

Schwankungen des Grundwasserspiegels als Folge von Erdbeben

Von HEINRICH JÄCKLI, Zürich

Seit langem ist bekannt, dass sich Erdbebeneerschütterungen auch in spontanen Schwankungen des Grundwasserspiegels bemerkbar machen können, dass also Grundwasserpumpwerke und Beobachtungsrohre, in denen der Grundwasserspiegel kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet wird, als «Hydroseismographen» wirken. Aus Erdbebengebieten sind verschiedentlich diesbezügliche Beobachtungen kurz publiziert worden (F. G. BLANCHARD u. P. BYERLY 1935; G. A. LA ROCQUE 1941; R. MÜGGE 1954; R. C. VORHIS 1955) und haben auch Erwähnung in Lehrbüchern der Hydrogeologie gefunden (O. E. MEINZNER 1942; D. K. TODD 1960; G. CASTANY 1967).

Im folgenden soll über analoge Beobachtungen im Grundwassergebiet des Limmattales bei Zürich und im Furttal bei Regensdorf (ZH) berichtet werden, die in Grundwasserbeobachtungsrohren mit automatischem Schreibpegel in den Jahren 1976 bis 1978 gemacht wurden.

1. Das Netz der Grundwasserbeobachtungsstellen

Im obersten Limmattal von Zürich bis Schlieren werden im Auftrage des kantonalen Amtes für Gewässerschutz und Wasserbau und der Wasserversorgung der Stadt Zürich seit 1976 an 17 Stellen und im oberen Furttal oberhalb und unterhalb Regensdorf an 5 Stellen kontinuierliche Grundwasserspiegelbeobachtungen mittels automatischer Schreibpegel durchgeführt.

Die Lage dieser Beobachtungspunkte, die nicht mit Pumpwerken zusammenfallen, sind auf Abb. 1 und 2 dargestellt.

Der Grundwasserleiter wird im Limmattal durch den sandigen Kies spätquartären Alters der Talsohle, ohne Moränendecke und ohne Vorbelastung durch einstiges Gletschereis, gebildet. Im oberen Furttal ist zu unterscheiden zwischen dem tieferen gespannten Grundwasserstockwerk, dargestellt durch einen frühwürmzeitlichen Vorstossschotter, der eine Würmmoräne trägt, und dem höheren Stockwerk in einem «Rückzugschotter» ohne Moränenbedeckung, mit ungespanntem Grundwasser.

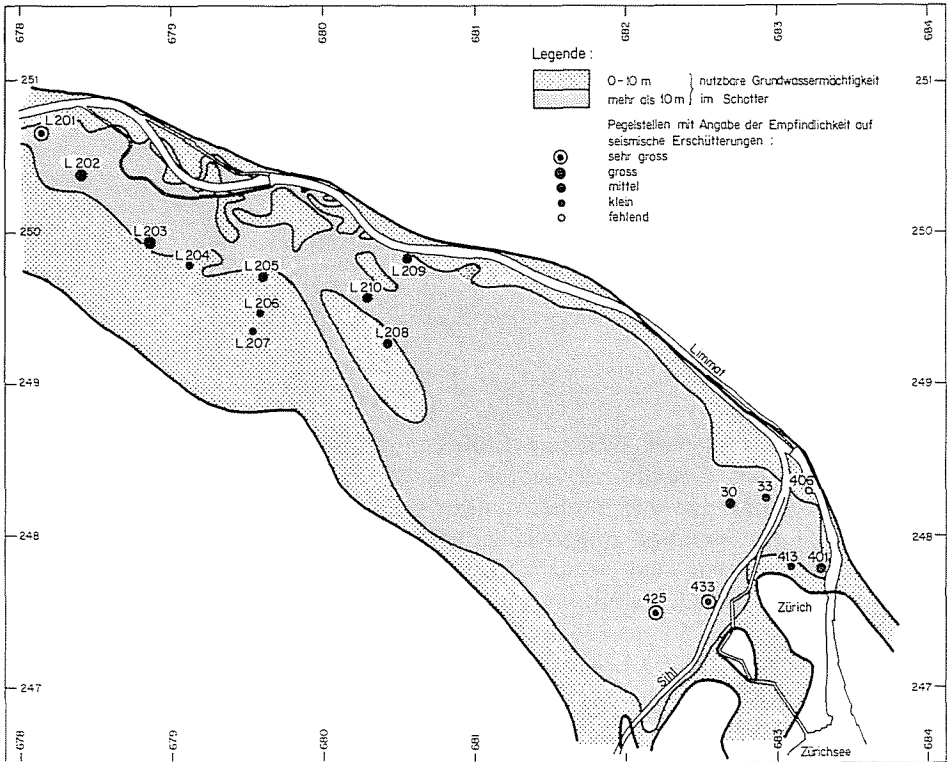


Abb. 1 Lage der Pegelstellen im Grundwasserstrom des Limmattales, mit Angabe der Empfindlichkeit auf seismische Erschütterungen. Massstab 1:50 000

