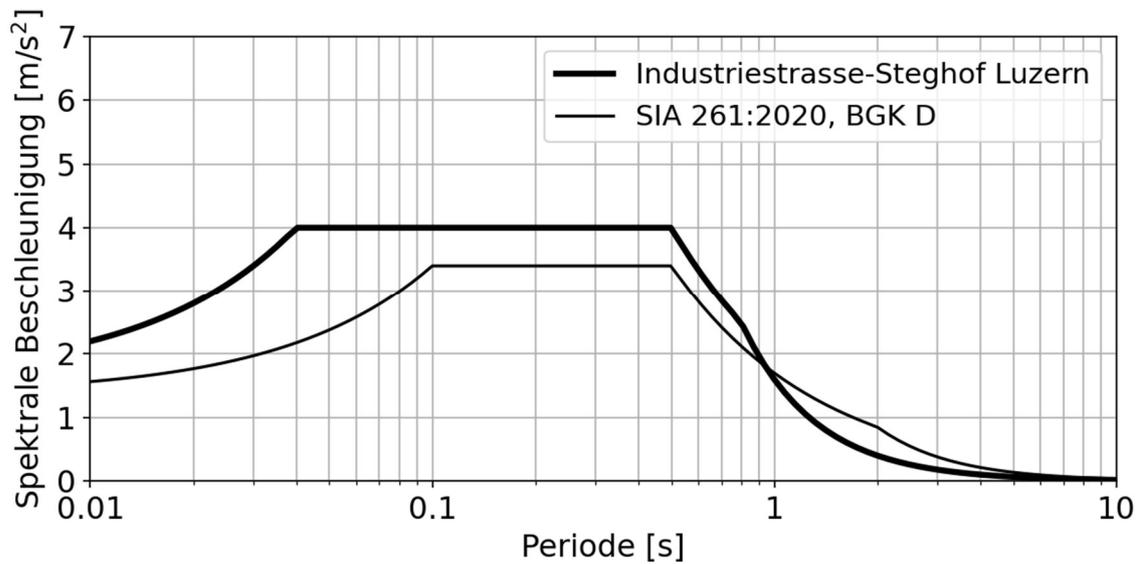




Spektrale Erdbeben-Mikrozonierung Industriestrasse-Steghof Luzern



Merkblatt

zur Umsetzung der Resultate

**Ein gemeinsames Projekt der Städte Luzern und Kriens sowie der Gemeinde Horw
Projektleitung: Verkehr und Infrastruktur Kanton Luzern, Naturgefahren**

Inhaltsverzeichnis

Impressum 1

1.	Einleitung	2
1.1	Erdbebengefährdung in Luzern	2
1.2	Einfluss des lokalen Baugrundes	2
2.	Zielsetzung	3
3.	Ortspezifisches Antwortspektrum	5
4.	Gefahr einer Bodenverflüssigung	6
4.1	Was ist eine Bodenverflüssigung?	6
4.2	Untersuchungsmethodik	7
4.3	Situation im Entwicklungsgebiet "Industriestrasse-Steghof"	8
4.4	Fundationsverhalten bei Bodenverflüssigung	8
5.	Empfehlungen	8
5.1	Empfohlenes elastisches Antwortspektrum.....	9
5.2	Konzeptionelle und konstruktive Empfehlungen für die Foundation.....	9
5.3	Empfehlungen für die Nachweise der Foundationen.....	10
5.3.1	Bauwerksklasse I	10
5.3.2	Bauwerksklassen II und III	10
5.4	Übertragbarkeit der Empfehlungen auf die Neustadt	10
5.5	Weitere Informationen	11
5.6	Ausblick	11

Impressum

Das vorliegende Merkblatt basiert auf einer spektralen seismischen Mikrozonierungsstudie, welche von den Büros Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Carouge (Federführung), Keller + Lorenz AG und Geoprofile GmbH, beide Luzern, 2012 durchgeführt worden ist und 2021 von der Firma Résonance Ingénieurs-Conseils SA aktualisiert wurde. Die Entwürfe zum Merkblatt wurden von den Herren Dr. Bruno Zimmerli, dipl. Bauing. ETH/SIA, Walter Fellmann, dipl. Bauing. ETH/SIA, Clotaire Michel, Dr. habil. Erdwissenschaften und Ehrfried Kölz, dipl Bauing. ETH/SIA eingehend korreferiert.

1. Einleitung

1.1 Erdbebengefährdung in Luzern

Schwere Erdbeben treten in der Schweiz selten auf, können aber potenziell sehr grosse Schäden verursachen. Luzern wurde im Jahr 1601 von einem stärkeren Erdbeben heimgesucht, das eine Magnitude von etwa 6 auf der Richterskala aufwies. Das Epizentrum lag in ca. 15 km Entfernung in Unterwalden und das Beben verursachte Gebäudeschäden in Luzern. Ein ähnliches Beben könnte jederzeit auch näher bei Luzern auftreten und schwere Schäden in Luzern und der Agglomeration bewirken.

