

## **Beschleunigungszeitverläufe in Übereinstimmung mit der BWG Richtlinie zur Erdbebensicherheit von Stauanlagen**

**STUDER ENGINEERING**

Jost A. Studer, Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH/SIA

Thujastrasse 4 · CH-8038 Zürich  
Telefon +41-1-481 06 00 · Fax +41-1-481 06 02

2191.02/STUDER  
Zürich, 27.08.03  
be 030827.doc

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Beschreibung der Methodik</b>	<b>1</b>
2.1 Generell	1
2.2 Ansatz	1
2.3 Umhüllende	2
2.4 Anpassung zu einem Zielantwortspektrum	2
<b>3 Inputdaten und Berechnungen</b>	<b>3</b>
3.1 Allgemeine Inputdaten und Grenzwerte	3
3.2 Berechnungen	6
<b>4 Darstellung der Resultate, Datenfiles</b>	<b>8</b>
4.1 Graphische Darstellung für jeden Zeitverlauf	8
4.2 ASCII-Files für jeden Zeitverlauf	8
4.3 Globale Files pro Baugrundklasse	8
<b>5 Referenzen</b>	<b>10</b>
<b>Anhänge: Künstliche Zeitverläufe</b>	
Baugrundklasse A	
Baugrundklasse B	
Baugrundklasse C	

## 1 Einleitung

Als Ergänzung zur "Richtlinie für den Nachweis der Erdbebensicherheit von Stauanlagen" (Ver.1.2, März 2003) des Bundesamtes für Wasser und Geologie (BWG) werden verschiedene künstliche Erdbebenzeitverläufe generiert. Diese Zeitverläufe entsprechen den Empfehlungen der Richtlinie.

Die künstlichen Beschleunigungszeitverläufe sind verträglich mit den Spektren der Richtlinie für die Baugrundklassen A, B und C, für 5% Dämpfung. Die stationäre Dauer geht von 10 Sekunden bis 30 Sekunden jeweils in Schritten von 2 Sekunden. Der Zeitintervall beträgt 0.01s.

Gemäss der Richtlinie sind drei Komponenten (zwei horizontale und eine vertikale Komponente) für dynamische Berechnungen zu verwenden. Entsprechend werden für jedes Spektrum und jede Dauer jeweils drei unabhängige Zeitverläufe berechnet, welche auf 1g für die maximale Bodenbeschleunigung normiert sind. Die Unabhängigkeit der entsprechenden Zeitverläufe wird mit Hilfe des statistischen Korrelationskoeffizienten bewertet.

Zu jedem Beschleunigungszeitverlauf werden zusätzlich berechnet und dargestellt: Geschwindigkeitszeitverlauf, Verschiebungszeitverlauf, Arias Intensität / Husid Plot und effektive Dauer gemäss Husid Plot.

Diese Arbeit wurde von Herrn Dr. Georges Darbre vom Bundesamt für Wasser und Geologie begleitet.

## 2 Beschreibung der Methodik

### 2.1 Generell

Die Generierung der künstlichen Erdbeben erfolgt gemäss der Methodik, welche in der Software "SIMQKE" beschrieben ist (SIMQKE, 1976). Obwohl die Entwicklung dieser Methodik schon einige Jahre zurückliegt, wird sie heute noch als state of practice zur Generierung künstlicher Erdbeben benutzt.