2. Ausrüstung

Bei diesen Beobachtungsstellen handelt es sich um vertikale Bohrlöcher, in denen ein PVC-Rohr versetzt ist, das im oberen Teil vollwandig, im unteren geschlitzt ist, um dem Grundwasser freien Zutritt ins Rohr zu erlauben. Der Rohrdurchmesser beträgt üblicherweise $4\frac{1}{2}$ " , in wenigen Fällen 5" .

Am Rohrkopf ist ein automatischer Vertikalregistrierpegel, Modell Alpha der Firma SEBA Hydrometrie, Kaufbeuren, montiert. Der Schwimmer hat einen Durchmesser von 40 mm, die Übertragung erfolgt mittels Drahtseil auf eine Zahnradübersetzung, von der aus die Schreibfeder bedient wird. Der vertikale Registriermassstab beträgt 1:20, der Zeitmassstab 1 mm = 2 Stunden, entsprechend einem Umlauf der Registriertrommel in 32 Tagen bei 384 mm Trommelumfang.

Dieses Beobachtungsnetz mit einheitlicher Ausrüstung bringt folgende Vor- und Nachteile:

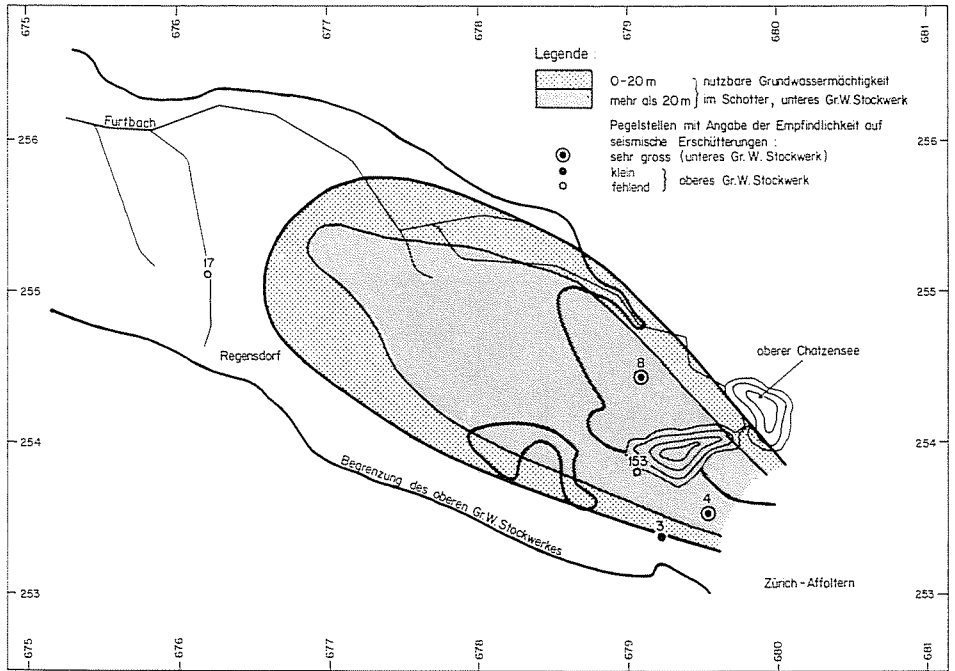


Abb. 2 Lage der Pegelstellen im oberen Furttal, mit Unterscheidung zwischen oberem ungespanntem und unterem gespanntem Grundwasserstockwerk. Massstab 1:50 000

Alle Rohre haben für die Erfassung der hier beschriebenen erdbebenbedingten Grundwasserschwankungen praktisch denselben Durchmesser; der Rohrdurchmesser braucht somit nicht als Parameter betrachtet zu werden.

