

HÄFEN IN ERDBEBENGEBIETEN - KAIMAUERENTWÜRFE IN ÄGYPTEN UND IN DER TÜRKEI

Dr.-Ing. Uwe Pfeiffer

EINLEITUNG

Mit einem Blick auf die „Global Seismic Hazard Map“ wird deutlich, dass weltweit in einem erheblichen Teil der Küstengebiete mit Einwirkungen aus Erdbeben zu rechnen ist. Dazu zählt unter anderem auch die östliche Mittelmeerregion und angrenzende Gebiete, in denen vom Büro Sellhorn Kaimauern unter anderem in Damietta und El Adabiya (beide Ägypten) sowie in Belde in der Türkei entworfen wurden. Verbindende Gemeinsamkeit dieser Häfen ist, dass Beanspruchungen aus Erdbeben für einen Großteil der Nachweise und der Dimensionierung der Kaimauer bemessungsrelevant werden. Anhand dieser drei Hafenprojekte sollen grundlegende Anforderungen und Lösungsmöglichkeiten für das Bauen in Erdbebengebieten erläutert werden.



Bild 1: Global Seismic Hazard Map, aus <http://www.seismo.ethz.ch/GSHAP/>

GRUNDLEGENDES ZUR BEMESSUNG IM ERDBEBENFALL

In der Ingenieurpraxis einfach anwendbare Rechenmodelle benutzen vorzugsweise statische Ersatzlasten, mit denen die Beanspruchungen für den Erdbebenfall näherungsweise abgebildet werden (siehe Eurocode 8, Teil 5). Dynamische Berechnungen, wie diese inzwischen vermehrt für Hochhäuser oder Brücken zum Einsatz kommen, stellen nach Ansicht des Verfassers auf Grund des komplexen nichtlinearen Verhaltens der Bodenmatrix sowie der Bauwerks-Boden-Interaktion zur Zeit noch keine sinnvolle Alternative dar. Auch vereinfachte Rechenverfahren, wie z.B. die Spektralanalyse, sind für in den Baugrund eingebettete Strukturen häufig nur schwer anzuwenden, da die Interaktion der Kaimauer mit dem Boden (Abbildung über nichtlineare elastische Bettung oder Einzelfedern) nur schwer und mit hohem Aufwand zu modellieren ist.

Bei der Anwendung der Regelungen des Eurocode 8, Teil 5 wird unter Berücksichtigung der Verformbarkeit des Systems sowie der generellen Baugrundsichtung ein Faktor k_h aus dem Spitzenwert der Baugrundbeschleunigung (PGA) ermittelt:

$$k_h = \text{PGA} \cdot \frac{S}{r}$$

mit PGA = Peak Ground Acceleration
 S = 1,0 bis 1,8 je nach Bodentyp und elastischem Antwortspektrum
 r = 1,0 bis 2,0 je nach Kaimauertyp und Verformbarkeit

Mit diesem k_h -Faktor (entspricht einer horizontalen Beschleunigung) werden im Weiteren alle Massen des Systems beaufschlagt und statische Ersatzlasten im System in horizontaler Richtung aufgebracht. Ähnliches gilt für den Faktor k_v , der Beschleunigungen aus Erdbeben in vertikaler Richtung berücksichtigt. Als Massen sind dabei das eigentliche Tragwerk, also Spundwand, Schlitzwand, Kaimauerplatte oder ähnliches zu berücksichtigen, sowie die Massen der Erdkörper, also der aktive und passive Gleitkeil. Wichtig dabei ist, die reale Masse, wie zum Beispiel den Beton oder den wassergesättigten Boden ohne Auftrieb und nicht nur das Gewicht unter Auftrieb zu benutzen. Die Effekte im Baugrund (Erhöhung des aktiven Erddrucks sowie Reduzierung des passiven Erddrucks) werden zumeist mit der Formel nach Mononobe-Okabe erfasst:

$$K = \frac{\sin^2(\psi + \phi'_d - \theta)}{\cos\theta \sin^2\psi \sin(\psi - \theta - \delta_d) \left[1 + \frac{\sin(\phi'_d + \delta_d) \sin(\phi'_d - \beta - \theta)}{\sin(\psi - \theta - \delta_d) \sin(\psi + \beta)} \right]^2}$$

