



TUBAF

Die Ressourcenuniversität.
Seit 1765.

Bodendynamik

Konstruktionskriterien

Dominik Kern

26. Juni 2024

Übersicht

1. Konstruktionskriterien

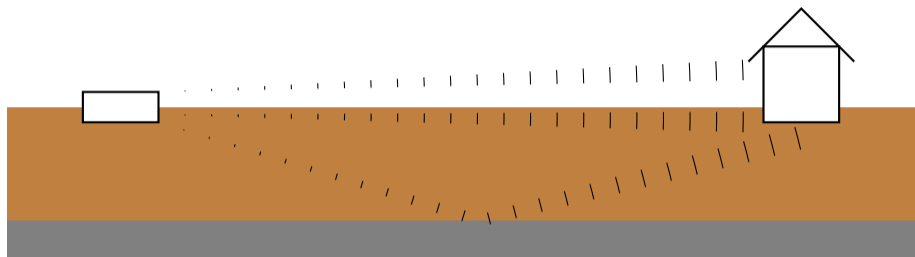
Erschütterungen

Dynamisch belastete Fundamente

Erdbebensicheres Bauen

Ziel: Gefährdung von Bauwerken, Belästigung von Lebewesen und Beschädigungen von Geräten minimieren.

Erschütterungsemissionen/-immissionen



Quellen Verkehr, Bauarbeiten, Maschinen, Naturereignisse

Übertragungsweg Boden (Dämpfung, Reflexion, Transmission) und Luft (hier nicht betrachtet)

Empfänger Gebäude(teile), Lebewesen, Geräte

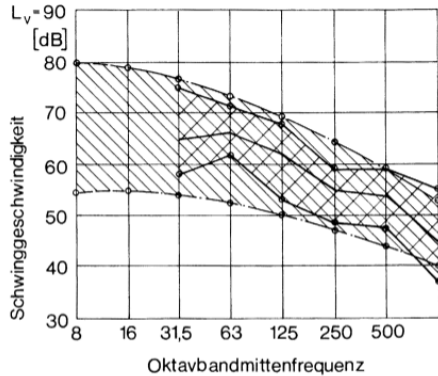
Logarithmische Darstellung der Partikelgeschwindigkeit [SKL08]

$$L_v = \text{dB}(v) = 20 \log \left(\frac{v}{v_{\text{ref}}} \right)$$

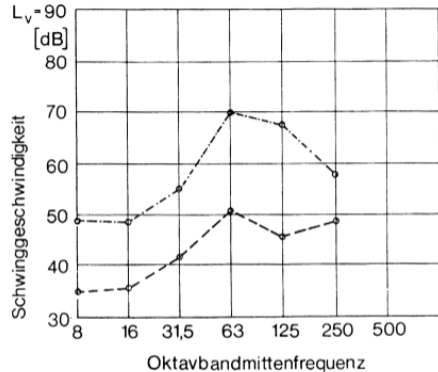
bezogen auf den Referenzwert $v_{\text{ref}} = 1 \times 10^{-6} \text{ mm s}^{-1}$ (ISO 1683). Damit folgende Übertragungsverluste und -verstärkungen

$$L_{\text{immission}} = L_{\text{emission}} \underbrace{-\Delta L_{v,\text{geom}} - \Delta L_{v,\text{mat}} - \Delta L_{v,\text{refl}}}_{\text{Verluste im Übertragungsmedium}} \underbrace{-\Delta L_{v,\text{koppl}} - \Delta L_{v,\text{empf}}}_{\text{Verluste/Verst. am Empfänger}}$$

Erschütterungsemission durch Verkehr



a)



b)

Bild 5.6. Schwinggeschwindigkeitsspektren an der Tunnelwand als Eingabegröße für (5.2) mit $v_{\text{ref}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ mm/s}$

Erschütterungen infolge der Durchfahrt einer a) leeren Bahn und b) voll besetzten [SKL08]