Im Gegensatz zu Grundwasserfassungen mit intermittierendem Pumpbetrieb wird in den Beobachtungsrohren nicht gepumpt. Man beobachtet in ihnen meist einen nicht abgesenkten, sondern natürlichen, sog. «Ruhegrundwasserspiegel». Eine gewisse Ausnahme machen Rohr Nr. 433 nahe der Grundwasserfassung b 2-7 Robert Ober, Zürich, in welchem der Pumpbetrieb der genannten Fassung als kurzfristige tägliche Schwankungen von rund 5 cm zu verspüren ist, und Rohr Nrn. 4 und 8 im unteren, gespannten Grundwasserstockwerk des oberen Furttales, in denen kurzfristige Schwankungen von einigen cm bis dm zu erkennen sind, die auf den Pumpbetrieb in der 0,8 resp. 1,6 km entfernten Fassung der Strafanstalt Regensdorf zurückzuführen sind.

Der Höhenmassstab 1:20 erlaubt die Erfassung von Amplituden des Grundwasserspiegels im Bereich zwischen 1 cm und 5 m, entsprechend 0,5 mm bis 25 cm auf dem Registrierpapier. Die grösste bisher gemessene erdbebenbedingte Amplitude betrug 72 cm.

Die langsame Umlaufgeschwindigkeit und damit der gedrängte Zeitmassstab von

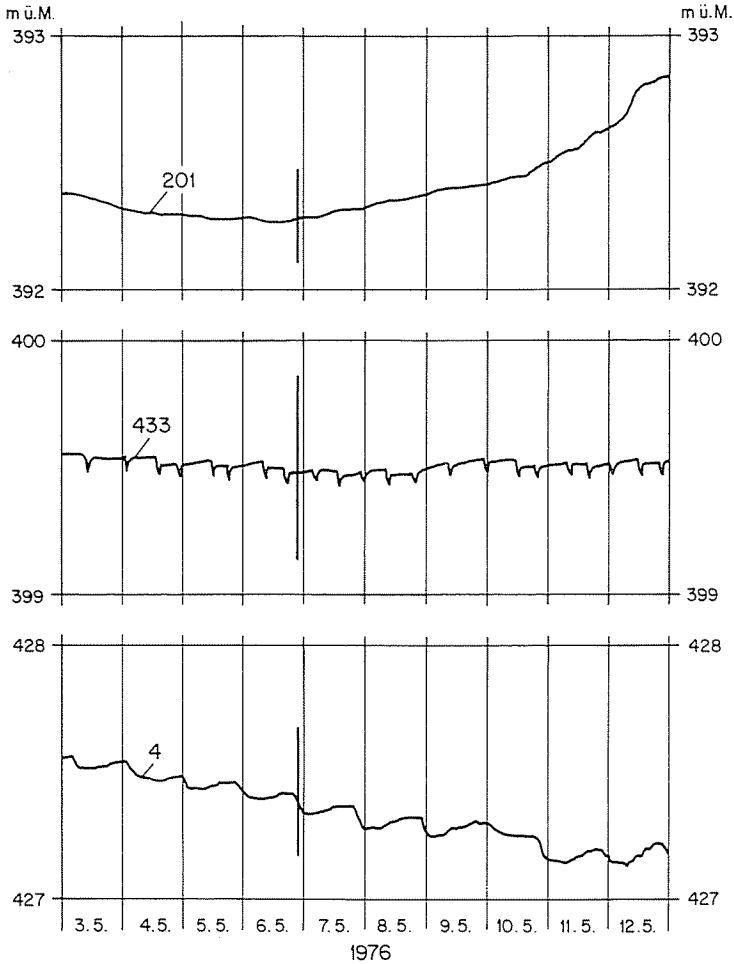


Abb. 3 Ganglinien der Pegelschreiber Nrn. 201, 433 und 4 vom 3.–12. Mai 1976 mit der Aufzeichnung des Bebens Friaul I vom 6. Mai.

0,5 mm pro Stunde verunmöglichen die Erfassung der Frequenz und der Dämpfung resp. der Dauer der Schwankungen; dazu wäre eine rund hundertmal grössere Umlaufgeschwindigkeit der Registriertrommel nötig.

Auf Abb. 3 sind drei solcher Ganglinien in natürlicher Grösse dargestellt mit der Registrierung des Erdbebens von Friaul vom 6. Mai 1976, 21.00 Uhr. Es sind dies die Pegelstellen:

Nr. 201, unterhalb der Kläranlage Werdhölzli, Zürich-Altstetten, 130 m vom linken Limmatufer entfernt, mit längerfristigen Schwankungen von rund 50 cm. Erdbebenbedingte Amplitude: 38 cm.