### 2.2 Ansatz

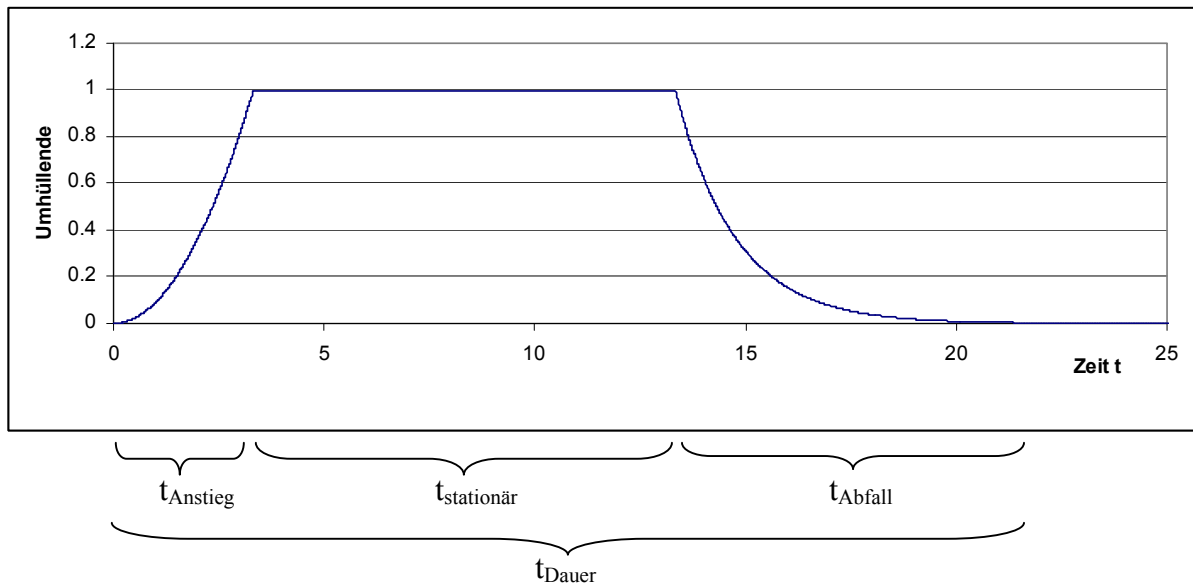
Die Generierung der Erdbebenzeitverläufe basiert auf die Überlagerung von Sinusfunktionen mit zufälligen Phasenwinkel  $\phi$ :

$$a(t) = \sum_1^n A_i \sin(\omega_i t + \phi_i) \quad (1)$$

wobei  $A_i$  die Amplitude und  $\phi_i$  den Phasenwinkel der entsprechenden Sinusfunktion mit der i-ten Eigenkreisfrequenz  $\omega_i$  darstellt. Durch die Modifikation der Amplituden und Phasenwinkel können Zeitverläufe generiert werden, welche ähnlich im Frequenzgehalt sind, aber sich im detaillierten Zeitverlauf unterscheiden.

### 2.3 Umhüllende

Der zeitliche Verlauf der Beschleunigung, welcher hinsichtlich den verwendeten Amplituden gemäss Abschnitt 2.2 stationär ist, kann mittels einer Umhüllendenfunktion modifiziert werden, um die zeitliche Veränderung der Amplituden zu modellieren:



Die hier verwendete Umhüllende hat folgende Eigenschaften:

- Anstieg bis zur Zeit  $t_{\text{Anstieg}}$ : Funktion 2. Grades (Parabel)
- Stationäre Dauer  $t_{\text{stat}}$ : Konstanter Wert = 1.0
- Abfall bis zu  $t_{\text{Dauer}}$ : Exponentialkurve der Form  $e^{-\alpha t}$

### 2.4 Anpassung zu einem Zielantwortspektrum

Ausgehend vom Ansatz in Kapitel 2.2 können für einen gegebenen die Amplituden  $A_i$  und die Phasenwinkel  $\phi_i$  iterativ verändert werden, um einen gegebenen Zielantwortspektrum möglichst gut anzuleichen.

Diese Iteration umfasst unter anderem die Berechnung der spektralen Dichte (definiert als das Quadrat der Fouriertransformierten des Zeitverlaufs), die Berücksichtigung der definierten Umhüllenden, sowie die Anpassung der maximalen Bodenbeschleunigung. Das Antwortspektrum des modifizierten Zeitverlaufs wird anschliessend mit dem Zielantwortspektrum verglichen, und nötigenfalls wird ein weiterer Iterationsschritt durchgeführt.

Um am Ende des Zeitverlaufs die Randbedingung für die Geschwindigkeit zu erfüllen (Geschwindigkeit soll Null sein) wird zudem eine "Baseline-Correction" durchgeführt.

Für eine genauere Beschreibung der Methodik wird auf die Originalliteratur von Gasparini und Vanmarcke (1976) verwiesen, welche dem Programm SIMQKE zugrunde gelegt ist.