Beiwert für aktiven Erddruck, aus Eurocode 8, Teil 5 (EN 1998-5:2003)

Aus dieser Vorgehensweise lässt sich ein grundlegendes Ziel ableiten, die beschleunigten Massen zu verringern, wie dies zum Beispiel bei der überbauten Böschung (Piled Deck) der Fall ist.

Bei der Ermittlung des oben genannten k_h -Faktors sind außerdem Systeme mit größeren ertragbaren Verformungen im Vorteil, also zum Beispiel Schwergewichtsmauern, die ohne Stabilitätsverlust und ohne Verlust der strukturellen Integrität eine größere Verschiebung oder Verdrehung aufnehmen können. Durch diese Verformung erfolgt eine Dissipation von Energie, so dass die statische Ersatzlast aus Erdbebenbeanspruchung über den Faktor r aus obiger Formel kleiner gewählt werden kann. Damit sind bei geeigneten Randbedingungen auch Entwürfe als rückverankerte Spundwand oder Schwergewichtswand konkurrenzfähig.

Weiterhin zu beachten ist die Wahl der Baugrundparameter für den Lastfall Erdbeben, insbesondere die Wahl für kohäsive Böden, die auf Grund der schnellen Belastung im Erdbebenfall in den undrainierten Zustand übergehen können. Hier ist eine intensive Rücksprache mit und Einschätzung durch den örtlichen Baugrundsachverständigen notwendig, um eine sichere und dennoch wirtschaftliche Annahme der Scherfestigkeiten des Bodens treffen zu können.

Für Rückverankerung ist außerdem zu untersuchen, ob der Boden zur Verflüssigung neigt, was im allgemeinen jedoch nur bei locker gelagerten, meist gleichförmigen Sanden im Grundwasser auftritt. Für Liquifaction anfällige Bodenschichten weisen einen hohen Porenanteil auf sowie eine Lagerung der Sandkörner, die noch nicht der dichtesten Packungslage entspricht. Tiefere Sandschichten sind auf Grund des Überlagerungsdrucks zumeist nicht gefährdet.

KAIMAUER IN DAMIETTA / ÄGYPTEN

In Damietta im Norden von Ägypten an der Mündung des westlichen Nilarms entsteht derzeit der größte Containerterminal des Landes mit einer geplanten jährlichen Umschlagskapazität von 4 Millionen TEU, mit einer Liegeplatzlänge von insgesamt 2,4 km sowie mit einer Tiefe des Hafenbeckens von CD -17,0 m. Der Baugrund ist geprägt durch ausgedehnte Kleischichten mit geringen Scherfestigkeiten bis in über 30 m Tiefe. Planung und Ausschreibung erfolgten zwischen 2006 und 2007, mit dem Bau der Kaimauer wurde im März 2008 begonnen.

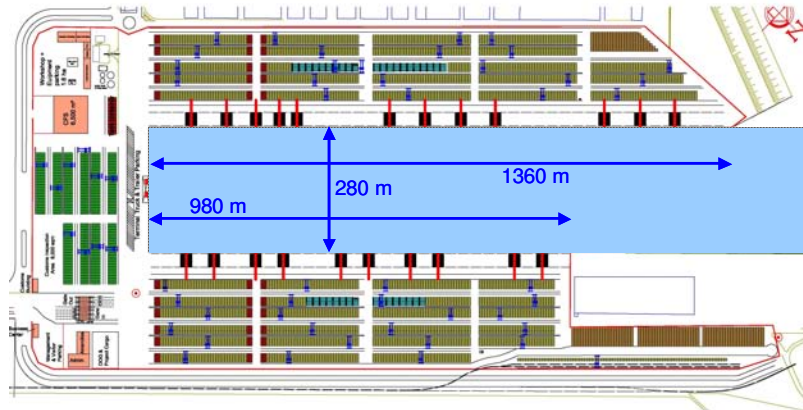


Bild 2: Terminallayout „Damietta International Port“ gemäß Masterplan

Für den Entwurf mussten folgende Randbedingungen und Anforderungen beachtet werden:

