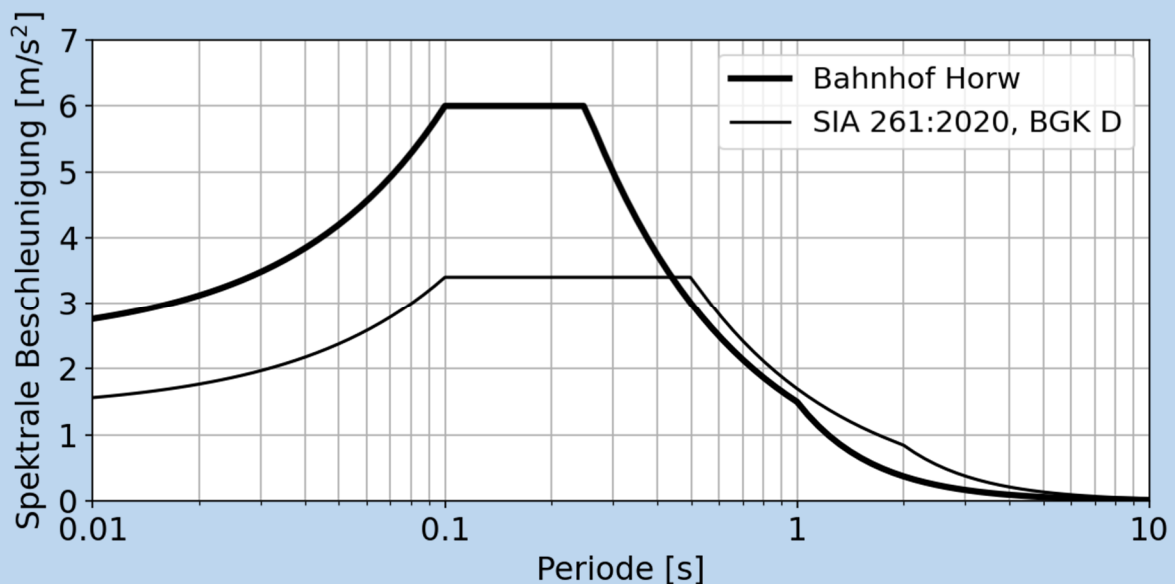


# Spektrale Erdbeben-Mikrozonierung

Detailabklärungen für Bahnhof Horw  
und Interpretation  
für übriges Gemeindegebiet



**Merkblatt (Ausgabe 2021)**



Gemeinde  
**HORW**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Impressum .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>4</b>
1.1 Erdbebengefährdung in Luzern .....	4
1.2 Einfluss des lokalen Baugrundes.....	4
<b>2. Zielsetzung .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Standortspezifisches Antwortspektrum für das Entwicklungsgebiet Bahnhof Horw .....</b>	<b>7</b>
<b>4. Gefahr einer Bodenverflüssigung.....</b>	<b>10</b>
4.1 Was ist eine Bodenverflüssigung? .....	10
4.2 Untersuchungsmethodik .....	11
4.3 Situation beim Bahnhof Horw .....	11
4.4 Fundationsverhalten bei Bodenverflüssigung.....	12
<b>5. Empfehlungen für das Entwicklungsgebiet Bahnhof Horw.....</b>	<b>13</b>
5.1 Empfohlenes standortspezifisches Antwortspektrum .....	13
5.2 Konzeptionelle und konstruktive Empfehlungen für die Foundation .....	14
5.3 Empfehlungen für die Nachweise der Fundationen .....	15
5.3.1 Bauwerksklasse I .....	16
5.3.2 Bauwerksklassen II und III .....	16
<b>6. Empfehlungen für das übrige Gemeindegebiet Horw .....</b>	<b>16</b>
Besonderheiten im Uferbereich des Horwer-Seebeckens .	17
6.1 Bodenverflüssigung .....	17
Besonderheiten im Uferbereich des Horwer-Seebeckens .	17
6.2 Empfehlungen für die Nachweise der Fundationen .....	18
<b>7. Weitere Informationen.....</b>	<b>18</b>
<b>8. Ausblick .....</b>	<b>18</b>