Ein optimaler Schutz gegen Erdbeben ist gegeben, wenn die Bauten auf die Gefährdung an ihrem Standort ausgelegt sind. In der Schweiz wird die zu berücksichtigende Erdbebengefährdung in der SIA Norm 261 "Einwirkungen auf Tragwerke" festgelegt. Dies geschieht über die Definition eines sogenannten Antwortspektrums, das von der Erdbebenzone und der Baugrundklasse abhängig ist. Die Erdbebenzone stellt die mittlere regionale Gefährdung dar, während die Baugrundklasse den Einfluss des lokalen Baugrundes erfasst.

Die Agglomeration Luzern wurde der Erdbebenzone Z1b mit der in der Schweiz zweitniedrigsten Erdbebengefährdung zugeordnet. Dies aber heisst nicht etwa, dass die Erdbebengefährdung in der Agglomeration Luzern vernachlässigt werden könnte.

1.2 Einfluss des lokalen Baugrundes

In Abhängigkeit der lokalen geologischen Verhältnisse können die Bodenbewegungen bei Erdbeben kleinräumig stark variieren; man spricht vom lokalen Standorteffekt. Günstig sind Felsstandorte, ungünstig Lockergesteine sowie normalerweise geologisch junge Sedimentablagerungen.

Lockergesteine weisen in der Regel niedrigere Wellengeschwindigkeiten auf als die darunterliegenden Felsformationen. Dadurch wirken die Lockergesteinsschichten als eigentliche Wellenfallen. Dies kann – für bestimmte Frequenzbereiche – zu starken Aufschaukelungen der Bodenbewegungen führen. Wie stark sich diese Aufschaukelungen auf ein konkretes Bauwerk auswirken, hängt von dessen dynamischer Charakteristik ab. Dies bedeutet, dass der lokale Standorteinfluss für ein Bauwerk sehr ungünstig sein kann, während er für ein anderes kaum negative Auswirkungen hat. Besonders ungünstig ist ein Zusammenfallen der Grundeigenfrequenz der Lockergesteinsschichten mit derjenigen des Bauwerks.

Die Norm SIA 261 berücksichtigt lokale Standorteinflüsse, indem sechs verschiedene "Baugrundklassen" unterschieden und für diese unterschiedliche Antwortspektren definiert werden. Aber natürlich kann die geologische Vielfalt der Schweiz mit sechs Baugrundklassen nur sehr grob erfasst werden. Bei etwas ungewöhnlichen geologischen Verhältnissen ist es deshalb oft sinnvoll, besondere Untersuchungen – sogenannte Mikrozonierungen – vorzunehmen.

In der Neustadt Luzern und in der Talebene Kriens-Horw liegen besonders ungünstige geologische Verhältnisse vor; tatsächlich waren die Schäden in der Neustadt beim Erdbeben von 1601 deutlich stärker als nördlich der Reuss. Auch beim Zuger Beben vom 11.02.2012 (Magnitude $M_I = 4.2$) waren die Bodenbewegungen in der Neustadt

deutlich stärker und dauerten wesentlich länger als nördlich der Reuss. In der Neustadt Luzern und in der Talebene Kriens-Horw liegen zwei Probleme vor: Erstens werden die Antwortspektren der Norm SIA 261 der besonderen Situation nur bedingt gerecht, und zweitens – weit wichtiger – besteht die Gefahr einer sogenannten Bodenverflüssigung.

2. Zielsetzung

Um die Auswirkungen der erwähnten ungünstigen geologischen Verhältnisse besser erfassen zu können, haben die Städte Luzern und Kriens sowie die Gemeinde Horw, gemeinsam mit der Dienststelle für Verkehr und Infrastruktur (vif) des Kantons Luzern (Projektleitung), für vier ausgewählte Entwicklungsgebiete im Raum Neustadt Luzern - Kriens - Horw seismische Mikrozonierungen durchführen lassen. Für drei dieser Entwicklungsgebiete wurde ein Merkblatt entwickelt, das die ortsspezifischen Resultate vorstellt und deren Umsetzung erläutert. Diese Resultate sind nur für die entsprechenden Entwicklungsgebiete gültig. Das hier vorliegende Merkblatt betrifft das Entwicklungsgebiet "Industriestrasse-Steghof" (Bild 1).