### 3 Inputdaten und Berechnungen

Im folgenden werden die für die Generierung der künstlichen Erdbeben verwendeten Inputdaten sowie die entsprechenden zusätzlichen Berechnungen in Tabellenform beschrieben.

#### 3.1 Allgemeine Inputdaten und Grenzwerte

Variablen / Konstanten	Wert	Bemerkungen / Beschreibung
Maximale Iterationsschritte	10	<p>Die Anpassung des Antwortspektrums an das Zielspektrum innerhalb gewisser Toleranzgrenzen erfolgt iterativ, indem die Amplituden <math>A_i</math> in (1) mit jedem Iterationsschritt verändert werden. Da die Zuordnung der Phasenwinkel <math>\phi_i</math> zufällig ist, kann die Zahl der dazu notwendigen Iterationsschritte beträchtlich schwanken. Um die Rechenzeit zu verkürzen, wird die maximale Anzahl der Iterationsschritte begrenzt.</p> <p>Ist das Antwortspektrum nach der maximalen Anzahl von Iterationsschritten nicht innerhalb der Toleranzgrenzen, so wird eine neue Rechnung (mit neuen zufälligen Phasenwinkel <math>\phi_i</math>) gestartet.</p> <p>Der Wert von 10 erweist sich als vernünftig, evtl. könnte er aufgrund der Erfahrung mit den Berechnungen auch kleiner gewählt werden (bis zu einem Wert von etwa 7).</p> <p>Die Wahl dieses Wertes beeinflusst die Ergebnisse nicht.</p>
Dämpfung	5%	<p>Gemäss Vorgabe.</p> <p>Die erhaltenen Antwortspektren sind für eine Dämpfung von 5% berechnet.</p>
Zeitintervall $\Delta t$	0.01s	<p>Gemäss Vorgabe.</p> <p>Die Wahl des Zeitintervalls bestimmt auch die theoretisch maximale Abtastfrequenz, (Nyquist Theorem). Mit einer Frequenz von 100Hz (<math>=1/\Delta t</math>) beträgt die theoretisch maximale Abtastfrequenz somit 50Hz.</p> <p>Die maximale Frequenz, die im Signal abgebildet wird, hängt im vorliegenden Fall jedoch von anderen massgebenden Faktoren ab:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Weil die Methode der "mittleren Differenz" angewandt wird, beträgt die Grenzfrequenz <math>100\text{Hz}/\pi</math>, also ca. 31Hz.</li> <li>2. Da die Divergenz der Methode praktisch schon bei ca. 90% der Grenzfrequenz eintritt, wird diese entsprechend nochmals reduziert.</li> <li>3. Die Kontrolle der Toleranz zum Zielspektrum erfolgt in bestimmten Frequenzintervallen (200 Kontrollfrequenzen, logarithmisch verteilt) von 0.1Hz bis zur Grenzfrequenz. Um im wichtigsten Frequenzbereich eine möglichst gute Kontrolle zu erhalten, wurde die maximale</li> </ol>