Nr. 433, Kasernenstrasse, Zürich 4, nahe dem linken Sihlufer, mit langfristig geringen Grundwasserschwankungen, jedoch mit täglichen kurzfristigen künstlichen Schwankungen von rund 5 cm, bedingt durch den intermittierenden Pumpbetrieb in der 70 m entfernten Grundwasserfassung der Firma Robert Ober am gegenüberliegenden rechten Sihlufer. Erdbebenbedingte Amplitude: 72 cm.

Nr. 4, Oberes Furttal, südlich des unteren Katzenses, Zürich-Affoltern, mit Tagesrhythmen von 5–10 cm als Folge des Pumpbetriebes in der 1,6 km entfernten Grundwasserfassung der Strafanstalt Regensdorf. Erdbebenbedingte Amplitude: 51 cm.

3. Amplituden

Von den registrierten Beben 1976–1978 hat jenes von Friaul vom 6. Mai 1976 (im folgenden der Kürze wegen als «Friaul I» benannt) an allen ansprechenden Pegelstellen die grössten Amplituden erzeugt, nämlich bis maximal 72 cm; sie sind auf Tabelle 1, Kolonne 3, enthalten.

Rein empirisch lassen sich nach der Grösse der Amplituden die Pegelstellen in fünf Empfindlichkeitsgruppen einteilen.

Kategorie I. Sehr grosse Empfindlichkeit. Amplitude grösser als 30 cm beim Beben Friaul I.

Pegelstellen 433, 201 und 425 im Limmattal,

Nrn. 4 und 8 im oberen Furttal im unteren gespannten Grundwasserstockwerk.

Kategorie II. Grosse Empfindlichkeit. Amplitude 20–30 cm, Pegelstellen 202 und 203 im Limmattal.

Kategorie III. Mittलगrosse Empfindlichkeit. Amplitude 10–20 cm, Pegelstellen 209, 210, 401, 205, 30 und 208 im Limmattal.

Kategorie IV. Kleine Empfindlichkeit. Amplitude 1–10 cm. Pegelstellen 33, 207, 204, 413 und 206 im Limmattal, Nr. 3 im Furttal im oberen, ungespannten Grundwasserstockwerk.

Kategorie V. Keine messbare Reaktion, resp. Amplitude kleiner als 1 cm, als solche nicht mehr erkennbar. Pegelstellen 406 im Limmattal, 17 und 153 im Furttal im oberen, ungespannten Stockwerk, wobei Nr. 17 im gewachsenen Kies, Nr. 153 in künstlicher kiesiger Auffüllung liegt.

Neben dem genannten Beben Friaul I, das die weitaus grössten Amplituden provozierte, liessen sich noch von folgenden vier weiteren Beben Ausschläge des Grundwasserspiegels erkennen:

Friaul II	11. Sept. 1976, 17.31 Uhr
Friaul III	15. Sept. 1976, 10.19 Uhr
Vrança, Rumänien	4. März 1977, 21.09 Uhr
Süddeutschland	3. Sept. 1978, 06.08 Uhr

Pegelstelle			Erdbeben				
			Friaul I	Friaul II	Friaul III	Rumänien	Süddeutschland
			HO 6.5.76 21.00 h	11.9.76 17.31 h	15.9.76 10.19 h	4.3.77 21.09 h	3.9.78 6.08 h
			M 6.5	5.5	6.3	7.7	5.8
			IZ IV		IV	I	V
1	2	3	4	5	6	7	8
	Pegelstelle	Grundwasser- mächtigkeit	Amplituden in cm				
Kategorie I: Empfindlichkeit sehr gross	L 433 L 201 L 425 FU 4 FU 8	23 m ca. 20 m 28 m 30 m 28 m	72 38 36 51 41	3 3 2 2 0	19 14 12 13 6	10 3 2 9 5	2 4 2 0 1
Kategorie II: Empfindlichkeit gross	L 202 L 203	ca. 18 m ca. 18 m	25 24	2 2	9 8	2 2	2 2
Kategorie III: Empfindlichkeit mittel	L 209 L 210 L 401 L 205 L 30 L 208	ca. 17 m ca. 15 m ca. 16 m 6 m 10 m 8 m	17 16 16 15 14 12	2 - 0 1 0 0	8 - 4 7 1 3	2 1 1 1 - 0	1 2 0 2 0 1
Kategorie IV: Empfindlichkeit klein	L 33 FO 3 L 207 L 204 L 413 L 206	15 m 10 m 5 m 3 m 3 m 3 m	7 4 3 2 1 1	0 0 0 0 0 0	2 1 1 1 0 0	0 1 0 0 0 0	0 0 0 0 - 0
Kategorie V: keine Reaktion	L 406 FO 17 FO 153	3 m 3 m 5 m	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0
HO = Herzzeit (Greenwichzeit)		L = Limmattal					
M = Magnitude nach der Richterskala		FO = Furtital oberes Stockwerk ungespannt					
IZ = Intensität in Zürich		FU = Furtital unteres Stockwerk gespannt					