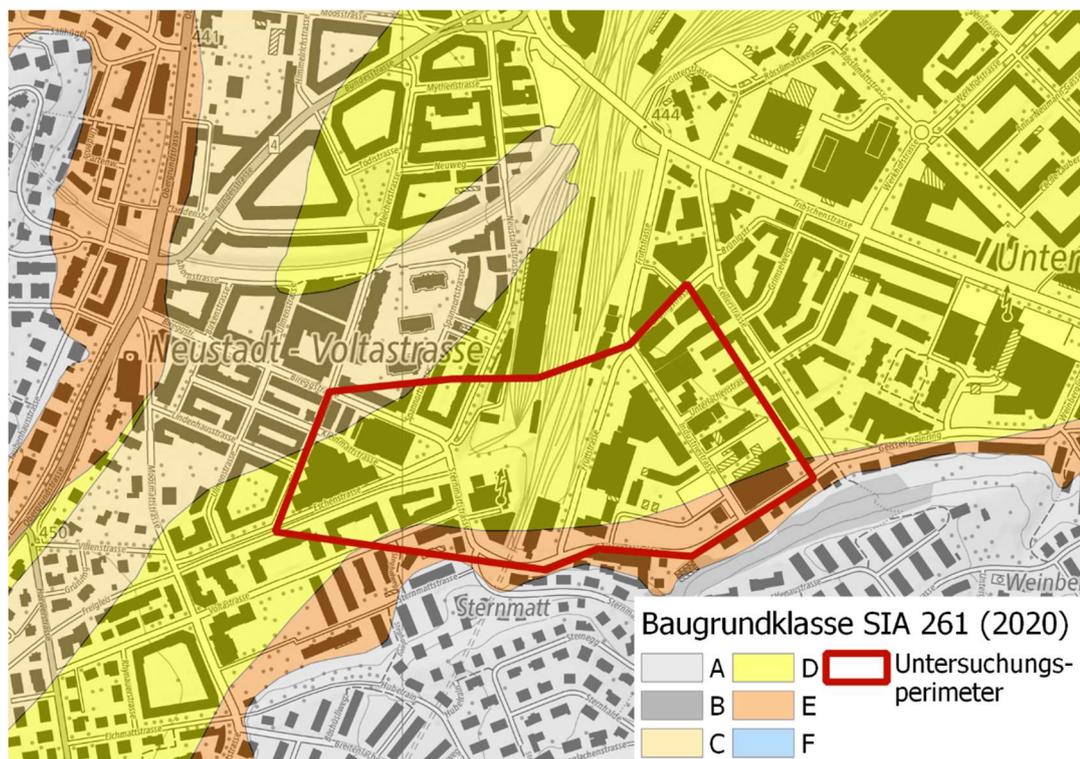


Bild 1: Entwicklungsgebiet "Industriestrasse-Steghof" auf dem Hintergrund der Baugrundklassen-Karte der Agglomeration Luzern.

Für dieses Entwicklungsgebiet sollte künftig nicht mehr die Karte der Baugrundklassen, sondern nur noch das standortspezifische Antwortspektrum verwendet werden, welches hier unter Punkt 3 vorgestellt wird. Dieses Antwortspektrum hat sich aus der erwähnten Mikrozonierung ergeben, der wesentlich gründlichere Untersuchungen zugrunde liegen als der Karte der Baugrundklassen. **Darüber hinaus**

ist die unter Punkt 4 beschriebene Problematik der Bodenverflüssigung zu beachten, die im Wesentlichen auch in einer weiteren Umgebung besteht.

3. Ortspezifisches Antwortspektrum

Die erwähnten Aufschaukelungen der Bodenbewegungen bei einem Erdbeben wurden für die vorhandenen geologisch-geotechnischen Verhältnisse mit Hilfe numerischer Simulationen berechnet. Die wichtigsten Parameter waren die Scherwellengeschwindigkeit in Funktion der Tiefe sowie die Topographie der unterirdischen Felsoberfläche. Diese Parameter wiesen trotz zahlreicher geophysikalischer Messungen bedeutende Kenntnisunschärfen auf, denen mit Parametervariationen bei den numerischen Simulationen Rechnung getragen wurde.

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen wurden gemäss Norm SIA 261/1 mit der regionalen Gefährdung (Modell SED 2015) gekoppelt, um ein standortspezifisches elastisches Antwortspektrum für horizontale Bodenbeschleunigungen zu definieren, das den örtlichen geologisch-geotechnischen Verhältnissen besser gerecht wird als die Spektren der Norm SIA 261. Bild 2 zeigt dieses Antwortspektrum (fett) im Vergleich zum Antwortspektrum, im Sinne einer Referenz, für die Baugrundklasse D (in Bild 2 fein gezeichnet) gemäss der Norm SIA 261, Ziffer 16.2.3.1, die (ohne Mikrozonierung) gemäss Baugrundklassenkarte am Standort gelten würde.

