

Heimarbeit VO 203.481

K.Alten 0347252

1. Einleitung

Betrachtet wird ein Rechteckfundament aus Beton mit den Abmessungen

$W = 5\text{m}$,

$L = 7\text{m}$ und

$H = 1\text{m}$ mit der Dichte

$\rho = 2500\text{ kg/m}^3$.

Es soll untersucht werden, wie sich dieses als **starr** angenommene Fundament bei künstlicher Schwingungsanregung auf folgendem Boden verhält:

Homogener, isotroper, elastischer Halbraum mit Dichte

$\rho = 1600\text{ kg/m}^3$

$G = 1.28 \times 10^5\text{ kN/m}^2$ (dyn. Schubmodul) und

$\nu = 0.3$ (Poissonzahl).

Die Schwingungsanregung auf diesem Fundament besteht aus 2 Varianten:

I. Einer harmonischen vertikalen Kraftanregung mit 20 Hz und 300 kN sowie

II. einer Impulsanregung mit 5000 kN von 0.03 s Dauer (Halbsinus).

Diese Angaben entsprechen im Wesentlichen dem Übungsbeispiel der VO *Baudynamik und Erdbeben* und werden im Blatt *System* des mitgelieferten Excels *SS2017_Heimarbeit_Kalten.xlsx* beschrieben. Für die vorliegende Heimarbeit wurden verschiedene Ansätze der Darstellung der Baugrundnachgiebigkeit und folglich die Berechnung der maximalen Verformung verglichen.

2. Boden-Bauwerk-Interaktion

Stark vereinfacht kann das System Boden-Bauwerk als Masse-Feder-Dämpfer System modelliert werden um die Wechselwirkung zwischen Boden und Fundament zu berücksichtigen. Für diese Formulierung als Einmassenschwinger gilt es geeignete Werte der Systemparameter (Masse, Federkonstante, Dämpfung) zu bestimmen.

Bei der Ermittlung dieser dynamischen Bodenkennzahlen stehen folgende Ansätze zur Verfügung:

- Federkonstante aus dem dynamischem Bettungsmodul bestimmen
- Federkonstante und Dämpfung aus Halbraumersatzgrößen ermitteln sowie
- Federkonstante und Dämpfung „exakt“ aus Impedanzfunktionen ermitteln.

Die Federkonstante und der Dämpfungswert beschrieben hierbei die **dynamischen** Bodenkennzahlen und unterscheiden sich beim aufwendigen Lösungsansatz c) von den **statischen** Werten der einfacheren Ansätze a) und b). In Kapitel 3 werden die Methoden a) bis c) im Detail erläutert.

Nach Ermittlung der Feder- und Dämpfungskonstanten wird die max. Auslenkung $u(t)$ des Fundaments bei den Schwingungsanregungen I und II berechnet. Dies erfolgt sowohl analytisch als auch numerisch und geschieht für eine harmonische

Anregung (I) auf Basis der Bewegungsgleichung des ungedämpften Systems mittels der Gleichung

$$u(t) = \frac{p_0}{k} \cdot \frac{1}{(1 - \beta^2)} \cdot (\sin \omega t - \beta \sin \omega_0 t)$$

Hierin stellt p_0 die Kraftamplitude dar und $\beta = \frac{\omega}{\omega_0}$, wobei ω die Anregungsfrequenz und ω_0 die Eigenfrequenz ist. Für die durch Dämpfungszahl ξ gedämpfte Schwingung lautet die Gleichung

$$u(t) = \frac{p_0}{k} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \cdot (\sin \omega t - \Theta)$$

Für die impulsartige Anregung (II) wird der Verstärkungsfaktor aus einem Diagramm in der Literatur [2] abgelesen.

3. Bestimmung der dynamischen Bodenkennzahlen

3.1. Ermittlung via Bettungsmodul

Für **starre, kreisförmige** Fundamente kann die vertikale Bettungszahl C_v als Funktion des E-Moduls E des Bodens, der Poissonzahl ν sowie der Fundamentfläche A bestimmt werden [2]:

$$C_v = 1.13 \frac{E}{(1 - \nu)\sqrt{A}}$$

Der E-Modul eines Bodens kann aus dem im Labor bestimmten Steifemodul E_S (Kompressionsversuch mit verhinderter Seitendehnung) folgendermaßen berechnet werden:

$$E = E_S \frac{(1 - \nu - 2\nu^2)}{1 - \nu}$$

Man sieht hier bereits die Limitierung des Ansatzes, da es sich bei den Laborwerten meist um statische Steifemoduli handelt. Eine Umrechnung vom statischen auf den dynamischen Steifemodul für einen bestimmten Bodentyp erfolgt meistens anhand von Näherungswerten aus der Literatur.

