Material, das sich nur wenig

einrütteln läßt, kann auch bei geringerer Lagerungsdichte noch ausreichen. Aus diesem Grunde scheinen Versuche mit Bodenproben auf dem Rütteltisch schon sinnvoll, auch wenn heute noch keine genauen Richtwerte für diese Untersuchungen existieren. Weiter kann man nur noch verlangen, daß in einem solchen Falle eine laufende Überwachung der Bauwerke erfolgt, möglichst auch mit der Schlauchwaage, und daß, wie heute bereits üblich ist, Vorkehrungen für Verpressungen getroffen werden.

Eine Abschätzung der Störschwingungen, die andere Gebäude erschüttern werden, ist heute noch nicht möglich.

Wir sehen also, daß an eine Vorausberechnung von Setzungen, wie sie für statische Belastung des Bodens möglich ist, bei dynamischer Belastung noch nicht zu denken ist. Lediglich einige grobe Verfahren existieren, um schwere Schäden zu verhindern. Doch ist bisher immer noch eine zu hohe Forderung notwendig, um die Sicherheit der Bauwerke zu garantieren. Hierdurch werden teilweise ungeheure Summen ausgegeben, die bei besserer Kenntnis der Naturgesetze, die für die Umlagerungen und die Wellenausbreitung im Untergrund maßgeblich sind, eingespart werden könnten.

Aus diesem Grunde ist auf den erwähnten Gebieten noch viel Arbeit zu leisten, und ich kann nur hoffen, daß von möglichst vielen Stellen dieses umfangreiche Gebiet bearbeitet wird.