Erschütterungsemission durch Bauarbeiten

Speziell für Spreng- und Rammerschütterungen [SKL08] ist die Messung an der Quelle schwierig, deswegen wird die eingebrachte Energie als Kenngröße benutzt

$$v = cW^\alpha r^\beta.$$

v Partikelgeschwindigkeit

c Koeffizient für Sprengstofftyp (experimentell bestimmt)

W Sprengstoffgewicht

α Skalierungsfaktor ($\alpha \approx 1/3$)

r Abstand Quelle – Empfänger

β Skalierungsfaktor ($\beta = -2$ für Punktquelle)

Maschinen werden nach der gleichen Formel geschätzt [SKL08].

Erschütterungseinwirkung

Bild 5.11. Allgemeine Grenzwerte der Wegamplitude für Erschütterungen (nach Richart et al., 1970)

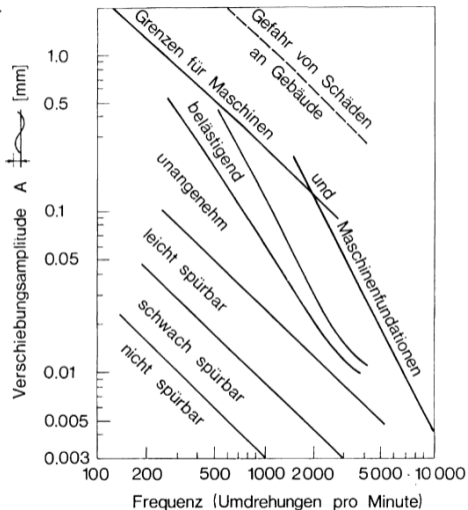


Abbildung aus *Bodendynamik* [SKL08]

Erschütterungseinwirkung auf Bauwerke

Länderspezifische Richtlinien (Deutschland: DIN 4150-3)

Richt- und Grenzwerte beziehen sich meist auf die Partikelgeschwindigkeit und werden unterteilt nach

Häufigkeitsklassen : gelegentlich, häufig, permanent

Empfindlichkeitsklassen : sehr wenig, wenig, normal, erhöht empfindlich

Frequenz : < 30 Hz, 30 Hz–60 Hz, > 60 Hz

Beispiel (nach SN 640312a) für häufige Vorgänge, normale Empfindlichkeit und eine Frequenz von 45 Hz beträgt der Richtwert $v = 8 \text{ mm s}^{-1}$.

Erschütterungseinwirkung auf Menschen

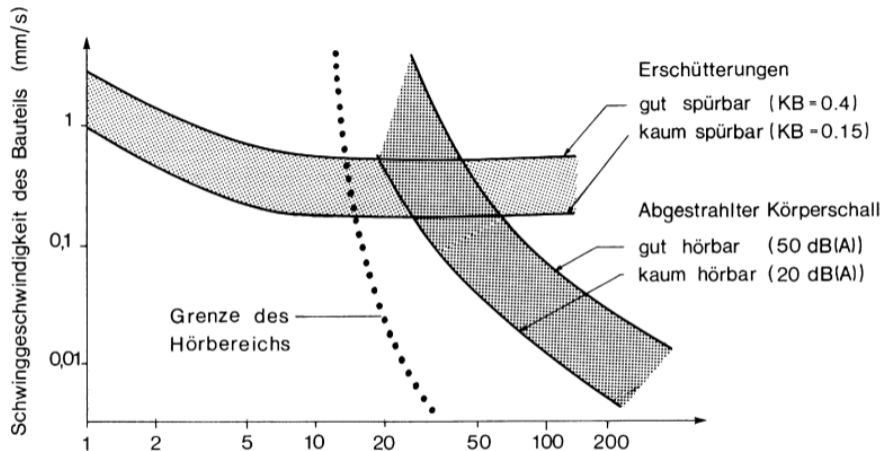
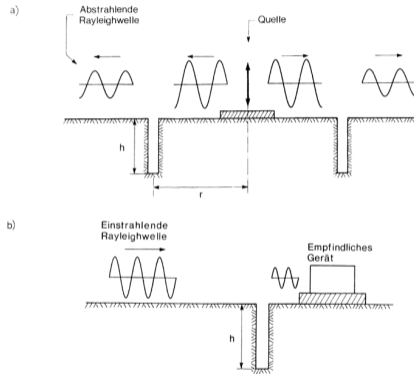