Auf Tabelle 1 sind die an den einzelnen Pegelstellen registrierten Grundwasseramplituden für alle diese Beben zusammengestellt.

Es zeigt sich dabei, dass die Reihenfolge in der Empfindlichkeit der verschiedenen Pegelstellen, wie sie für das Beben Friaul I aufgestellt wurde, auch für die anderen Beben weitgehend gilt. Bei den nur schwach registrierten Beben Friaul II, Rumänien und Süddeutschland sprachen die Pegelstellen der Kategorie IV, teils sogar der Kategorie III, überhaupt nicht mehr an.

4. Empfindlichkeit auf Bebenerschütterungen

Die ganz eklatanten Unterschiede der verschiedenen Pegelstellen in ihrer Empfindlichkeit auf die Erschütterungen desselben Bebens verlangten nach einer Abklärung der Gründe.

a) *Flurabstand des Grundwasserspiegels*

Der Flurabstand beträgt meist ca. 3–9 m, bei 425 ausnahmsweise rund 13 m. Es handelt sich also durchwegs um relativ untiefe Grundwasserspiegel. Geringe Flurabstände von nur 2–3 m finden sich gleichermassen bei den Pegelstellen der Kategorie II wie V. Eine einwandfreie Beziehung zwischen Empfindlichkeit und Flurabstand ist nicht zu erkennen.

b) *Tiefe des Pegelrohres*

Die Pegelrohre, die zu verschiedenen Zeiten versetzt wurden, weisen sehr unterschiedliche Tiefen auf. Die Rohre 201–210 sind 12 m lang und reichen meist nicht bis an die Kiesuntergrenze; die Rohre 33, 425 und 433 im Limmattal und 3, 4 und 8 im Furttal sind über 30 m tief und reichen stets bis unter die Kiesuntergrenze. Eine grosse Kiesmächtigkeit verlangte auch ein langes Pegelrohr. Aber wie beim Flurabstand ist auch bei der Pegelrohrlänge keine Beziehung zur Empfindlichkeit festzustellen.

c) *Grundwassermächtigkeit*

Die in Kolonne 3 der Tabelle 1 zusammengestellte Grundwassermächtigkeit zeigt eine eindeutige Beziehung mit der «Empfindlichkeit» resp. der Amplitude bei den verschiedenen Beben: Grosse Grundwassermächtigkeit fällt zusammen mit grosser Empfindlichkeit.

Auf Abb. 4 und 5 wurden die Amplituden ϑ in cm der beiden Beben Friaul I vom 6.5.76 und Friaul III vom 15.9.76 in Funktion der Grundwassermächtigkeit H in m dargestellt.

Bei den Pegelstellen der Kategorie I mit sehr grosser Empfindlichkeit beträgt die Grundwassermächtigkeit rund 20–33 m, in der Kategorie V mit fehlender Reaktion nur rund 3 m.