## Impressum

Das vorliegende Merkblatt basiert auf einer spektralen seismischen Mikrozonierungsstudie, einem gemeinsamen Projekt der Städte Luzern und Kriens sowie der Gemeinde Horw unter der Leitung der Dienststelle Verkehr und Infrastruktur vom Kanton Luzern, Abteilung Naturgefahren. Mit der Studie waren die Büros Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Carouge (Federführung), Keller + Lorenz AG und Geoprofile GmbH, beide Luzern, 2012 beauftragt. 2021 hat die Firma Résonance Ingénieurs-Conseils SA die Studie gemäss den geänderten Normanforderungen aktualisiert. Die Studie beinhaltete die Untersuchung von vier ausgewählten Standorten, in der Gemeinde Horw war dies das Gebiet des Bahnhofs Horw.

Die Entwürfe zum Merkblatt wurden von den Herren Dr. Bruno Zimmerli, dipl. Bauing. ETH/SIA, Kriens, Walter Fellmann, dipl. Bauing. ETH/SIA, Luzern, Clotaire Michel, Dr. habil. Erdwissenschaften und Ehrfried Kölz, dipl. Bauing. ETH/SIA eingehend korreferiert und mit Empfehlungen für das übrige Gemeindegebiet von Horw ergänzt.

## **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 aber 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, wie sie zum Beispiel in der Talebene von Horw vorkommen.

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 Bodenbe-

wegungen 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.

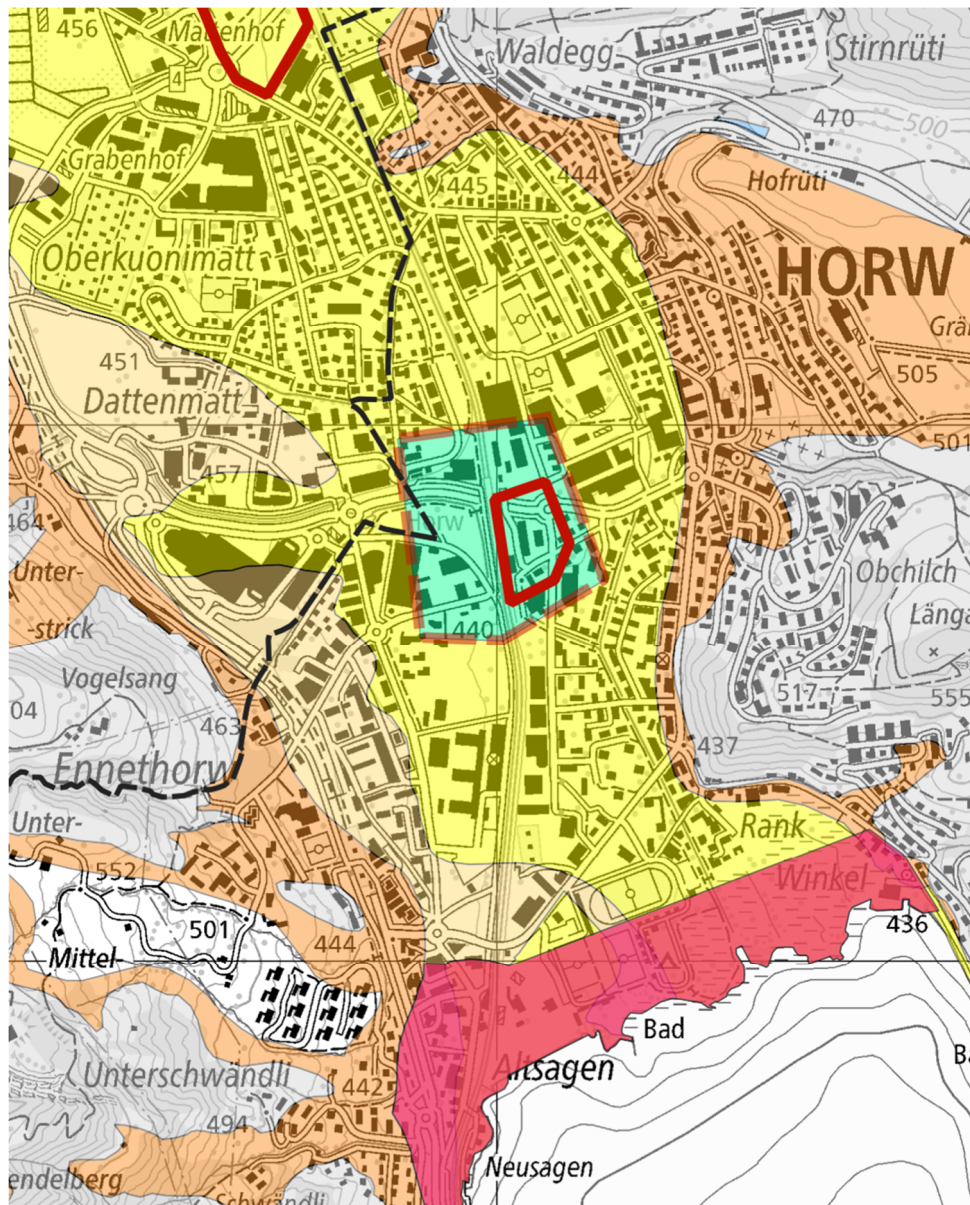
Die Norm SIA 261 berücksichtigt lokale Standorteinflüsse, indem sechs verschiedene "Baugrundklassen" unterschieden und für diese unterschiedliche Antwortspektren definiert werden. Aber natürlich kann die geologische Vielfältigkeit der Schweiz mit sechs Baugrundklassen nur sehr grob erfasst werden. Bei 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 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 grundsätz-