Anmerkung: Soll das Fundament als **schlaff** betrachtet werden, ist statt E der dynamische Steifemodul $E_{S,dyn}$ sowie ein Beiwert f bzw. f' (tabellarisch verfügbar für jeweils vertikale und kippende Lasten) zu verwenden (Rausch (1969) laut [3]).

$$C_{v,schlaff} = \frac{E_{S,dyn}}{f\sqrt{A}}$$

$$C_{kipf,schlaff} = \frac{E_{s,dyn}}{f' \sqrt{A}}$$

Anhand der oben definierten Bettungsmoduli lassen sich die Federkonstanten des Bodens unter einem Fundament wie folgt bestimmen:

$$k_v = C_v \cdot A$$

$$k_h = C_h \cdot A$$

$$k_{kipf} = C_{kipf} \cdot I$$

Hier ist I das Trägheitsmoment der Fundamentfläche um die untersuchte Achse und es gilt für den horizontalen Bettungsmodul die Beziehung $0.3 \cdot C_v \leq C_h \leq 0.5 \cdot C_v$. Diese Vorgehensweise wird für das in der Einleitung beschriebene Fundament im Excel-Blatt *Bettungsmodul* des Files *SS2017_Heimarbeit_Kalten.xlsx* durchgeführt und aus den Steifigkeitswerten sowie den Angaben zur Schwingungsanregung die max. Verformung berechnet.

3.2. Ermittlung via Halbraumersatzgrößen

Eine detailliertere Betrachtung der dynamischen Bodenkennwerte ist durch die Formulierung der Feder- und Dämpferwerte mittels Halbraumersatzgrößen möglich. Diese Parameter sind – analog zur Formulierung mittels der Bettungszahlen – zwar frequenzunabhängig, jedoch wird mittels einer fiktiven Zusatzmasse dem Umstand Rechnung getragen, dass die Steifigkeit in der Realität mit zunehmender Frequenz abnimmt.

Die Feder- und Dämpfungskonstanten werden für verschiedene Schwingungsformen entsprechend der untenstehenden Tabelle 1 ermittelt [1]. Die Dämpfung bezieht sich hierbei rein auf die geometrische Dämpfung aufgrund von Energieabstrahlung in den Halbraum und beinhaltet keine Materialdämpfung. Die Steifigkeit jeder Bewegungsform entspricht dem jeweiligen statischen Fall; der Ersatzradius r ist je nach Bewegungsform zu ermitteln.

Tabelle 1. Gleichungen für dynamische, frequenzunabhängige Baugrundersatzgrößen

Schwingungsform	Statische Steifigkeit k	Massenverhältnis B	Dämpfungsverhältnis ξ	Fiktive Zusatzmasse
Vertikal	$k_v = \frac{4Gr}{1-\nu}$	$B_v = \frac{m(1-\nu)}{4\rho r^3}$	$\xi_v = \frac{0.425}{\sqrt{B_v}}$	$fikt. Masse_v = \frac{0.27m}{B_v}$
Horizontal	$k_h = \frac{8Gr}{2-\nu}$	$B_h = \frac{m(2-\nu)}{8\rho r^3}$	$\xi_h = \frac{0.29}{\sqrt{B_h}}$	$fikt. Masse_h = \frac{0.095m}{B_h}$
Kippen	$k_{kipf} = \frac{8Gr^3}{3(1-\nu)}$	$B_{kipf} = \frac{3I_y(1-\nu)}{8\rho r^5}$	$\xi_{kipf} = \frac{0.15}{(1+B_{kipf})\sqrt{B_{kipf}}}$	$fikt. Masse_{kipf} = \frac{0.24I}{B_{kipf}}$
Torsion	$k_{tors} = \frac{16Gr^3}{3}$	$B_{tors} = \frac{I_z}{\rho r^5}$	$\xi_{tors} = \frac{0.5}{(1+2B_{tors})}$	$fikt. Masse_{tors} = \frac{0.24I}{B_{tors}}$

Die Berechnungen der dynamischen Bodenkennwerte gemäß Tabelle 1 für das oben definierte Fundament sowie die daraus resultierenden maximalen Verformungen bei Anregung I und II befinden sich im Blatt *Halbraumgrößen* des Files *SS2017_Heimarbeit_Kalten.xlsx*.