Erdbeben Friaul I vom 6.5.76 21°°

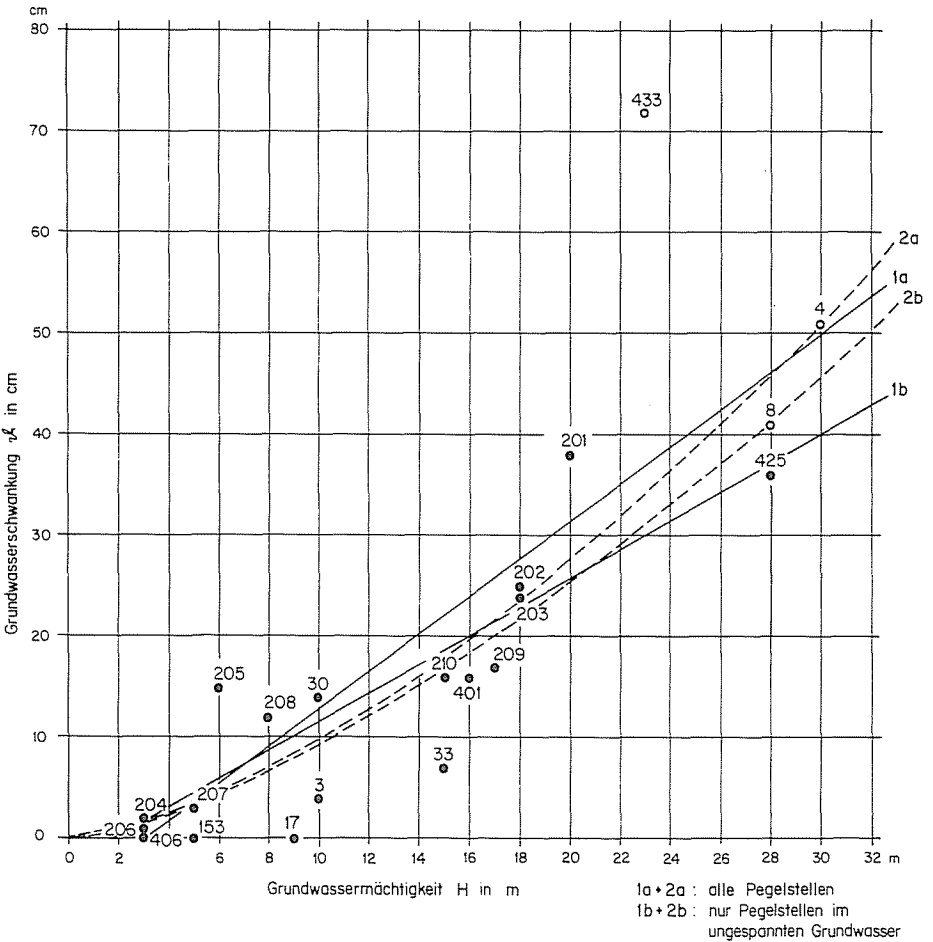


Abb. 4 Die Amplituden der Grundwasserschwankungen ϑ in cm in Funktion der Grundwassermächtigkeit H in m, mit zugehörigen Regressionsgeraden 1a und 1b und Regressionskurven 2a und 2b, für das Erdbeben Friaul I.

Der Grundwasserspiegel in unseren quartären Kiesen relativ grosser Durchlässigkeit ist demnach auf Erdbebenerstütterungen um so empfindlicher, je grösser die Grundwassersäule ist.

Mittels Regressionsrechnungen wurde versucht, für die auf Abb. 4 und 5 dargestellten Punktescharen gewisse Gesetzmässigkeiten zu erkennen.

Die Punktescharen wurden sowohl einer linearen als auch einer potenziellen Regression unterzogen. Bei der linearen Regression geht dabei die Regressionsgerade

Erdbeben Friaul III vom 15. 9. 76 10¹⁹

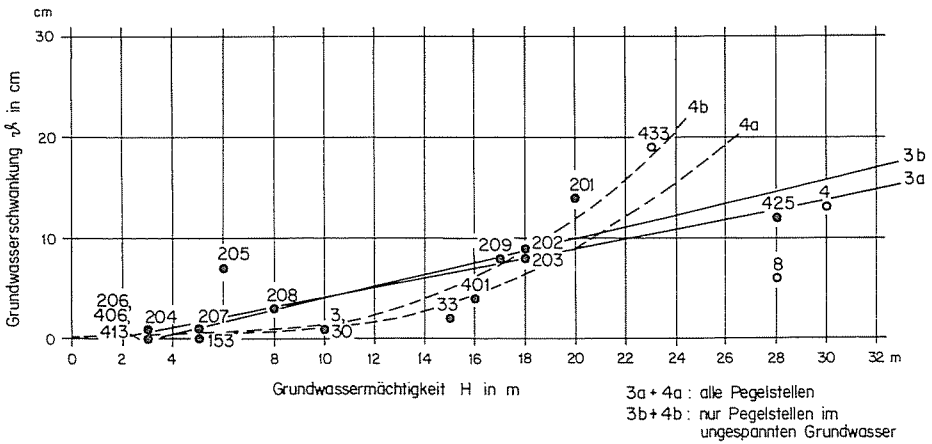


Abb. 5 Die Amplituden der Grundwasserschwan- kungen ϑ in cm in Funktion der Grundwasser- mächtigkeit H in m, mit zugehörigen Regressionsgeraden 3a und 3b und Regressionskurven 4a und 4b, für das Erdbeben Friaul III.