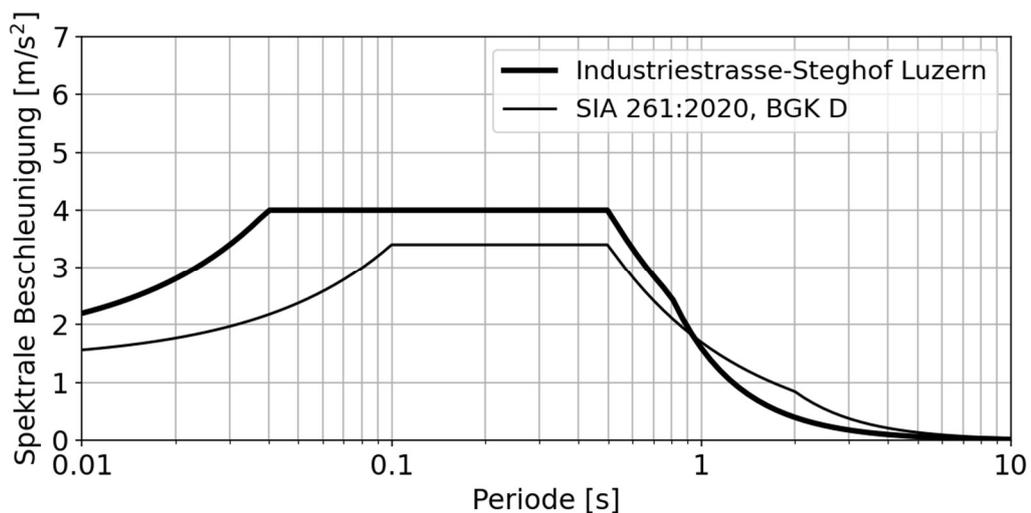


Bild 2: *Elastisches Antwortspektrum für die Bemessung (fett), gültig für das Entwicklungsgebiet "Industriestrasse-Steghof", im Vergleich zum elastischen Antwortspektrum für die Baugrundklasse D der Norm SIA 261 (fein).*

Die analytische Definition des standortspezifischen elastischen Antwortspektrums lautet für den üblichen Fall einer viskosen Dämpfung von $\xi = 0.05$:

$$- T < 0.04 \text{ s} \quad S_e = 1.6 + 60.0 T \quad [\text{m/s}^2] \quad (1)$$

$$- 0.04 \text{ s} \leq T \leq 0.5 \text{ s} \quad S_e = 4.0 \quad [\text{m/s}^2] \quad (2)$$

$$- 0.5 \text{ s} < T < 0.8 \text{ s} \quad S_e = 2.0 / T \quad [\text{m/s}^2] \quad (3)$$

$$- T \geq 0.8 \text{ s} \quad S_e = 2.2275 / T^2 \quad [\text{m/s}^2] \quad (4)$$

Aus obigen Beziehungen lassen sich folgende Grössen "ablesen": $S = 2.0$, $T_B = 0.04$ s, $T_C = 0.5$ s und $T_D = 0.8$ s. Für a_{gd} gilt unverändert: $a_{gd} = 0.8$ m/s². Mit diesen Werten lässt sich beispielsweise auch der Bemessungswert der Bodenverschiebung nach SIA 261, Ziffer 16.2.4.3, berechnen.

In den seltenen Fällen, in denen für ξ ein von 0.05 abweichender Wert zu berücksichtigen ist, ist Gleichung (1) zu ersetzen durch:

$$- T < 0.04 \text{ s} \quad S_e = 1.6 + 40.0 (2.5 \eta - 1) T \text{ [m/s}^2\text{]}, \quad (1')$$

und die Spektralbeschleunigungen S_e , die sich aus den Gleichungen (2), (3) und (4) ergeben, sind mit η zu multiplizieren, wobei η gegeben ist in Gleichung (30) der Norm SIA 261, Ziffer 16.2.3.1.

Das neu ermittelte standortspezifische elastische Antwortspektrum weist ein höheres (ca. 20%) und wesentlich breiteres Plateau auf als das elastische Antwortspektrum für die Baugrundklasse D der Norm SIA 261. Dies bedeutet, dass die Erdbebengefährdung für das Entwicklungsgebiet "Industriestrasse-Steghof", ausser für Perioden $T > \sim 0.9$ s, deutlich höher ist als sich gemäss der Norm SIA 261 für die Baugrundklasse D ergäbe. Für Perioden $T > \sim 0.9$ s, welche für hohe Gebäude ab etwa zehn Stockwerken oder für grössere Brücken relevant sind, ergeben sich hingegen etwas geringere Spektralbeschleunigungen gemäss ortsspezifischem elastischem Antwortspektrum als gemäss der Norm SIA 261 für die Baugrundklasse D.