3.3. Ermittlung via Impedanzfunktionen

Die exakteste Variante der Berücksichtigung der Bodennachgiebigkeit ist die Formulierung der dynamischen Bodenkennwerte in Form von sogenannten komplexen Ersatzfedersteifigkeiten bzw. Impedanzfunktionen. Die Impedanzfunktion stellt die Bodennachgiebigkeit als Funktion der Frequenz dar und ergibt sich aus dem komplexen Verhältnis zwischen Anregungskraft $p(t)$ und Verformung $u(t)$. Für einen Einmassenschwinger mit der Masse m unter harmonischer Anregung mit Frequenz ω lässt sich die Impedanz K folgendermaßen formulieren:

$$K = \frac{p(t)}{u(t)} = (k - m\omega^2) - ic\omega$$

In einer allgemeineren Form lässt sich die komplexe Ersatzfedersteifigkeit für eine bestimmte Schwingungsform j ausdrücken als

$$K_j = k_{j,s} [\kappa_j(a_0) + ia_0 c_j(a_0)]$$

mit $j = v, h, kipp, tors$

$k_{j,s}$ ist die statische Halbraumersatzgröße für die jeweilige Schwingungsform entsprechend Tabelle 3, $\kappa_j(a_0)$ ist die normierte, frequenzabhängige Steifigkeit und $c_j(a_0)$ ist die frequenzabhängige Dämpfung.

$a_0 = \frac{\omega r}{v_s}$ ist eine dimensionslose Frequenz, wobei r der äquivalente Fundamentradius und v_s die Scherwellengeschwindigkeit des Bodens ist [4].

Die Funktionen $\kappa_j(a_0)$ und $c_j(a_0)$ sind aus der Literatur verfügbar und sind für unterschiedliche Einbettungen, Seitenverhältnisse, Poissonzahlen und Fundamentgeometrien bestimmt.

Zum Zweck einer vereinfachten Betrachtung können κ_j und c_j als frequenzunabhängig angenommen werden und die Verformungsberechnung erfolgt anhand der Parameter in Tabelle 2 [1]. Der frequenzunabhängige Faktor c_j bestimmt dabei die „globale“ Systemdämpfung in dem er in das Dämpfungsverhältnis ξ_j über folgende Beziehung einfließt:

$$\xi_j = \frac{c_j}{2\sqrt{\kappa_j \cdot B_j}}$$

Tabelle 2. Parameter für Berechnung mittels frequenzunabhängiger Impedanzfunktionen

Schwingungsform	normierte Steifigkeit κ_j	Dämpfung c_j	Massenverhältnis B_j	Dämpfungsverhältnis ξ_j
Vertikal	1	0.85	$B_v = \frac{m(1-\nu)}{4\rho r^3}$	$\xi_v = \frac{0.425}{\sqrt{B_v}}$
Horizontal	1	0.58	$B_h = \frac{m(1-\nu)}{8\rho r^3}$	$\xi_h = \frac{0.29}{\sqrt{B_h}}$
Kippen	1	$\frac{0.30}{1+B_{kippp}}$	$B_{kippp} = \frac{3I_y(1-\nu)}{8\rho r^5}$	$\xi_{kippp} = \frac{0.15}{(1+B_{kippp})\sqrt{B_{kippp}}}$
Torsion	1	$\frac{\sqrt{B_{tors}}}{1+32B_{tors}/3}$	$B_{tors} = \frac{3}{16} \frac{I_z}{\rho r^5}$	$\xi_{tors} = \frac{0.5}{(1+2B_{tors})}$

Die Berechnung der Fundamentverformung mittels Impedanzfunktionen erfolgt analog zur Vorgehensweise aus Kapitel 3.2. Das obige Beispiel wird im Blatt *Impedanzfunktion* des Excels *SS2017_Heimarbeit_Kalten.xlsx* für den frequenzabhängigen und den frequenzunabhängigen Fall behandelt.