Bild 5.16. Maßgebende Bereiche für Erschütterungen und sekundären Luftschall

Erschütterungsreduktion

Quelle: optimiertes Sprengschema, Maschinenfundamente, Unterschottermatten, Zusatzmassen



Übertragungsmedium: Bild 5.19. a Isolation der Quelle, b Isolation eines empfindlichen Empfängers

[SKL08]

Empfänger: Auflagerung/Fundament, Schwingungstilger

Beispiel

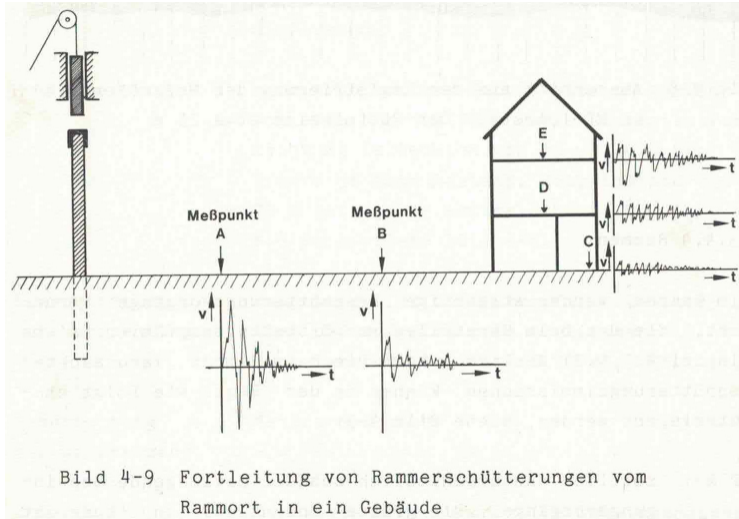
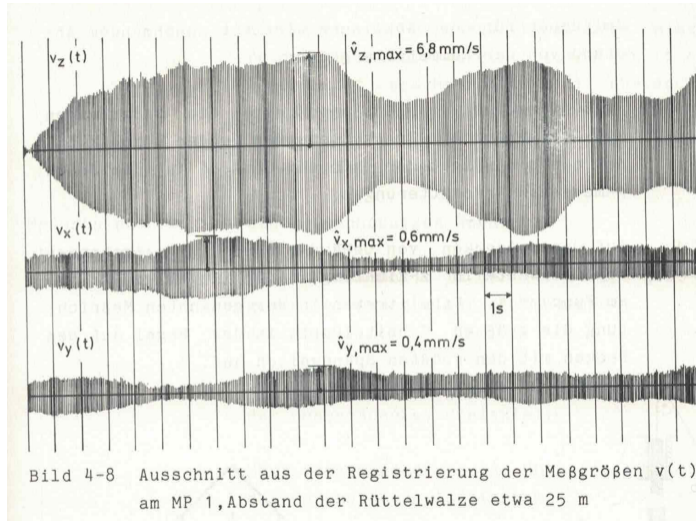


Bild 4-9 Fortleitung von Rammerschütterungen vom Rammort in ein Gebäude



DIN 4150 Erschütterungen im Bauwesen

Teil 1 – Vorermittlung von Schwingungsgrößen Diese Norm gibt eine Anleitung für die Vorermittlung von Erschütterungen und enthält Verfahren, Angaben und Hinweise, auf deren Grundlage die Werte von Erschütterungsgrößen vorausgesagt werden können.