Die zum Teil bis auf vier Stellen hinter dem Komma definierten Parameter des elastischen Antwortspektrums sind notwendig, um an den Übergangspunkten zu den benachbarten Periodenbereichen übereinstimmende Spektralbeschleunigungen zu erhalten. Diese Kommastellen bedeuten keineswegs, dass das elastische Antwortspektrum bis auf zwei Kommastellen genau ist! Im Gegenteil: Die Erdbebengefährdung und damit das Antwortspektrum sind immer mit einer namhaften Kenntnisunschärfe verbunden.

Vertikale Erdbebenbeschleunigungen sind nur in seltenen Fällen von Bedeutung. Sie können gemäss der Norm SIA 261, Ziffer 16.2.3.2, bestimmt werden, oder aber – realitätsnaher – nach dem Eurocode 8-1, Ziffer 3.2.2.3.

4. Gefahr einer Bodenverflüssigung

4.1 Was ist eine Bodenverflüssigung?

Wassergesättigte Sande und Silte können sich unter dynamischer Belastung vorübergehend "verflüssigen". Begründet liegt dieses Phänomen im mehrphasigen Aufbau des Bodens, bestehend aus Gesteinskörnern und Wasser.

Bei einem trockenen, locker gelagerten Sand oder Silt haben die einzelnen Körner, werden sie hinreichend stark geschüttelt, die Tendenz, in eine dichtere Lagerung überzugehen; das Porenvolumen nimmt dabei ab. Bei einem wassergesättigten Sand oder Silt aber sind die Poren mit Wasser gefüllt. Dieses müsste zuerst abfliessen, bevor sich eine dichtere Lagerung einstellen könnte, was in ausgedehnten Sand- und Siltschichten zu lange dauert. Daraus ergibt sich anstelle einer Abnahme des Porenvolumens ein Anstieg des Porenwasserdruckes. Dies entspricht einer Umlagerung des vorhandenen Überlagerungsdruckes vom Korngerüst auf das Porenwasser.

Erreicht der Zuwachs des Porenwasserdruckes den Wert der sogenannten effektiven Spannungen, die vor Erschütterungsbeginn im Korngerüst vorhanden waren, verschwinden die von Korn zu Korn wirkenden Kräfte vollständig, und die einzelnen Körner verlieren den Kontakt untereinander. Der Boden verhält sich nun wie eine schwere Flüssigkeit, mit einem spezifischen Gewicht, das dem Gemisch aus Körnern und Wasser entspricht.

Bei Erdbeben sind vor allem wassergesättigte, locker gelagerte Sande und Silte mit steiler Kornverteilungskurve gefährdet. Diese können einerseits signifikante Verdichtungen erfahren, und andererseits ist ihre Durchlässigkeit gering, so dass das Porenwasser nicht schnell genug abfließen kann, und sie weisen auch keine Kohäsion auf, welche die Gesteinskörner trotz Verlust der Korn-zu-Korn-Kräfte noch zusammenhalten könnte. Solch kritische Schichten liegen in der Neustadt verbreitet vor, allerdings – nach heutigen Kenntnissen – in Form von eher dünnmächtigen und lateral kaum zu korrelierenden Schichten.

Gespanntes Grundwasser – wie es in der Neustadt verbreitet vorhanden ist – verschärft die Problematik der Bodenverflüssigung in zweierlei Hinsicht. Der höhere Porenwasserdruck führt einerseits zu einem früheren Einsetzen der Bodenverflüssigung, und andererseits kann sich der höhere Porenwasserdruck schlagartig abbauen, indem das gespannte Grundwasser entlang von neuen oder vorhandenen hydraulischen Wegen, z.B. längs von Pfählen, plötzlich aufsteigt. Dabei kann es zu signifikanten Materialausschwemmungen aus dem tiefer gelegenen Grundwasserleiter kommen, sowie zu einer Druckentspannung mit entsprechend grossräumigeren Setzungen. Im konkreten Fall können die lokalen Drainagebedingungen das Ausmass und den zeitlichen Ablauf dieses Prozesses stark beeinflussen.

Auch in Fällen, in denen der Anstieg des Porenwasserdrucks noch nicht ausreicht, um eine vollständige Verflüssigung zu bewirken, kann sich bereits eine signifikante Verringerung der Scherfestigkeit des Bodens ergeben.