4. Ergebnisse der analytischen Berechnung

Tabelle 3 fasst die analytisch berechneten max. Verformungen $u(t)$ des Fundaments bei Anregung mittels harmonischer und impulsartiger Kraft aus dem Excel-File (Kapitel 3.1 bis 3.3) zusammen.

Tabelle 3. Berechnungsergebnisse der max. Fundamentverformung bei Anregungsformen I & II

Begründung für NaN-Werte: Für Kipp- und Torsionsschwingung stand in der Literatur kein Verstärkungsfaktor im Falle der Impulsanregung zur Verfügung.

Ansatz	Max. Verformung $u(t)$ [mm]							
	Bettungsmodul		Halbraumersatzgröße		Impedanz (f-unabhängig)		Impedanz (f-abhängig)	
Anregung	I	II	I	II	I	II	I	II
Vertikal	0.1670	2.7530	0.0678	3.3383	0.0922	3.6250	0.0988	3.9120
Horizontal	-0.7005	8.1280	0.1511	4.2277	0.1091	3.9791	0.1070	4.0603
Kippen um L	0.0023	nan	0.0011	0.1261	0.0040	nan	0.0055	nan
Kippen um B	0.0012	nan	0.0005	0.0761	0.0024	nan	0.0033	nan
Torsion	-	-	0.0027	0.0575	0.0023	nan	0.0029	nan

Die verschiedenen Ansätze zur Ermittlung der Nachgiebigkeit des Bodens ergeben hierbei verschiedene maximale Verformungen des Fundaments. Für die harmonische Anregung mit 20 Hz, zum Beispiel, liegen die vertikalen Verformungen im Bereich zwischen 0.0988 mm (mit frequenzabhängiger Impedanz) und 0.167 mm (mit dem Bettungsmodul). Dieser Unterschied ist dem Umstand geschuldet, dass beim Verfahren mittels Bettungsmodul keine Dämpfung berücksichtigt wird.

Jedoch kann es auch innerhalb ähnlicher Ansätze mit Berücksichtigung der Dämpfung zu Unterschieden von bis zu 50% kommen: Die vertikale Verformung für Anregung I mittels der Halbraumersatzgrößen liegt bei 0.0678 mm während die

frequenzabhängige Impedanzfunktion einen Wert von 0.0988 mm liefert. Dies resultiert daraus, dass die Steifigkeit und Dämpfung bei der frequenzabhängigen Impedanz gegenüber den Halbraumersatzgrößen abgemindert werden und folglich der Verstärkungsfaktor größer ist.

Bei Betrachtung der Vertikalverschiebung dieses Fallbeispiels wäre der einfachste Ansatz (Bettungsmodul) folglich auch der konservativste, da sich ein Worst-Case bei der Verformung ergibt. Die wirtschaftliche Konsequenz daraus ist, dass die Fundamentbemessung unter Verwendung eines stark vereinfachten Bodenmodells zur Überdimensionierung führen kann. Jedoch muss man beachten, dass selbst die genauen Ansätze wie die komplexen Federersatzsteifigkeiten, stark vereinfachten Annahmen unterliegen z.B. starres Fundament, homogener, isotroper Untergrund, die in der Realität nicht vorliegen. Folglich sind auch hier maßgebliche Abweichung vom wahren Wert möglich und mit der Worst-case Bedingungen hat man die meisten Reserven.

5. Ergebnisse der numerischen Berechnung

Im Folgenden Kapitel wird untersucht, wie die oben ermittelten dynamischen Bodenkennwerte in einem FE-Tool (SOFISTIK) zur Verwendung kommen können und wie sich die numerisch ermittelten Verformungen von den analytischen Werten unterscheiden. Berücksichtigt wurde vorrangig die Vertikalbewegung bzw. die Horizontalbewegung; Kipp- und Torsionsverformungen wurden in SOFISTIK nicht ausgewertet.

Im Rahmen der Modellbildung wurde das Fundament in 3D und 2D definiert und der darunterliegende Boden einmal durch diskrete Federn und einmal als elastische Bettung modelliert.