Teil 2 – Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden Diese Norm enthält Angaben für die Beurteilung von Erschütterungen im Frequenzbereich von 1 Hz bis 80 Hz, die in Gebäuden auf Menschen einwirken. Mit Hilfe des in dieser Norm beschriebenen Beurteilungsverfahrens können beliebige periodische und nichtperiodische Schwingungen beurteilt werden.

Teil 3 – Einwirkungen auf bauliche Anlagen Diese Norm legt Verfahren für die Ermittlung und Beurteilung der durch Erschütterungen verursachten Einwirkungen auf bauliche Anlagen, die für vorwiegend ruhende Beanspruchung bemessen sind, fest.

Vertikaldynamik

Das dynamische Verhalten eines vertikal angeregten starren Fundaments kann durch einen Einmassenschwinger

$$m_{1\text{DoF}}\ddot{u} + c_{1\text{DoF}}\dot{u} + k_{1\text{DoF}}u = F(t)$$

dargestellt werden. Dessen Parameter berechnen sich aus der Masse von Fundament und Maschine m , Radius des äquivalenten Kreisfundaments r , Schubmodul G , Querdehnzahl ν und Dichte ρ des Bodens, sowie der Hilfsgröße (Massenverhältnis)

$$\bar{B} = \frac{m(1 - \nu)}{4\rho r^3},$$

nach den Formeln [SKL08]

$$m_{1\text{DoF}} = m \left(1 + \frac{0.27}{\bar{B}} \right), \quad D_{1\text{DoF}} = \frac{0.425}{\sqrt{\bar{B}}}, \quad k_{1\text{DoF}} = \frac{4Gr}{1 - \nu}.$$

Weitere Bewegungsarten

Für die Horizontal-, Kipp-, und Torsionsschwingungen gibt es ähnliche Formeln [SKL08].

Diese Näherungen gelten für tiefe Frequenzen

$$\frac{\omega}{\omega_{\text{ref}}} < 2$$

mit der Bezugsfrequenz

$$\omega_{\text{ref}} = \frac{c_s}{r},$$

worin r für den Radius des äquivalenten Kreisfundaments und c_s für die Scherwellengeschwindigkeit stehen.