		<p>Kontrollfrequenz nochmals reduziert, um 0.1 im logarithmischen Raum.</p> <p>Die maximale Kontrollfrequenz für die Berechnungen beträgt aufgrund der obigen Gründe ca. 17.5Hz, was einer Periode von ca. 0.057s entspricht:</p> $10^{0.9 \cdot \log(31\text{Hz}) - 0.1} \cong 17.5\text{Hz}$ <p>Dies ist für den bei Stauanlagen vorliegenden Frequenzbereich genügend.</p>
Stationäre Dauer	10s-30s	Die stationäre Dauer wurde für die verschiedenen Berechnungen gemäss Vorgabe von 10s bis zu 30s in Schritten von 2s erhöht.
Anstieg-/Abfallzeit	1/3 der stationären Dauer	Um realistischere Zeitverläufe zu erhalten, wurde die Anstieg-/Abfallzeit nicht konstant gehalten, sondern als 1/3 der entsprechenden stationären Dauer angenommen.
Parameter für Anstiegszeit	2	Der ansteigende Ast der Umhüllenden entspricht einer Funktion zweiten Grades (Parabel).
Parameter für Abfallzeit	0.7	Der absteigende Ast der Umhüllenden entspricht einer Exponentialfunktion der Form $e^{-\alpha t}$ mit Koeffizient $\alpha=0.7$ .
Zielspektrum für die spektrale Beschleunigung	Gemäss Richtlinie	Die Zielspektren für die Beschleunigungszeitverläufe entsprechen den Spektren der Richtlinie für die Baugrundklassen A, B und C, für 5% Dämpfung.
Normierung der Zielspektren	1g (9.81m/s <sup>2</sup> )	Gemäss Vorgabe wurden die Zielspektren für eine maximale Bodenbeschleunigung von 1g normiert.
Toleranzgrenzen	i.a. 10%	<p>Gemäss Richtlinie beträgt die zulässige Abweichung zum Zielspektrum 10%. Aufgrund der Erfahrung ist die Generierung von künstlichen Zeitverläufen praktisch jedoch nicht konvergent, falls auch im hochperiodischen Bereich diese Grenze von 10% eingehalten werden muss, da die entsprechenden Werte sehr klein werden.</p> <p>Deshalb wurden folgende Toleranzgrenzen eingehalten:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 10% im Bereich 0s bis T<sub>B</sub></li> <li>- 10% im Bereich T<sub>B</sub> bis T<sub>C</sub> (Plateau)</li> <li>- im Bereich &gt;T<sub>C</sub> kontinuierlicher Übergang von 10% Abweichung bis zu einem konstanten Wert von 0.75m/s<sup>2</sup> (geschätzter Wert aufgrund der Erfahrung).</li> </ul> <p>Diese Vorgaben sind aufgrund der erhaltenen Resultaten und Graphiken vernünftig. Besonders wichtig ist dabei, dass im gesamten Plateaubereich der Grenzwert von 10% Abweichung eingehalten wird.</p>
Zulässiger Korrelationskoeffizient	a : 0.1 v : 0.25 d : 0.35	<p>Die verwendeten Zeitverläufe für eine dynamische Berechnung müssen "statistisch unabhängig" sein.</p> <p>Aufgrund von Untersuchungen von C. Chen (1975) werden zwei Beschleunigungszeitverläufe als statistisch unabhängig</p>

		<p>betrachtet, falls deren Korrelationskoeffizient nicht grösser als 0.16 ist. Der Korrelationskoeffizient <math>k</math> zwischen zwei Zeitverläufen <math>x_1</math> und <math>x_2</math> ist dabei definiert als:</p> $k = \frac{\text{cov}(x_1, x_2)}{\sigma_{x_1} \sigma_{x_2}} \quad (2)$ <p>wobei <math>\sigma_{x_i}</math> die Standardabweichung der entsprechenden Variable und <math>\text{cov}(x_1, x_2)</math> die Kovarianz darstellt, welche durch</p> $\text{cov}(x_1, x_2) = \langle x_1 \cdot x_2 \rangle - \langle x_1 \rangle \cdot \langle x_2 \rangle \quad (3)$ <p>definiert ist. Die Bezeichnung <math>\langle x \rangle</math> stellt dabei den Mittelwert der Variable <math>x</math> dar.</p> <p>In den Richtlinien des USCOLD (1999) wird empfohlen, dass "für jeweils zwei Beschleunigungszeitverläufe sowie für die integrierten Geschwindigkeits- und Verschiebungszeitverläufe die Korrelationskoeffizienten berechnet werden sollen, und dass der entsprechende Wert relativ klein sein sollte (z.B. 0.1 oder kleiner für die Beschleunigung, 0.2 für die Geschwindigkeit und 0.3 für die Verschiebung)".</p> <p>Aufgrund den Erfahrungen mit den Berechnungen wurde erkannt, dass die Korrelationsbedingung für die Verschiebungen einen entscheidenden Einfluss hat. Die endgültigen Grenzwerte wurden zu 0.1, 0.25 und 0.35 gewählt. Die Bedingung von 0.3 von USCOLD für die Verschiebung ist für praktische Zwecke zu streng. Hingegen ist die gewählte Bedingung von 0.25 für die Geschwindigkeit meistens nicht massgebend, und könnte evtl. auf 0.2 reduziert werden.</p> <p>Mit diesen Vorgaben ergeben sich folgende Anhaltswerte für die durchgeführten Berechnungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Die reine <u>Rechenzeit</u> (auf einem Pentium III, 700MHz) betrug pro Bodenklasse ca. 20-60 Stunden.</li> <li>- Die Korrelationsbedingung für Verschiebungen war bei 50%-100% mehr Fällen massgebend als diejenige für Beschleunigungen, während diejenige für Geschwindigkeiten lediglich bei einem Drittel so vielen Fällen massgebend war.</li> <li>- Die Korrelationsbedingungen sind bis zu einer stationären Dauer von ca. 14-16 Sekunden streng, ab 16s haben sie einen bedeutend kleineren Einfluss. Dies kann damit erklärt werden, dass die Korrelation der Verschiebungen (welche meistens massgebend ist) für längere Zeitspannen kleiner wird.</li> </ul>
--	--	--