nicht durch den Nullpunkt; die Abweichung vom Nullpunkt auf der Abszisse kann als «Reizschwelle H_R » aufgefasst werden, sie beträgt 1,8–3,2 m. Bei der Potenzfunktion muss dagegen die Regressionskurve definitionsgemäss durch den Nullpunkt gehen; eine Reizschwelle kommt dabei nicht zum Ausdruck.

Die Regressionsrechnungen wurden zudem jedesmal mit und ohne die drei im subartesisch gespannten Grundwasser liegenden Punkte L433 und FU4 und 8 ge- trennt durchgeführt, um die Wirkung des gespannten Grundwassers als Parameter zu separieren.

Auf Tabelle 2 sind diese Resultate zahlenmässig, auf Abb. 4 und 5 graphisch dar- gestellt. Das in der Tabelle 2 aufgeführte «Bestimmtheitsmass» r^2 gibt die Güte der jeweiligen Regression an; je grösser r^2 , desto besser die Regression.

d) Vergleich zwischen ungespanntem und gespanntem Grundwasser

Von den 22 geprüften Pegelstellen liegen deren drei in gespanntem Grundwasser, nämlich 433, 4 und 8, die alle der Kategorie I mit der grössten Empfindlichkeit an- gehören. Alle übrigen Pegelstellen liegen in ungespanntem Grundwasser, wo sich der Wasserspiegel in durchlässigem Kies des Grundwasserleiters befindet, dessen Durch- lässigkeitskoeffizient k etwa 1–3 mm/sec beträgt.

Pegelstelle 433:

Bei 433 liegt über 22 m sandigem Kies hoher Durchlässigkeit auf Kote 395.6 m rund 3,6 m siltig-lehmiger Feinsand mit Grobsand und Feinkies geringer Durch- lässigkeit. Die Durchlässigkeitskoeffizienten betragen

Tabelle 2 Regressionsgeraden und -kurven der Amplitude der Grundwasserschwankungen in Funktion der Grundwassermächtigkeit.

 ϑ = Amplitude der Grundwasserschwankungen in cm

H = Grundwassermächtigkeit in m

 H_R = Reizschwelle in m r^2 = Bestimmtheitsmass

Beben Friaul I			
<i>Lineare Regression</i>			
Alle Pegelstellen	$\vartheta = -5.78 + 1.83 H$	$H_R = 3.2 \text{ m}$	$r^2 = 0.70$
Nur ungespannte Pegel	$\vartheta = -2.54 + 1.39 H$	$H_R = 1.8 \text{ m}$	$r^2 = 0.76$
<i>Potenzielle Regression</i>			
Alle Pegelstellen	$\vartheta = 0.29 \cdot H^{1.52}$		$r^2 = 0.84$
Nur ungespannte Pegel	$\vartheta = 0.33 \cdot H^{1.45}$		$r^2 = 0.80$
Beben Friaul III			
<i>Lineare Regression</i>			
Alle Pegelstellen	$\vartheta = -0.87 + 0.48 H$	$H_R = 1.8 \text{ m}$	$r^2 = 0.59$
Nur ungespannte Pegel	$\vartheta = -1.90 + 0.59 H$	$H_R = 3.2 \text{ m}$	$r^2 = 0.64$
<i>Potenzielle Regression</i>			
Alle Pegelstellen	$\vartheta = 0.0019 \cdot H^{2.82}$		$r^2 = 0.60$
Nur ungespannte Pegel	$\vartheta = 0.0012 \cdot H^{3.06}$		$r^2 = 0.58$

im lehmigen Feinsand $k = \text{ca. } 0,05 \text{ mm/sec}$ im sandigen Kies $k = \text{ca. } 2 \text{ mm/sec}$

Über diesem lehmigen Feinsand von 3,6 m Dicke folgt auf Kote 399.2 m nochmals durchlässiger Kies, doch ist in ihm das Pegelrohr nicht gelocht, sondern vollwandig. Das Druckniveau lag am 6.5.76 bei Kote 399.5 m, also rund 4 m über der Deckfläche der Schichtgrenze lehmiger Feinsand über Kies, entsprechend einer subartesischen Spannung von 4 m.