Ein weiteres 2D Modell betrachtet den umgebenden Boden vollständig durch QUAD Elemente, dessen Außenränder durch SBFEM modelliert wurden (siehe hierzu die mitgelieferten .dat Files).

5.1. Systembeschreibung

Die Materialien werden in allen .dat Files im Modul AQUA hinterlegt und anschließend wird ein Fundament der oben genannten Abmessungen (5 x 7 x 1 m) im Modul SOFIMSHA definiert. Um die numerische Berechnung mit den analytischen Ergebnissen vergleichbar zu machen, wird das Fundament als starr angenommen indem dem Material ein sehr hoher Elastizitätsmodul zugewiesen wird. Das Fundament wird sowohl in 3D als auch in 2D als Platte (QUAD) modelliert.

5.2. Künstliche Schwingungsanregung

Die künstliche Schwingungserregung erfolgt durch 2 Varianten:

- 1) Die gesamte Kraft wird an einem Knoten im Zentrum der Platte angebracht
- 2) Die Kraft wird durch die Anzahl der Eckknoten dividiert (4 beim 3D System, 2 bei 2D System) und phasengleich an allen Ecken appliziert.

Diese Vorgehensweise wird in SOFILOAD sowohl für Anregung I (harmonische Kraft) als auch für Anregung II (Impulsanregung) angewandt. Beide Anregungsformen und beide Krafterleitungsvarianten werden darüber hinaus zu Testzwecken mittels

- 1) modaler Integration und
- 2) direkter, impliziter Integration gelöst.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Impulslast in SOFISTIK trapezförmig definiert wird und nicht als Halbsinus wie in der analytischen Berechnung.

5.3. Bodenmodellierung durch diskrete Federn – 3D

Im File *Heimarbeit_3D_Fundamentplatte_federn.dat* werden an den vier Ecken des Fundaments diskrete Federn¹ definiert (siehe Abbildung 1), deren Eigenschaften sich aus den dynamischen, frequenzunabhängigen Baugrundersatzgrößen entsprechend Tabelle 1 berechnen.