lich nur für die entsprechenden Entwicklungsgebiete gültig. Das hier vorliegende Merkblatt basiert auf den Detailresultaten des Entwicklungsgebiets "Bahnhof Horw" (Bild 1).



Baugrundklasse SIA 261 (2020)

- |   |   |                                 |                |
|---|---|---------------------------------|----------------|
| A | D | Untersuchungsgebiete            | Uferzone Horw  |
| B | E | Entwicklungsgebiet Bahnhof Horw | Gemeindegrenze |
| C | F |                                 |                |

Bild 1

Entwicklungsgebiet "Bahnhof Horw" auf dem Hintergrund der Baugrundklassen-Karte der Agglomeration Luzern

**Für das Entwicklungsgebiet Bahnhof Horw sollte künftig nicht mehr die Karte der Baugrundklassen und die Antwortspektren der Norm SIA 261, sondern nur noch die standortspezifischen Antwortspektren dieses Merkblattes verwendet werden. Für das übrige Gemeindegebiet von Horw gelten nach wie vor die Bestimmungen der Norm SIA 261.**

**Dasjenige für das Entwicklungsgebiet Bahnhof Horw wird hier unter Punkt 3 vorgestellt.** 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. Standortspezifisches Antwortspektrum für das Entwicklungsgebiet Bahnhof Horw**

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 das entsprechende Spektrum der Norm SIA 261. Bild 2 zeigt dieses Antwortspektrum (fett) im Vergleich zum Antwortspektrum für die Baugrundklasse D (in Bild 2 fein gezeichnet), welches gemäss der Norm SIA 261 (2020), Ziffer 16.2.3.1, zu verwenden wäre, wenn keine standortspezifische Untersuchung vorläge.