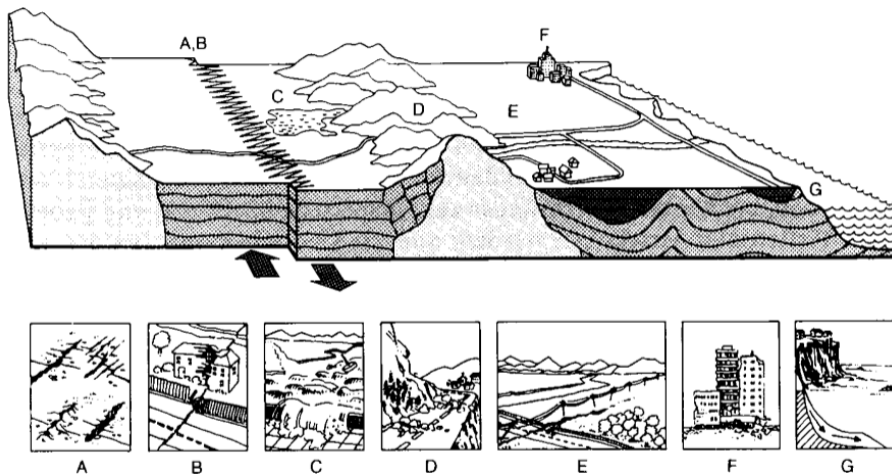


Bild 7.1. Erdbebenschäden

Entstehung

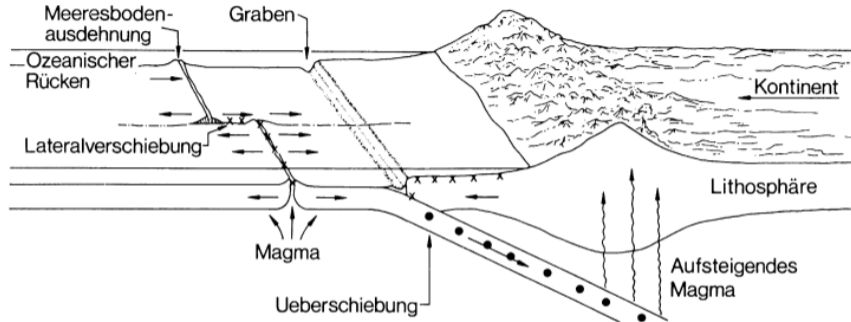


Bild 7.2. Vorgänge an den Plattenträndern; x Oberflächennahe Erdbeben, ● Tiefe Erdbeben; nach Press und Siever (1982)

Abbildung aus *Bodendynamik* [SKL08]

Verwerfungstypen

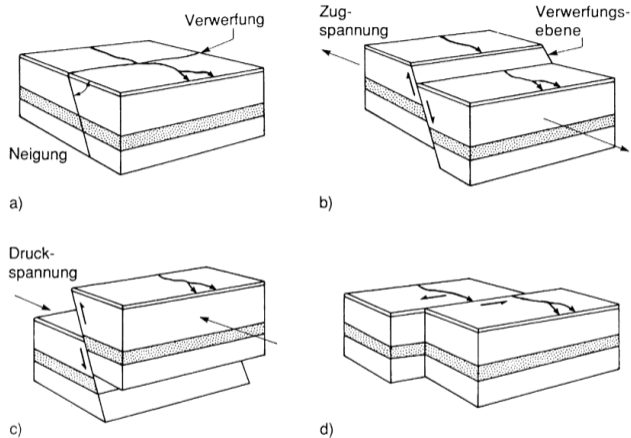


Bild 7.3. Verwerfungstypen: **a** Verhältnisse vor Aktivierung, **b** Abschiebung („normal fault“) infolge Zugspannungen, **c** Aufschiebung infolge Druckspannungen („thrust fault“), **d** seitliche Verschiebung („lateral strike slip fault“) infolge Schubspannungen

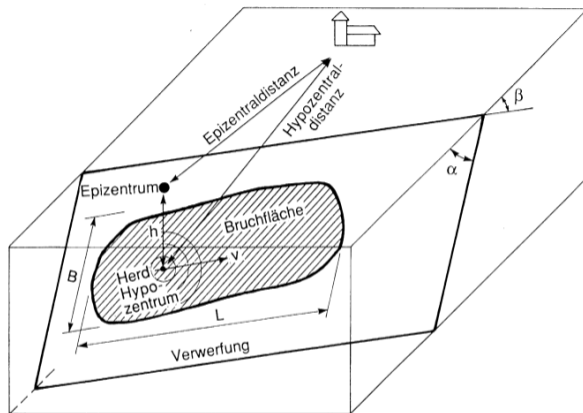


Bild 7.4. Definition von Verwerfungsebene, Einfallwinkel α , Streichwinkel β , Bruchfläche (L = Länge, B = Breite), Herd (Hypozentrum), Herdtiefe h, Epizentrum, Bruchausbreitungsgeschwindigkeit v, Hypozentral- und Epizentraldistanz

Intensität: Phänomenologische Beschreibung nach hervorgerufener Wirkung
1 (nicht fühlbar) ... 6 (Gebäudeschäden) ... 12 (vollständig verwüstend) Klassifizierung nach EMS-1998

Magnitude: Maß für die freigesetzte Energie

- Richter-Skala $M_L = \log_{10} \left(\frac{\max(u_{100 \text{ km}})}{u_{\text{ref}}} \right)$ maximaler Verschiebungsausschlag (aus Seismogramm) in einer Entfernung von 100 km vom Epizentrum bezogen auf einen Referenzwert
- Momenten-Skala $M_W = \frac{2}{3} \log_{10}(M_0) - 6$ bezogen auf Erdbebenherd $M_0 = \mu A \Delta u$ [M_0] = N m, mit Scherfestigkeit μ an der Bruchzone, Bruchfläche A und mittlerer Verschiebung Δu