### 3.2 Berechnungen

Resultate	Bemerkungen / Beschreibung
Beschleunigungszeitverlauf a	<p>Berechnet mit der Methodik in Kapitel 2 und den Inputdaten in Abschnitt 3.1.</p> <p>Die totale Dauer der Beschleunigungszeitverläufe ist abhängig von der stationären Dauer. Da die Anstiegs- und Abfallzeit jeweils 1/3 der stationären Dauer betragen, ist die totale Dauer 5/3 mal die stationäre Dauer.</p> <p>Es ist möglich, dass der Maximalwert der Beschleunigung über dem normierten Wert von 1g liegt. Dies aus folgenden Gründen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Obwohl das Zielspektrum bei 1g normiert ist, besteht die zulässige Toleranz (10%) zum Zielspektrum</li> <li>- Wegen der Begrenztheit der Kontrollfrequenzen (bis 17.5Hz, vgl. Abschnitt 3.1) kann es in Ausnahmefällen sein, dass der Maximalwert der Beschleunigung auch leicht über 1.1g liegt.</li> </ul> <p>Diese Abweichung bei hohen Frequenzen hat jedoch keinen Einfluss auf den interessierenden Frequenzbereich für dynamische Berechnungen.</p> <p>Der Beschleunigungszeitverlauf wird baseline-korrigiert. Aus numerischen Gründen kann die Endgeschwindigkeit kleine Abweichungen vom Null-Wert haben, diese sind aber für die vorliegende Problemstellung nicht relevant.</p>
Beschleunigungsantwortspektrum	<p>Definiert als:</p> $S_a(T) = \max(a_{ES}(t, T)) \quad (4)$ <p>Dabei ist <math>a_{ES}(t, T)</math> die Antwort (Zeitverlauf der Beschleunigung) eines Einmassenschwingers mit Eigenperiode T, wenn er dem Beschleunigungszeitverlauf (Input) ausgesetzt wird. Der Maximalwert der Antwort dieses Einmassenschwingers ist gleich dem Wert des Beschleunigungsantwortspektrums <math>S_a(T)</math> bei der Periode T.</p> <p>Die Dämpfung der Einmassenschwinger beträgt dabei 5%.</p> <p>Dargestellt wird in den Resultaten sowohl ein breiterer Periodenbereich (0-5 Sekunden), als auch ein begrenzter Periodenbereich (0-1 Sekunden), welcher für übliche dynamische Berechnungen am wichtigsten ist. Die Datenfiles enthalten den gesamten berechneten Bereich.</p>
Geschwindigkeitszeitverlauf v	<p>Berechnet durch numerische Integration (Trapezmethode) des baseline-korrigierten Beschleunigungszeitverlaufs a:</p> $\left. \begin{aligned} v_1 &= 0 \\ v_i &= v_{i-1} + \Delta t \cdot (a_{i-1} + a_i)/2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$