4.2 Untersuchungsmethodik

Die Möglichkeit einer Bodenverflüssigung beim Entwicklungsgebiet "Industriestrasse-Steghof" wurde anhand von fünf elektrischen Druckkegelsondierungen (CPT-Sondierungen) untersucht, die bis in eine Tiefe von 30 m vorgetrieben wurden. Deren Auswertung erfolgte nach den Methoden von Robertson und Wride (1998) und Robertson (2009). Obwohl diese Methoden dem heutigen Stand der Wissenschaft entsprechen, weisen die Resultate namhafte Unschärfen auf. Der Grund hierzu ist, dass diese Methoden auf der nachträglichen Analyse von Erdbeben basieren, bei denen Bodenverflüssigung aufgetreten ist, und die Bodenparameter, wie sie vor dem Erdbeben vorhanden waren, in solchen Fällen nur beschränkt bestimmbar sind.

Es wurden jeweils zwei Situationen betrachtet: Einerseits Bodenbewegungen mit einer Wiederkehrperiode von zirka 500 Jahren, wie sie für Bauwerke der Bauwerksklasse I zu berücksichtigen sind, und andererseits 1.5-mal stärkere Bodenbewegungen, mit einer Wiederkehrperiode von etwa 1000 Jahren, für die Bauwerke der Bauwerksklasse III zu bemessen sind.

4.3 Situation im Entwicklungsgebiet "Industriestrasse-Steghof"

Im Bereich des Entwicklungsgebietes "Industriestrasse-Steghof" sind gespannte Grundwasser-Druckverhältnisse vorhanden. Das tatsächliche Verhalten des Untergrundes bezüglich Bodenverflüssigung dürfte deshalb tendenziell eher noch ungünstiger ausfallen als nachfolgend beschrieben.

Resultate bezüglich Bauwerksklasse I

Bei einer Erdbebeneinwirkung, wie sie für die Bauwerksklasse I berücksichtigt wird, bestehen geringe Risiken einer Bodenverflüssigung, auch wenn eine solche, lokal beschränkt, nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann. Die Scherfestigkeit des Bodens könnte aber durchaus bis auf etwa drei Viertel der Scherfestigkeit des ungestörten Bodens abfallen. Die zu erwartenden Setzungen und horizontalen Bodenverschiebungen bleiben im Millimeterbereich.

Resultate bezüglich Bauwerksklasse III

Beim stärkeren Bemessungsbeben für die Bauwerksklasse III kann ein Verflüssigen einzelner Sandschichten zumindest lokal, möglicherweise aber auch in etwas ausgedehnteren Gebieten, nicht ausgeschlossen werden. Die Scherfestigkeit des Bodens dürfte in verschiedenen Bodenschichten deutlich abfallen, bis auf etwa die Hälfte der Scherfestigkeit des ungestörten Bodens. Zu erwarten ist, dass daraus Setzungen von bis zu einem Zentimeter resultieren. Auch horizontale Bodenverschiebungen von bis zu 10 Zentimetern sind möglich.

4.4 Fundationsverhalten bei Bodenverflüssigung

Bei Bodenverflüssigung besteht die Gefahr, dass die Pfähle während des Bebens auf Biegung und bezüglich Knicken überbeansprucht werden, da sie sich nicht mehr ausreichend seitlich abstützen können, um die Erdbebenkräfte auf den Boden zu übertragen. Auch schon ein starker Porenwasserdruck-Anstieg, der noch keine vollständige Verflüssigung auslöst, aber zu einer namhaften Abnahme der Scherfestigkeit des Bodens führt, kann bereits zu einer Überbeanspruchung der Pfähle führen.

Zusätzlich gefährdet sind Bauwerke mit Pfählen, bei denen die Mantelreibung einen erheblichen Beitrag zum äusseren Tragwiderstand leisten muss – und solche sind in der Neustadt naturgemäss weit verbreitet. Bei eintretender Bodenverflüssigung ist infolge des Porenwasserüberdrucks längs der Pfähle mit nach oben strömendem Wasser zu rechnen, so dass die Mantelreibung in den verflüssigten Schichten und darüber vorerst vollständig verloren geht. Nach einigen Stunden oder Tagen wird diese in der Regel allmählich wieder aufgebaut, aber nun in umgekehrter Richtung, so dass die am Pfahl wirkenden Reibungskräfte nun nach unten wirken. Dieses Phänomen kann zu unkontrollierten Setzungen eines Bauwerks führen. Weil der Untergrund oft heterogen und asymmetrisch aufgebaut ist, könnten daraus differenzielle Setzungen entstehen, die im schlimmsten Fall zum Einsturz des Bauwerkes infolge Fundationsversagens führen könnten.

5. Empfehlungen

Für die Erdbebenbemessung von Bauwerken im Entwicklungsgebiet "Industriestrasse-Steghof" gelten die nachfolgenden Empfehlungen. Bei wichtigen Bauwerken ist zu

prüfen, ob ein Spezialist mit vertieften Kenntnissen in geotechnischem Erdbebeningenieurwesen beigezogen werden soll.