- Erdbebeneinwirkung mit einer Peak Ground Acceleration gemäß Vorgabe Baugrundgutachter von $PGA = 0,2 \cdot g$
- leichte Erdbebeneinwirkungen müssen ohne größere Schäden aufnehmbar sein (z.B. keine Änderung der Spurweite für den Containerkran)
- Herstellung der Kaimauer als „Landbaustelle“ mit Baggerung des Hafenbeckens nach Errichtung der Kaimauer
- Untersuchung Baugrundverflüssigung bei Erdbebeneinwirkung zur Sicherstellung einer ausreichenden Tragfähigkeit der Rückverankerung

Unter Beachtung dieser Randbedingungen sah der Entwurf eine rückverankerte Schlitzwand vor, bei der der Kaimauerkopf über sehr massive, horizontal angeordnete Augenanker mit dem landseitigen Kranbahnbalken verbunden ist. Damit ist sichergestellt, dass die Spurweite der Kranbahn auch nach leichteren Erdbebenbeanspruchungen erhalten bleibt. Dies entspricht der allgemeinen Forderung (siehe auch PIANC, Seismic Design Guidelines for Port Structures [3]), dass Erdbebeneinwirkungen mit einer Wiederkehrperiode von 50 Jahren ohne wesentliche Schäden von der Kaimauer aufgenommen werden sollen.

KAIMAUERN IN BELDE / TÜRKEI UND IN EL ADABIYA / ÄGYPTEN

Die Kaimauern in Belde (Containerterminal, Marmarameer) und in El Adabiya (Umschlag Eisenerz, Golf von Suez) sehen eine Überbaute Böschung (Piled Pier) vor. Die Gründung erfolgt auf Stahlpfählen mit 1,0 m bis 1,3 m im Durchmesser sowie mit einer Länge zwischen 40 und 60 m auf Grund der zumeist erst tief anstehenden tragfähigen Sande. Die Böschung unterhalb der Kaiplatte wurde mit einer Neigung von 3 : 1 bis 2 : 1 ausgebildet und mit einer Befestigung gegen Auskolkungen versehen. Eine steilere Böschungsneigung ist nur selten und nur bei sehr hoher Scherfestigkeit der Auffüllung möglich, da hier die Nachweise der Böschungstabilität im Erdbebenfall (Gleitkreis) maßgebend werden. Wie zuvor bereits erwähnt, muss beim Nachweis der Böschungstabilität im Erdbebenfall die reale Masse mit dem Faktor k_n beschleunigt werden, also der Boden ohne Auftrieb.