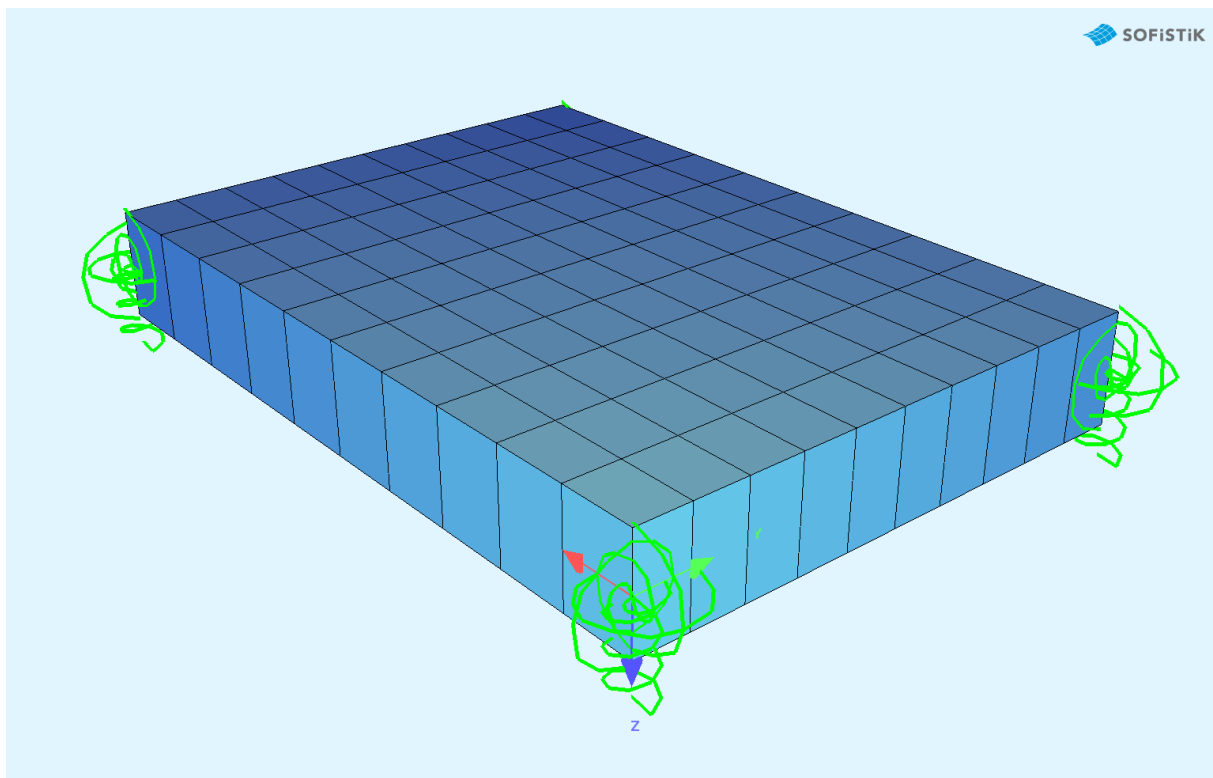


Abbildung 1. Starres 3D Plattenfundament mit Federn in allen Bewegungsrichtungen an den Ecken der Platte um den homogenen, isotropen Halbraum darunter abzubilden

Im Modul ASE werden danach die ersten 20 Eigenfrequenzen mit und ohne die fiktiven Zusatzmassen (als Flächenlast) berechnet. Im mitgelieferten Excel File werden am Blatt *Summary* jeweils die ersten Eigenfrequenzen jeder Bewegungsform mit den analytischen Werten verglichen.

Die anschließend in DYNA ermittelten max. Verformungen ausgewählter Knoten sind ebenfalls in diesem Blatt dargestellt. Bei der Lösung mittels modaler Integration (Anmerkung: Eigenformen stellen ungedämpfte Moden dar) wurde eine modale

¹ Die Zuweisung eines Dämpfungswertes zu einem Federelement erfolgt in SOFISTIK über den Dämpfungskoeffizient $c = 2m\omega_0\xi$ und hat daher die Einheit [kg/s]

Dämpfung ξ_i angesetzt. Hier sei erwähnt, dass allen Moden die gleiche Dämpfungszahl zugewiesen wurde, was streng genommen nicht stimmt, denn der vertikalen Mode müsste ξ_v , der horizontal Mode das berechnete ξ_h usw. zugeordnet werden.

5.4. Bodenmodellierung durch elastische Bettung des Fundaments

Im File *Heimarbeit_3D_Fundamentplatte_BMAT.dat* werden statt diskreter Federn am Fundament elastische Auflagerbedingungen definiert. Dies geschieht über die Funktion BMAT, die dem Material des Fundaments bestimmte Feder- und Dämpfungszahlen zuweist. Diese Parameter entsprechen hierbei den Halbraumersatzgrößen des Bodens und werden nur in vertikaler und horizontaler Richtung definiert.

Die weitere Vorgehensweise hinsichtlich der Berechnung der max. Verformung bei harmonischer und impulsartiger Anregung erfolgte analog zur Beschreibung in 5.3 (2 x 2 Berechnungen).

5.5. Bodenmodellierung durch diskrete Federn – 2D

Im File *Heimarbeit_2D_Fundamentplatte_federn.dat* werden an allen Knoten an der Unterseite des Fundaments diskrete Federn entsprechend der Halbraumersatzgrößen definiert (siehe Abbildung 2). Der Vorteil des 2D Modells liegt in der schnelleren Rechenzeit, wobei natürlich nur Verformungen bzw. Eigenformen in der Modellierungsebene berücksichtigt werden können.