5.1 Empfohlenes elastisches Antwortspektrum

Für das Entwicklungsgebiet "Industriestrasse-Steghof" sind gemäss der Norm SIA 261 für das elastische Antwortspektrum, Ziffer 16.2.3.1, das Bemessungsspektrum, Ziffer 16.2.4.1, und den Bemessungswert der Bodenverschiebung, Ziffer 16.2.4.3, folgende Parameter zu verwenden:

$S = 2.0$, $T_B = 0.04$ s, $T_C = 0.5$ s und $T_D = 0.8$ s (vgl. Bild 2).

Diese Parameter sind für die Erdbebenbemessung von Neubauten und die Erdbebenüberprüfung bestehender Bauten zu verwenden, denn sie erfassen die örtliche Situation besser als die entsprechenden Parameter in der Norm SIA 261, Tabelle 24. Für a_{gd} gilt gegenüber der Norm unverändert: $a_{gd} = 0.8$ m/s².

Der Bedeutungsbeiwert γ_f zur Berücksichtigung der Bauwerksklasse (BWK) ist gemäss der Norm SIA 261 einzusetzen.

5.2 Konzeptionelle und konstruktive Empfehlungen für die Foundation

Aus der Tatsache, dass Bodenschichten vorhanden sind, die zur Verflüssigung neigen, ergeben sich die folgenden konzeptionellen und konstruktiven Empfehlungen, die für alle BWK gelten:

- Pfähle müssen zwingend (mindestens) so lange sein, dass der Pfahlfuss unterhalb aller zu Bodenverflüssigung neigenden Schichten zu liegen kommt. Tiefer als 30 m darf eine Bodenverflüssigung wegen der hohen Auflast ohne weitere Untersuchungen ausgeschlossen werden.
- Mikropfähle sind bei Neubauten zu meiden (wegen ungenügender seitlicher Abstützung). Bei bestehenden Bauten sind sie als Ergänzung denkbar, sofern deren Ausfall bei Erdbeben in Kauf genommen werden kann.
- Bei der Erstellung von Bohrpfählen darf die Verrohrung aus der Sicht der Verzahnung nicht zu spät gezogen werden. Es ist genügend Überdruck zu erzeugen, damit der Beton nachgepresst wird. Die dadurch weitgehend abgedichteten Schichten wirken bei Bodenverflüssigung dem Ausschwemmen von Feinmaterial nach oben, entlang den Pfählen, entgegen. Diese Empfehlung ist bei schwimmenden Pfählen als "Regel der Baukunde" zu betrachten und gilt allgemein bei gespanntem Grundwasser, unabhängig von der Erdbebenproblematik.
- Zugpfähle sind generell problematisch, da bei Bodenverflüssigung die Mantelreibungskräfte in und über den verflüssigten Schichten verloren gehen.
- Für Gebäude sind Bodenplatten empfehlenswert; von Streifenfundamenten wird in der Regel abgeraten.

Für die BWK I und II sind zusätzlich die Mindestanforderungen an die konstruktive Durchbildung gemäss der Norm SIA 262 (2013), Ziffer 5.5.4, zu befolgen.

Für die BWK III sowie für Schulen gilt zusätzlich die Empfehlung, die Pfähle gemäss der Norm SIA 262 (2013), Ziffer 5.7 (Insbesondere 5.7.2.2) duktil auszubilden, wobei die gesamte Länge der Pfähle als plastische Bereiche zu betrachten sind, so dass sich

an jeder Stelle ein duktileres plastisches Gelenk ausbilden kann. Der Grund hierzu ist, dass es de facto unmöglich ist vorherzusagen, wo sich im Erdbebenfall plastische Gelenke einstellen werden.

5.3 Empfehlungen für die Nachweise der Fundationen

Der (passive) Scherwiderstand im Boden wird unter Erdbebeneinwirkungen infolge ansteigenden Porenwasserdrucks gegenüber den statischen Werten bereits deutlich reduziert, schon bevor sich eine vollständige Bodenverflüssigung einstellt. Bei Verhältnissen wie im Entwicklungsgebiet "Industriestrasse-Steghof" ist ein vorsichtiger Ansatz, für die Frühphase des Erdbebens davon auszugehen, dass das volle Antwortspektrum "wirkt", aber bereits nur noch ein Bruchteil des statischen Bodenwiderstandes vorhanden ist. Der reduzierte Bodenwiderstand bewirkt höhere Beanspruchungen der Pfähle in Bezug auf die Trägheitskräfte, die aus dem Oberbau übernommen werden müssen. Die sogenannte kinematische Interaktion zwischen den Pfählen und dem Boden hingegen (der Boden "versucht", den Pfählen, zumindest in den unteren Bereichen, die Bodendeformationen aufzuzwingen) darf bei den im Raum Luzern zu berücksichtigenden Erdbebeneinwirkungen für ausreichend bewehrte Pfähle (vgl. Punkt 5.2) vernachlässigt werden, da die Scherverformungen im Boden relativ bescheiden bleiben.