Verschiebungszeitverlauf v	<p>Berechnet durch numerische Integration (Trapezmethode) des Geschwindigkeitszeitverlaufs v:</p> $\left. \begin{aligned} d_1 &= 0 \\ d_i &= d_{i-1} + \Delta t \cdot (v_{i-1} + v_i)/2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$
Arias Intensität AI	<p>Definiert als</p> $AI = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} a(t)^2 dt \quad (7)$ <p>Berechnet durch numerische Integration (Trapezmethode) des Quadrats des Beschleunigungszeitverlaufs a:</p> $\left. \begin{aligned} AI_1 &= 0 \\ AI_i &= AI_{i-1} + \Delta t \cdot (a^2_{i-1} + a^2_i)/2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$ <p>und anschließender Multiplikation mit <math>\pi/2g</math>.</p>
Husid plot	<p>Der Verlauf der Arias Intensität mit der Zeit, dividiert durch dessen Endwert wird als "Husid plot" dargestellt, mit Werten in %.</p> <p>Mit Hilfe des Husid plots wird die "effektive Dauer" <math>T_{eff}</math> des künstlichen Erdbebens definiert:</p> $T_{eff} = T_{95\%} - T_{5\%} \quad (9)$ <p>Mit <math>T_{95\%}</math> und <math>T_{5\%}</math> als diejenige Zeiten, bei welchen die Intensität 95% bzw. 5% des Endwertes erreicht.</p>
Korrelation	<p>Berechnung und Kriterien aufgrund Abschnitt 3.1. Es wurden sowohl Beschleunigungen, wie auch Geschwindigkeiten und Verschiebungen berücksichtigt.</p> <p>Korreliert wurde dabei ab der Zeit 0.0s bis zur kürzeren Dauer der beiden Zeitverläufe.</p> <p>Um eine effiziente Berechnung möglich zu machen, wurden fortlaufend folgende Korrelationskoeffizienten berechnet: Jeweils innerhalb einer Gruppe mit gleicher Dauer sowie für die Gruppen mit 2s und 4s geringerer Zeitdauer.</p> <p>Ist eines der Kriterien für den maximalen Korrelationskoeffizient für den aktuellen Zeitverlauf nicht erfüllt, so wird dieser verworfen, und eine andere Berechnung wird gestartet. Dies erfolgt so lange, bis der neue Zeitverlauf alle Kriterien erfüllt.</p> <p>Somit ist diese Bedingung sogar etwas stärker als die ursprünglich formulierte: Die berechneten Zeitverläufe sind statistisch unabhängig, sowohl innerhalb einer Gruppe mit gleicher Dauer, als auch innerhalb Gruppen mit bis zu 4s Unterschied.</p>

## 4 Darstellung der Resultate, Datenfiles

### 4.1 Graphische Darstellung für jeden Zeitverlauf

Die Resultate eines jeweiligen Zeitverlaufs werden in einem pdf File zusammenfassend dargestellt. Es ergeben sich somit 99 pdf Files, welche gemäss folgendem Schema benannt sind:

BK\_Klasse D\_Dauer Nr\_Nummer.pdf

Wobei:

- "Klasse" die Baugrundklasse (A bis C)
- "Dauer" die stationäre Dauer (12s bis 30s in 2s-Schritten) und
- "Nummer" die jeweilige Nummer (1 bis 3) darstellt.

Als Beispiel heisst das File für Baugrundklasse C, stationäre Dauer 22s, Nummer 3 "BK\_C D\_22 Nr\_3.pdf".

### 4.2 ASCII-Files für jeden Zeitverlauf

Nebst den pdf-Files sind weitere zwei Files pro Zeitverlauf vorhanden:

#### 1. Datenfile mit verschiedenen Zeitverläufen

Der Name des Datenfiles ist der gleiche wie das entsprechende pdf-File, jedoch mit der Endung ".dat". Die Daten sind in fünf Kolonnen angeordnet, wobei die Kolonnen von links nach rechts folgende Grössen darstellen: Zeit (in s), Beschleunigung (in  $m/s^2$ ), Geschwindigkeit (in m/s), Verschiebung (in m), Arias Intensität (in  $m/s$ ).

#### 2. Spektrum

Der Name des Spektrum-Files ist der gleiche wie das entsprechende pdf-File, jedoch mit der Endung "spektrum.dat". Die Daten sind in drei Kolonnen angeordnet, wobei die Kolonnen von links nach rechts folgende Grössen darstellen: Frequenz (in Hz), Periode (in s), Spektralwert der maximalen Bodenbeschleunigung (in  $m/s^2$ ).