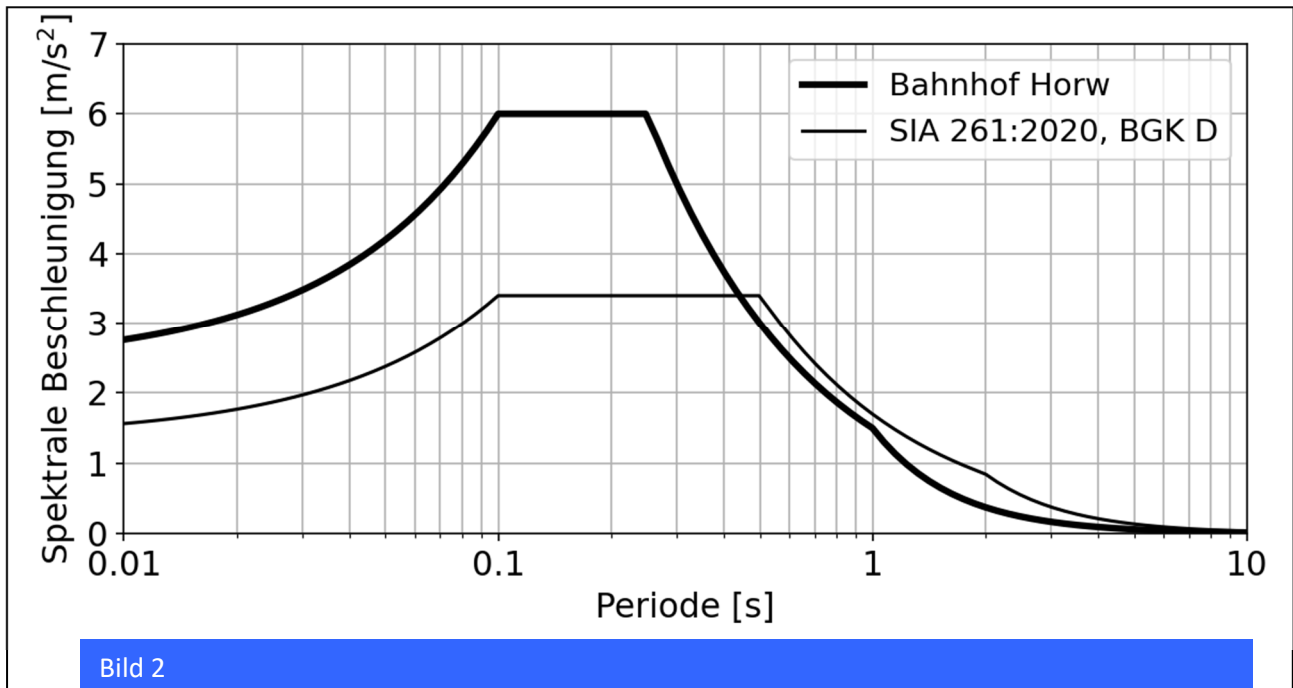


Bild 2

Elastisches Antwortspektrum für die Bemessung (fett), gültig für das Entwicklungsgebiet "Bahnhof Horw", 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  $\xi = 0.05$ :

$$\blacksquare T < 0.1 \text{ s} \quad S_e = 2.4 + 36 T \quad [\text{m/s}^2] \quad (1)$$

$$\blacksquare 0.1 \text{ s} \leq T \leq 0.25 \text{ s} \quad S_e = 6.0 \quad [\text{m/s}^2] \quad (2)$$

$$\blacksquare 0.25 \text{ s} < T < 1.0 \text{ s} \quad S_e = 1.5 / T \quad [\text{m/s}^2] \quad (3)$$

$$\blacksquare T \geq 1.0 \text{ s} \quad S_e = 1.5 / T^2 \quad [\text{m/s}^2] \quad (4)$$

Aus obigen Beziehungen lassen sich folgende Größen "ablesen":  $S = 3.0$ ,  $T_B = 0.1 \text{ s}$ ,  $T_C = 0.25 \text{ s}$  und  $T_D = 1.0 \text{ s}$ . Für  $a_{gd}$  gilt unverändert:  $a_{gd} = 0.8 \text{ m/s}^2$ . 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  $\xi$  ein von 0.05 abweichender Wert zu berücksichtigen ist, ist Gleichung (1) zu ersetzen durch:

$$\blacksquare \quad T < 0.1 \text{ s} \quad S_e = 2.4 + 24 (2.5 \eta - 1) T \text{ [m/s}^2\text{]}, \quad (1')$$

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

Das neu ermittelte standortspezifische elastische Antwortspektrum weist ein wesentlich höheres Plateau auf als das elastische Antwortspektrum für die Baugrundklasse D der Norm SIA 261. Das Plateau befindet sich hier allerdings bei relativ kurzen Perioden, im Bereich von  $0.1 \text{ s} < T < 0.25 \text{ s}$ , so dass dessen Höhe praktisch nur für ausgesprochen steife Strukturen von Bedeutung ist – bei Gebäuden nur für ein- bis allenfalls steife zweistöckige Gebäude. Für höhere Gebäude bleibt das gegenüber der Norm deutlich höhere Plateau praktisch bedeutungslos.

Für  $T > 0.25 \text{ s}$  nehmen die Spektralbeschleunigungen mit  $1/T$  ab, und im Periodenbereich von  $\sim 0.4 \text{ s} < T < 1.0 \text{ s}$  ergeben sich ähnliche Werte wie nach der Norm SIA 261 für die Baugrundklasse D. Für  $T > 1.0 \text{ s}$  schliesslich nehmen die Spektralbeschleunigungen mit  $1/T^2$  ab, so dass sich für  $T \geq 2 \text{ s}$  Werte ergeben, die nur etwa 50 % der Spektralbeschleunigungen für die Baugrundklasse D entsprechen.