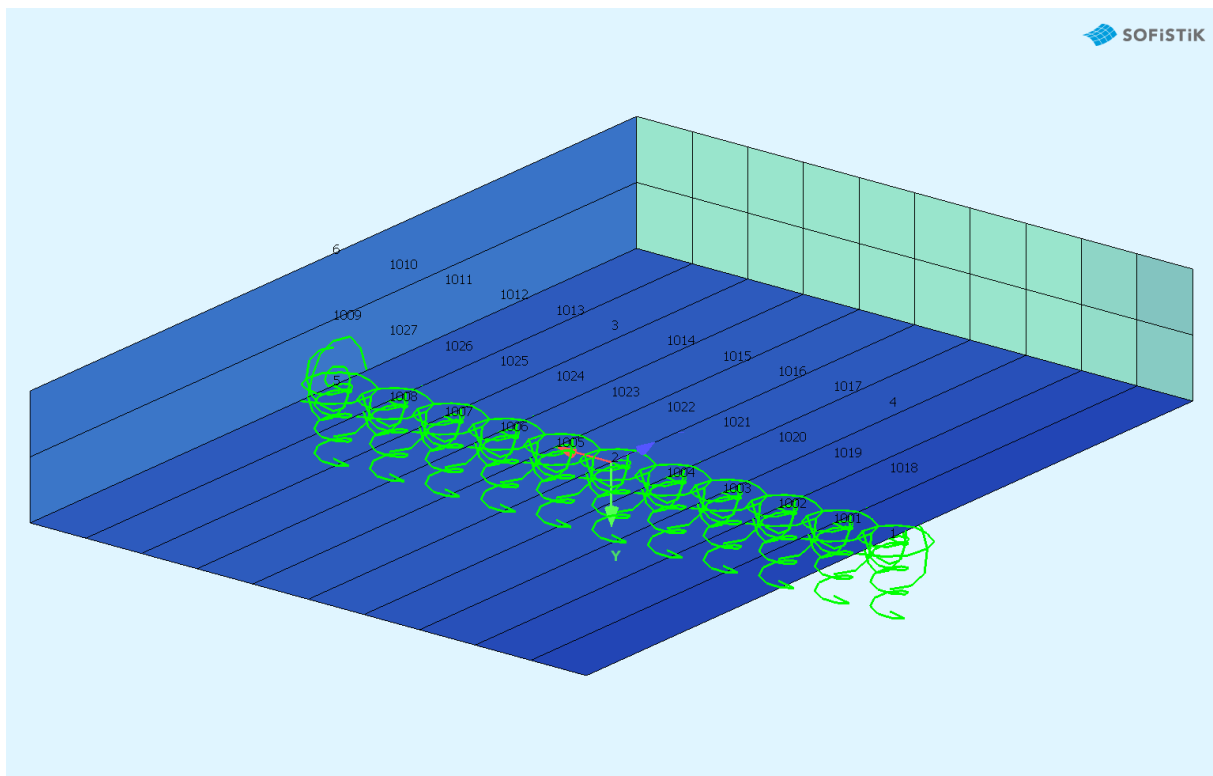


Abbildung 2. Starres 2D Plattenfundament mit Federn in allen Bewegungsrichtungen an der Unterseite der Platte um den homogenen, isotropen Halbraum darunter abzubilden

Die weitere Vorgehensweise hinsichtlich der Berechnung der max. Verformung bei harmonischer und impulsartiger Anregung erfolgte analog zur Beschreibung in 5.3 (2 x 2 Berechnungen).

5.6. Bodenmodellierung durch vollständigen Halbraum

Bei diesem 2D Modell im File *Heimarbeit_2D_Fundamentplatte_full.dat* werden die Ränder des Fundaments als sogenannte SBFEM Elemente definiert (Scaled Boundary Finite Elements), denen die Materialparameter des Bodens zugewiesen werden. Dies erzeugt rechnerisch einen homogenen Halbraum mit den gewünschten Bodeneigenschaften unter dem Fundament.

Aufgrund der dadurch entstehenden Festkörpermoden war eine Berechnung der Eigenfrequenzen nicht möglich, folglich war auch die Lösung der Schwingungsanregung nur mittels direkter Integration in DYNA durchführbar. Die anschließend berechneten Verformungen waren extrem klein und konnten daher im SOFISTIK Report Browser nicht in Millimeter ausgedrückt werden. Der Grund dafür ist noch nicht geklärt und es werden derzeit noch weitere Tests mit den SBFEM Elementen durchgeführt.

6. Zusammenfassung

Die Ergebnisse aller hierin beschriebenen Rechenmodelle sind im Blatt *Summary* des mitgelieferten Excels dargestellt. Zu Kontrollzwecken wurden bei der numerischen Berechnung immer 4 Knoten betrachtet, die bei Annahme eines starren Fundaments die gleichen Verformungen zeigen sollten. Als Übersicht finden sich in Tabelle 4 alle ermittelten max. Vertikalverformungen unter Anregung I und II.