Vorgehenskonzepte

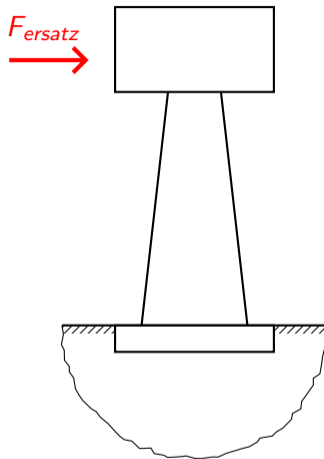
deterministisch sehr spezifisch (Ort, Szenario), modellbasiert (Quelle, Übertragungsmedium, Empfänger), Problem Parameterbestimmung

probabilistisch ausgehend von bisherigen räumlichen und zeitlichen Verläufen werden erdenkliche Erdbeben mit Wahrscheinlichkeiten versehen.

Bewertung hinsichtlich

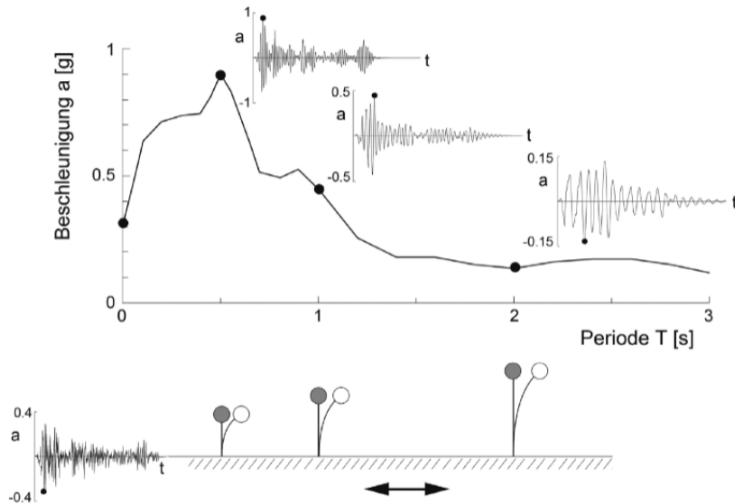
- Baugrunderschütterung
- Bodenverflüssigung
- Hangrutschungen
- Rissen an der Erdoberfläche

Berücksichtigung in der Auslegung

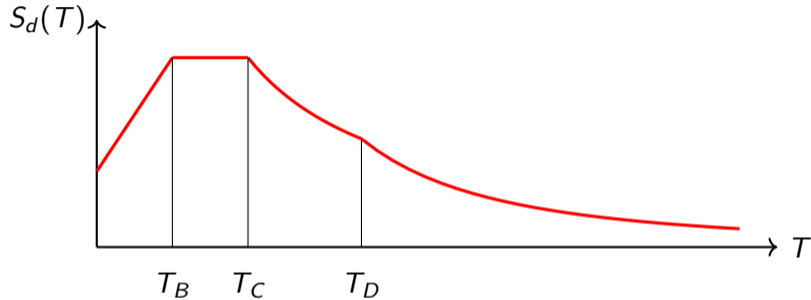


Erdbeben werden durch Ersatzkräfte in die Auslegung einbezogen

Antwortspektrum



Bemessungsspektrum



Das Bemessungsspektrum ist ein “geglättetes” und “informationsangereichertes” Antwortspektrum.