Die zum Teil bis auf zwei Stellen hinter dem Komma definierten Koeffizienten in den Gleichungen (1) bis (4) 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 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 Talebene von Horw verbreitet vor, allerdings – nach heutigen Kenntnissen – in Form von eher dünnmächtigen und lateral kaum korrelierten Schichten.

Gespanntes Grundwasser – wie es in der Talebene Horw 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 Bahnhof Horw wurde anhand von drei elektrischen Druckkegelsondierungen (CPT-Sondierungen) untersucht, die bis in eine Tiefe von 40 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.

Für Horw wurden jeweils zwei Situationen betrachtet: Einerseits Bodenbewegungen mit einer Wiederkehrperiode von zirka 500 Jahren, wie sie für Bauwerke der Bauwerksklasse I als Bemessungsbeben 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 beim Bahnhof Horw**

In der Nähe des Bahnhofs Horw wurde schon artesisch gespanntes Grundwasser angetroffen, dessen Druck einer Wassersäule entsprach, die

bis 6 m über das gewachsene Terrain reichte (wie stark das Grundwasser gespannt ist, kann zeitlich stark variieren). Diese Situation wurde aber bei der Auswertung der CPT-Sondierungen, da methodisch schwierig, nicht explizit berücksichtigt. Das tatsächliche Verhalten des Untergrundes bezüglich Bodenverflüssigung könnte deshalb tendenziell eher noch ungünstiger ausfallen als nachfolgend beschrieben.

### **Resultate bezüglich Bauwerksklasse I**

Alle drei Sondierungen weisen mehrere dünne Sandschichten auf mit einer Sicherheit gegenüber Bodenverflüssigung, die bezüglich des Bemessungsbebens weniger als 1 beträgt. Demnach ist in vereinzelt Schichten mit vollständiger Bodenverflüssigung zu rechnen, deren Auswirkungen aber wegen der bescheidenen Mächtigkeit der betroffenen Schichten gering bleiben. In zahlreichen weiteren Schichten, die nicht vollständig verflüssigen, ist mit einer namhaften Abnahme der Scherfestigkeit zu rechnen.

Zu erwarten sind Setzungen von bis zu 10 cm. Auch horizontale Bodenverschiebungen im Zentimeter- bis sogar Dezimeterbereich sind möglich, vor allem wenn bereits vor dem Erdbeben namhafte Scherspannungen im Baugrund vorhanden sind (z.B. bei Geländesprüngen, bei lokal hoch belasteten Flachfundationen).

### **Resultate bezüglich Bauwerksklasse III**

Beim stärkeren Bemessungsbeben für die Bauwerksklasse III ist damit zu rechnen, dass sich verbreitete Sandschichten verflüssigen. In den sich nicht vollständig verflüssigenden Schichten ist mit einer namhaften Abnahme der Scherfestigkeit zu rechnen.

Die zu erwartenden Setzungen dürften Werte von zirka 15 bis 40 cm erreichen. Auch horizontale Bodenverschiebungen im Dezimeterbereich können nicht ausgeschlossen werden.

## **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 (im Bereich der zur Verflüssigung tendierenden Schichten und darüber) einen erheblichen Beitrag zum äusseren Tragwiderstand leisten muss – und solche sind in der Talebene Horw 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 das Entwicklungsgebiet Bahnhof Horw**

Für die Erdbebenbemessung von Bauwerken im Entwicklungsgebiet "Bahnhof Horw" gelten die nachfolgenden Empfehlungen. Bei wichtigen Bauwerken ist zu prüfen, ob ein Spezialist mit vertieften Kenntnissen im geotechnischen Erdbebeningenieurwesen beigezogen werden soll.

### **5.1 Empfohlenes standortspezifisches Antwortspektrum**

Beim Bahnhof Horw 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:

$S = 3.0$ ,  $T_B = 0.1 \text{ s}$ ,  $T_C = 0.25 \text{ s}$  und  $T_D = 1.0 \text{ s}$  (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:  $a_{gd} = 0.8 \text{ m/s}^2$ .