### 4.3 Globale Files pro Baugrundklasse

Pro Baugrundklasse sind zudem folgende Files vorhanden:

- "Beschleunigungen.dat": Beschleunigungszeitverläufe aller 33 Berechnungen innerhalb einer Baugrundklasse. Die Daten sind in 34 Kolonnen angeordnet, wobei die Kolonnen folgende Grössen darstellen:

Zeit	Stationäre Dauer 10s, Nummer 1	Stationäre Dauer 10s, Nummer 2	Stationäre Dauer 10s, Nummer 3	Stationäre Dauer 12s, Nummer 1	...	Stationäre Dauer n, Nummer x	...	Stationäre Dauer 30s, Nummer 3
------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	-----	------------------------------	-----	--------------------------------

Die Zeit läuft von 0 bis 50s (maximale totale Dauer für stationäre Dauer 30s). Die Beschleunigungswerte im File sind für stationäre Dauern kleiner als 30s nach Ende der jeweiligen tota-

len Dauer mit 0 aufgefüllt.

- "Geschwindigkeiten.dat": Analoges File wie oben, für alle Geschwindigkeitszeitverläufe.
- "Verschiebungen.dat": Analoges File wie oben, für alle Verschiebungszeitverläufe.
- "Korrelationsfaktoren a.dat": Korrelationsfaktoren für Beschleunigungen in Tabellenform. Es sind 33 Zeilen und 33 Kolonnen vorhanden, wobei die Kolonnen und Zeilen folgende Grössen darstellen:

	Korrelationen für Dauer 10s, Nummer 1	Korrelationen für Dauer 10s, Nummer 2	Korrelationen für Dauer 10s, Nummer 3	Korrelationen für Dauer 12s, Nummer 1	...	Korrelationen für Dauer n, Nummer x	...	Korrelationen für Dauer 30s, Nummer 3
Korrelationen für Dauer 10s, Nummer 1	1							
Korrelationen für Dauer 10s, Nummer 2		1						
Korrelationen für Dauer 10s, Nummer 3			1					
Korrelationen für Dauer 12s, Nummer 1				1				
...					1			
Korrelationen für Dauer n, Nummer x						1		
...							1	
Korrelationen für Dauer 30s, Nummer 3								1

Im Schnittpunkt der Kolonne i mit der Zeile j befindet sich der entsprechende Korrelationsfaktor.

Ergänzende Bemerkungen:

- Die Korrelationen wurden nur berechnet, falls die Dauern innerhalb 4s Unterschied liegen. Andernfalls wurde ein Wert von 0 zugewiesen.
  - In der Diagonalen beträgt der Wert 1, da der entsprechende Zeitverlauf mit sich selber korreliert wird.
  - Die sich ergebende Korrelationsmatrix ist symmetrisch, weil aufgrund Formel (3)  $\text{cov}(x,y) = \text{cov}(y,x)$  ist.
  - Die Korrelationsfaktoren sind gemäss den entsprechenden Berechnungsformeln (2) und (3) dimensionslos: Besitzt eine Grösse die Dimension D, so beträgt die Dimension der Kovarianz im Zähler von (2)  $D^2$ , was auch der Dimension des Nenners entspricht, da die Standardabweichung die Dimension D besitzt.
- "Korrelationsfaktoren v.dat": Analoges File wie oben, für Geschwindigkeit.
  - "Korrelationsfaktoren d.dat": Analoges File wie oben, für Verschiebung.

## 5 Referenzen

SIMQKE: A Program for Artificial Motion Generation: User's Manual and Documentation, Depart. Of Civil Engineering, Massachussets Institute of Technology, Cambridge, 1976.

Gasparini, D. A. and E. H. Vanmarcke (1976). "Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra". Dept. of Civil Engineering, Research Report R76-4, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.

Chang Chen, (1975). "Definition of Statistically Independent Time Histories", Journal of Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 101, No. St2, February 1975.

USCOLD United States Committee on Large Dams, "Updated Guidelines for Selecting Seismic Parameters for Dam Projects", April 1999.

Zürich, 27. August 2003

Studer Engineering