Auslegung anhand des Bemessungsspektrums

$$\begin{aligned}0 < T \leq T_B : \quad S_d(T) &= a_{gR} \gamma_I S \left[1 + \frac{T}{T_B} \left(\frac{2.5}{q} - 1 \right) \right] \\T_B < T \leq T_C : \quad S_d(T) &= a_{gR} \gamma_I S \frac{2.5}{q} \\T_C < T \leq T_D : \quad S_d(T) &= a_{gR} \gamma_I S \frac{2.5}{q} \frac{T_C}{T} \\T_D < T \leq 4 \text{ s} : \quad S_d(T) &= a_{gR} \gamma_I S \frac{2.5}{q} \frac{T_C T_D}{T^2}\end{aligned}$$

T ist die Periodendauer des Einmassenschwingers, alle übrigen Parameter charakterisieren das Erdbebengebiet, den Baugrund und das Bauwerk.

Auslegung anhand des Bemessungsspektrums

S_d entspricht einer Beschleunigung, demzufolge berechnet sich die Ersatzkraft

$$F_{\text{ersatz}} = S_d(T)m\lambda,$$

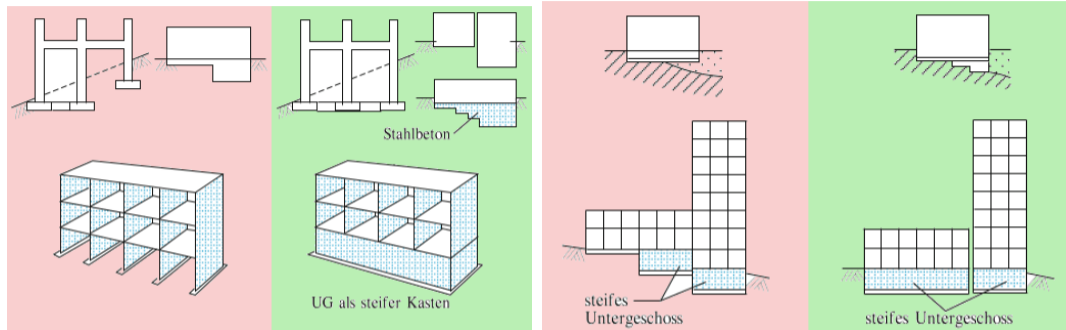
wobei λ ein Korrekturwert für die Stockwerke ist.

Die Periode eines Gebäudes kann in Abhängigkeit der Höhe h geschätzt werden

$$T = C_t h^{3/4}$$

wobei C_t das Tragwerk charakterisiert ($C_t = 0.085$ für biegesteife räumliche Stahlrahmen, $C_t = 0.075$ für biegesteife räumliche Stahlbetonrahmen und $C_t = 0.050$ für andere Rahmen).

Konstruktionshinweise



Abbildungen aus *Grundlagen der Geotechnik* [Sch17]

Hinweise zu Verkehrswegen und Stützbauwerken finden sich im Bericht der Hochschule für Technik Rapperswil [Sch⁺14].

- [Erd04] Deutsche Gesellschaft für Erdbeningenieurwesen und Baudynamik e.V. *Stand der Erdbebenforschung in Deutschland*. 2004.
- [Hau86] Wolfgang Haupt. *Bodendynamik: Grundlagen und Anwendung*. Vieweg, 1986. ISBN: 9783528088781.
- [Sch⁺14] H Schneider u. a. „Bemessung und Überprüfung von Stützbauwerken unter Erdbebeneinwirkung“. In: *Hochschule für Technik Rapperswil* (2014).
- [Sch17] Hans-Henning Schmidt. *Grundlagen der Geotechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, Online-Ressource. ISBN: 978-3-658-14930-7. DOI: 10.1007/978-3-658-14931-4.
- [SKL08] Jost A. Studer, Martin G. Koller und Jan Laue. *Bodendynamik*. 3. Aufl. Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-29624-9.
- [Vre17] Christos Vrettos. „Bodendynamik“. In: *Grundbau-Taschenbuch*. Wiley, Apr. 2017, S. 573–631. DOI: 10.1002/9783433607275.ch9.