Tabelle 4. Max. Vertikalverformungen bei Einwirkung I und II

Berechnungsansatz		Max. Vertikale Verformung [mm]	
		I	II
Analytisch	Bettungsmodul	0.1670	2.7530
	Halbraumersatzgröße	0.0678	3.3383
	Impedanz (f-unabhängig)	0.0922	3.6250
	Impedanz (f-abhängig)	0.0988	3.9120
Modale Integration	Einzelfedern 3D (Eckkraft)	0.0890	1.5120
	Einzelfedern 3D (Zentralkraft)	0.0890	2.0160
	Elast. Bettung 3D (Eckkraft)	0.0890	1.5120
	Elast. Bettung 3D (Zentralkraft)	0.0890	2.0160
	Einzelfedern 2D (Eckkraft)	0.1610	2.6680
	Einzelfedern 2D (Zentralkraft)	0.1610	4.0020
Direkte Integration	Einzelfedern 3D (Eckkraft)	0.1210	1.679
	Einzelfedern 3D (Zentralkraft)	0.1210	2.239
	Elast. Bettung 3D (Eckkraft)	0.5380	2.8970
	Elast. Bettung 3D (Zentralkraft)	0.5380	3.8620
	Einzelfedern 2D (Eckkraft)	0.2760	3.6720
	Einzelfedern 2D (Zentralkraft)	0.2760	5.5090
	Vollmodell (Eckkraft)	-	-
	Vollmodell (Zentralkraft)	-	-

Die Ergebnisse zeigen, dass es im Falle der harmonischen Anregung keinen Unterschied macht, ob die Kraft im Zentrum oder an den Eckknoten des Fundaments eingeleitet wird. Bei der Impulsanregung hingegen war die Vertikalverformung größer wenn die Kraft am Mittelknoten appliziert wurde. Dies dürfte auf die nicht vollständige Starrheit des Fundaments zurückzuführen sein, so dass bei einem Impuls (breites Frequenzspektrum) zu einer Anregung der Eigenfrequenzen (sehr hohe Frequenzen) der Platte kommt und diese in die Verformung miteinfließen.

In den hier präsentierten Beispielen liefert die direkte, implizite Integration für alle .dat Files größere Verformungen als die Lösung mittels modaler Integration. Der Grund dafür ist die Art der Systemdämpfung: Bei Verwendung der Default Parameter der Newmark Integration (BET 0.25 DEL 0.50 THE 1.00) entsteht die Dämpfung rein durch die den Federelementen zugewiesenen Werte. Bei der modalen Integration wurde ξ_v als modale Dämpfung für alle Moden – auch die nicht-vertikalen Moden – angesetzt, wodurch die Auslenkung zum Teil unterschätzt wurde. [Anmerkung: Bei Tests mit modaler Dämpfung $\xi = 0$ war die berechnete Verformung größer als jene der Newmark Integration]

Grundsätzlich zeigten die numerischen und analytischen Ergebnisse eine gute Übereinstimmung: die numerische Berechnung mittels modaler Integration (inkl. modaler Dämpfung) erzeugte für die Sinusanregung fast die gleichen Amplituden wie der Ansatz mittels des Bettungsmoduls bzw. mittels der Impedanzfunktion. Bei der Impulsanregung war der Unterschied teilweise größer, was einerseits an den zuvor erwähnten Unterschieden im Kraftansatz lag (analytisch: Halbsinus, numerisch: Trapez) und andererseits auch durch eventuelle Eigenschwingungen des Fundaments im numerischen Modell bedingt sein kann (nicht komplett starr).

Literatur

- [1] Sieffert J.-G., Cevaer F., Handbook of Impedance Functions, 1992
- [2] Flesch R., Baudynamik praxisgerecht, Band 1, 2000
- [3] Fischer D., Interaktion zwischen Baugrund und Bauwerk – Zulässige Setzungsdifferenzen sowie Beanspruchung von Bauwerk und Gründung. Schriftenreihe Geotechnik Universität Kassel, Heft 21, 2009
- [4] Empfehlungen des Arbeitskreises 1.4 „Baugrunddynamik“, Herausgeber: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., 2002