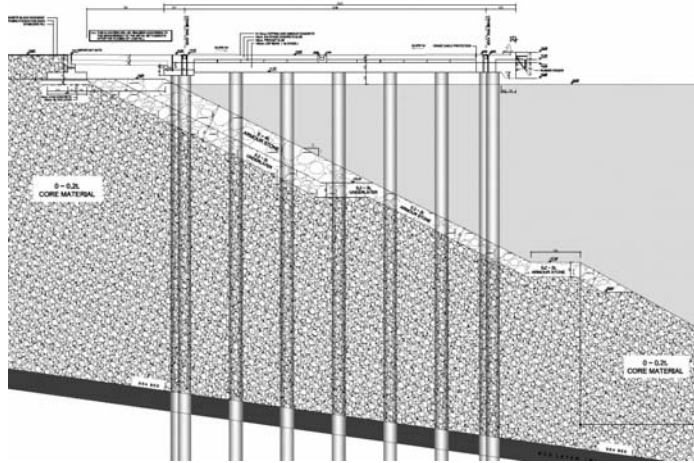


Bild 6: Ausschreibungsentwurf Piled Deck für die neue Kaimauer in Belde

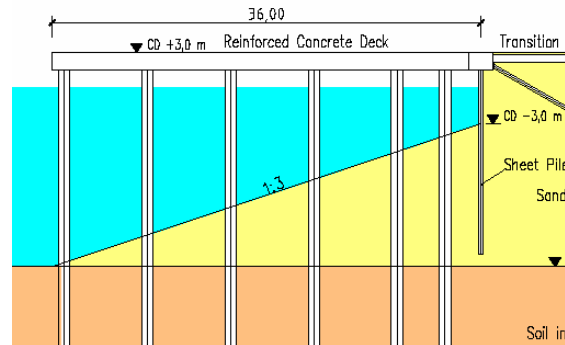


Bild 7: Variante Piled Deck für den Vorentwurf für El Adabiya, Suez Steel Company

Auch wenn die überbaute Böschung (Piled Deck) grundlegende Vorteile beim Bauen in Erdbebengebieten aufweist, so ergeben sich aus der genannten flachen Neigung der Böschung eine große Länge der aufgeständerten Vorkaifläche und damit verbunden hohe Kosten. Daher sollte der Entwurf entweder so gestaltet werden, dass am landseitigen Ende eine rückverankerte Spundwand, Winkelstützwand oder ähnliches angeordnet wird, um einen verbleibenden Geländesprung von 6 – 8 m aufzunehmen. Für den Entwurf in Belde war es durch die Nutzung eines lokal verfügbaren Füllmaterials mit einem hohen Winkel der inneren Reibung sowie unter Ansatz einer Pfahlverdübelung möglich, diesen Geländesprung am landseitigen Ende der Kaiplatte zu reduzieren.

Die Horizontallasten aus Verkehr sowie im außergewöhnlichen Fall aus Erdbeben werden ausschließlich über vertikale Pfähle abgetragen, die mit einer elastischen Bettung (z.B. angepasste p-y-Kurven gemäß DNV, GL oder API-Richtlinie [4,5]) modelliert werden. Die Interaktion mit der Böschung (Gleiskreis / Geländebruch, Verdübelungswirkung) muss beachtet werden.

Durch die Anordnung der Pfähle in der Böschung übernehmen vorzugsweise die landseitigen Pfähle die H-Kräfte. Die wasserseitigen Pfählen sind vergleichsweise weich in horizontaler Richtung und werden dadurch kaum auf Biegung beansprucht.

Insgesamt ist das Verhalten der Kaimauer in horizontaler Richtung eher als weich einzustufen, was für den Erdbebenfall von Vorteil ist. Durch eine größere elastische Verformung (ca. 10 cm für Erdbebenlasten), die ohne wesentliche Schäden erfolgen kann, wird ein Großteil der einwirkenden Energie dissipiert. Damit wiederum können die Kräfte aus Erdbeben beim Nachweis verringert werden. Für den Nachweis der H-Kräfte aus dem normalen Terminalbetrieb (z.B. H-Kräfte aus Kran) kann vor allem bei fugenloser Ausbildung der Kaiplatte eine ausreichend hohe Steifigkeit aktiviert werden, da einerseits nicht aus allen Kränen gleichzeitig eine H-Kraft resultiert und sich andererseits die Kraft auf eine mehrere hundert Meter lange Platte mit ihren Pfählen verteilt.

LITERATUR

- [1] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance -Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects (EN 1998-5)
- [2] Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen, EAU 2004, Ernst & Sohn
- [3] Seismic Design Guidelines for Port Structures, PIANC, International Navigation Association
- [4] Design of Offshore Wind Turbine Structures, DNV-OS-J101, Det Norske Veritas
- [5] Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Load and Resistance Factor Design (API RP 2A-LRFD); American Petroleum Institute