5.3.1 Bauwerksklasse I

Bauwerke der BWK I sind für das standortspezifische Antwortspektrum (Gleichungen 1 bis 4) zu bemessen, wobei die Scherwiderstände in zur Bodenverflüssigung neigenden Schichten (passive Erdwiderstände) nur zu drei Vierteln der statischen Werte eingesetzt werden sollen. Falls Probleme mit dem Nachweis entstehen, braucht es die für die BWK II und III empfohlenen zusätzlichen Untersuchungen.

5.3.2 Bauwerksklassen II und III

Bauwerke der BWK II und III erfordern mindestens zwei Drucksondierungen und eine Sondierbohrung zur Verifikation der Baugrundsichten. Für grössere Gebäude sind die Drucksondierungen in einem dichten Raster (etwa 30 m x 30 m) vorzusehen. Diese Drucksondierungen sind mit einem anerkannten Verfahren (z.B. Robertson, 2009) auszuwerten und hinsichtlich Bodenverflüssigungspotential zu beurteilen. Diese Bauwerke sind für das standortspezifische Antwortspektrum (Gleichungen 1 bis 4), multipliziert mit dem entsprechenden Bedeutungsbeiwert, zu berechnen, wobei die Scherwiderstände in zur Bodenverflüssigung neigenden Schichten (passive Erdwiderstände) nur zu zwei Dritteln (BWK II) bzw. zur Hälfte (BWK III) der statischen Werte eingesetzt werden sollen.

5.4 Übertragbarkeit der Empfehlungen auf die Neustadt

Die Resultate der durchgeführten Standortstudie gelten nur für das Entwicklungsgebiet "Industriestrasse-Steghof" und in grober Näherung für unmittelbar angrenzende Parzellen. Bekanntermassen sind aber in der Neustadt vergleichbare oder gar ungünstigere Verhältnisse mit schlechtem, siltig-sandigem Baugrund und daraus notwendigen Pfahlfundationen ebenso verbreitet wie gespannte Grundwasser-Druckverhältnisse. Wegen der örtlich erheblich variierenden geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse lassen sich aber die vorgelegten Resultate nicht einfach eins-zu-eins auf andere Gebiete übertragen.

Ausserhalb des Entwicklungsgebietes "Industriestrasse-Steghof" können, solange keine Ausweitung der Mikrozonierungsstudie vorliegt, die Antwortspektren der Norm SIA 261 verwendet werden. Für Bauwerke der Bauwerksklasse III sowie für Schulen wird allerdings empfohlen, eine ergänzende Studie zur Bestimmung eines standortspezifischen Antwortspektrums ins Auge zu fassen.

Bezüglich der Gefahr einer Bodenverflüssigung liegt es in der Verantwortung des für die üblichen Baugrunduntersuchungen zugezogenen Geotechnikers zu beurteilen, ob eine ähnliche oder gar ungünstigere Situation vorliegt als im Entwicklungsgebiet "Industriestrasse-Steghof". Trifft dies zu, sind die gleichen Empfehlungen wie für das Entwicklungsgebiet "Industriestrasse-Steghof" zu berücksichtigen.

5.5 Weitere Informationen

Umfassende Hintergrundinformationen zu den durchgeführten bodendynamischen Untersuchungen, auf denen sich das vorliegende Merkblatt abstützt, sind im Technischen Bericht "Spektrale Mikrozonierung Luzern für ausgewählte Untersuchungsgebiete", TB 406-01 vom 21. Juni 2012, und in der ergänzenden technischen Notiz "Aktualisierung der Spektren der vier Gebiete der Mikrozonierung in Luzern", NT 4044.01 vom 13. April 2021 dargelegt. Dokumente und Beilagen können beim Tiefbauamt der Stadt Luzern oder bei der Dienststelle Verkehr und Infrastruktur (vif) des Kantons Luzerns eingesehen werden.

Fachliche Grundlagen in deutscher Sprache lassen sich zum Beispiel im Buch "Bodendynamik" von J.A. Studer, J. Laue und M.G. Koller (Springer, 3. Auflage, 2007) finden, in Kapitel 7.2 zu den seismischen Standorteinflüssen und in Kapitel 4.8 zur Bodenverflüssigung.

5.6 Ausblick

Je nach Bautätigkeit sind die Empfehlungen dieses Merkblattes in fünf bis zehn Jahren aufgrund der zwischenzeitlich anfallenden neuen Informationen zu überprüfen und allenfalls anzupassen.