Der Bedeutungsbeiwert  $\gamma_f$  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 oder falls nur vertikale Zug- und Druckkräfte in den Baugrund eingeleitet werden müssen. Dabei sind die Kräfte unterhalb der zu Bodenverflüssigung neigenden Schichten einzuleiten und bei Druckpfählen ist das Knicken in den zu Bodenverflüssigung neigenden Baugrundsichten (ohne seitliche Stützung) nachzuweisen.
- 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 in der Regel Bodenplatten erforderlich, d.h. Streifenfundamente sind nicht zulässig.

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

Für die BWK II und III 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 Foundationen**

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 in Horw 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 in Horw 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 einem Drittel 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 einem Drittel der statischen Werte eingesetzt werden sollen.

## **6. Empfehlungen für das übrige Gemeindegebiet Horw**

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

Ausserhalb des Entwicklungsgebietes "Bahnhof Horw" können, solange keine Ausweitung der Mikrozonierungsstudie vorliegt, die Antwortspektren der Norm SIA 261 verwendet werden. Für Nachweise mit einer Peri-



ode unter 0.4 s (z. B. die maximale Bodenbeschleunigung PGA bei geotechnischen Untersuchungen) wird empfohlen, die Spektralbeschleunigungen  $S_e$  des entsprechenden Antwortspektrums der Norm SIA 261 um 20 % zu erhöhen. Für Bauwerke der Bauwerksklasse III sowie für Schulen wird allerdings empfohlen, eine ergänzende Studie zur Bestimmung eines standortspezifischen Antwortspektrums ins Auge zu fassen.

### **Besonderheiten im Uferbereich des Horwer-Seebeckens**

Im Uferbereich der Horwer-Seebucht, zwischen Neusagen im Westen und dem Hotel Sternen im Osten, fällt die Stirne der Deltaschüttung steil bis auf eine Seetiefe von gegen 40 m ab. Diese „foreset“-Schüttung ist naturgemäss wenig stabil und kann im Erdbebenfall lokal oder grossräumig abrutschen, was „hinter“ der Rutschung zu namhaften Horizontalverschiebungen führen kann. Aus diesen Gründen sind die Verhältnisse im Uferbereich (bis ca. 200 m von der Uferlinie entfernt) speziell zu untersuchen und die diesbezüglichen Risiken für Neubauten, wie für bestehende Bauten, durch erfahrene Geotechniker zu untersuchen. Allenfalls sind die Foundationen auf die speziellen Gefahren hin anzupassen.

### **6.1 Bodenverflüssigung**

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 beim Bahnhof. Trifft dies zu, sind die gleichen Empfehlungen wie für das Entwicklungsgebiet "Bahnhof Horw" zu berücksichtigen.

### **Besonderheiten im Uferbereich des Horwer-Seebeckens**

Für die Uferpartien, bis zu einer Distanz von etwa 200 m vom Ufer, sind weitergehende Untersuchungen erforderlich. Wegen der steilen Deltaschüttung besteht hier die Gefahr von Rutschungen, die in den ans Ufer angrenzenden Bereichen grosse horizontale Bodenverschiebungen bis zu einem Meter oder mehr bewirken können.

## **6.2 Empfehlungen für die Nachweise der Foundationen**

Hier gelten grundsätzlich die Vorgaben aus dem Entwicklungsgebiet Bahnhof Horw (siehe Abschnitt 5.3).

## **7. 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 bei der Baudirektion der Gemeinde oder bei der Dienststelle Verkehr und Infrastruktur (vif) des Kanton Luzerns, Abteilung Naturgefahren 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.

## **8. 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.



Online verfügbar unter Publikationen auf  
[www.horw.ch/publikationen](http://www.horw.ch/publikationen)

Gemeinde Horw  
Baudepartement  
Gemeindehausplatz 1  
Postfach  
648 Horw  
Tel. 041 349 12 92  
[baudepartement@horw.ch](mailto:baudepartement@horw.ch)  
[www.horw.ch](http://www.horw.ch)

Öffnungszeiten:  
- Montag bis Freitag 08.00 - 11.45 und 14.00 - 17.00 Uhr  
- Termine sind auch ausserhalb der ordentlichen  
Öffnungszeiten möglich

Ausgabe 29. Juni 2021