Pegelstellen 4 und 8:

Bei Nrn. 4 und 8 im oberen Furttal reichen die Rohre in das dort wohlbekannte «tiefere Grundwasserstockwerk», welches durch eine undurchlässige Schicht von lehmiger Grundmoräne abgedeckt und auf diese Weise vom oberen, ungespannten Stockwerk getrennt wird.

Bei Nr. 4 liegt die Deckfläche auf	Kote 398.30 m
das Druckniveau am 6.5.76 auf	Kote 427.40 m
das Grundwasser war damals subartesisch gespannt um	29,10 m

Bei Nr. 8 liegt die Deckfläche auf	Kote 416.30 m
das Druckniveau am 6.5.76 auf	Kote 427.44 m
die subartesische Spannung betrug	11,14 m

Wie aus Tabelle 1 und Fig. 4 und 5 zu ersehen ist, zeichnen sich die Pegelstellen im gespannten Grundwasser durch besonders hohe, eher überdurchschnittlich grosse Amplituden aus. Es darf daraus geschlossen werden, dass im gespannten Grundwasser die Empfindlichkeit auf Bebenerschütterungen etwas *vergrössert* wird, verglichen mit ungespanntem Grundwasser gleicher Mächtigkeit.

5. Charakteristik der registrierten Beben

In den Jahren 1976 bis 1978 wurden die oben genannten fünf Beben über unsere «Hydroseismographen» registriert. Es waren durchwegs grössere Fernbeben mit relativ langen Wellen, die sich offenbar in einer elastischen Deformation des Porengrundwasserleiters und dann *sehr verstärkt* in den Pegelrohren auswirkten.

Eine Nachprüfung der Ganglinien aller Schreibpegel auf Nahbeben, deren Charakteristika uns freundlicherweise vom Schweizerischen Erdbebendienst zur Verfügung gestellt wurden, verlief negativ; sie wurden offenbar von unseren «Hydroseismographen» *nicht* registriert.

Das von uns am stärksten registrierte Beben war jenes von Friaul am 6.5.76, 21.00 h, mit einer Magnitude im Epizentrum von 6.5 und einer Intensität in Zürich von IV, das mit den zweitgrössten Amplituden jenes von Friaul am 15.9.76, 10.19 h, mit einer Magnitude von 6.3 und einer Intensität in Zürich ebenfalls von IV.

Das Beben von Rumänien vom 4.3.77 mit $M = 7.7$ wurde im Grundwasser noch mittelstark registriert (maximale Amplitude 10 cm), obwohl in Zürich die Intensität bloss I betrug; andererseits wurde jenes von Süddeutschland vom 3.9.78 mit $M = 5.8$ im Grundwasser nur schwach registriert, obschon es in Zürich die Intensität V erreichte.

Das sehr schwere Beben von China am 27.7.76 mit $M = 8.0$, aber einer Intensität in Zürich von bloss I, wurde im Grundwasser nicht verspürt.

Die Amplituden im Grundwasser korrespondieren bei den drei Beben von Friaul einigermassen mit der in Zürich festgestellten Intensität, nicht aber bei den Beben Rumänien und Süddeutschland, wo sie sich gerade umgekehrt verhalten. Mit der Magnitude im Epizentrum korrespondieren sie für die Beben Friaul, Rumänien und Süddeutschland nicht allzu schlecht, nicht aber mit dem Beben von China 1976.

Dank

Meinen Mitarbeitern THEO BECK, Dr. THEO KEMPF und dipl. Ing. E. WALTER danke ich sehr für die wertvolle Mithilfe, die Reinzeichnung der Textfiguren und die mathematische Auswertung am Computer und ebenso Herrn Dr. N. PAVONI am Institut für Geophysik der ETH für überaus anregende Diskussionen und die Durchsicht des Manuskriptes.

Literaturverzeichnis

- BLANCHARD, F. G., und BYERLY, P. (1935): A study of a well gage as a seismograph. Seismol. Soc. America Bull. 25/4.
- LA ROCQUE, G. A. (1941): Fluctuations of water-level in wells in the Los Angeles Basin. Am. Geophys. Union Trans. 22d.
- MEINZER, O. E. (1942): Hydrology. Mc Graw Hill Book.
- MÜGGE, R. (1954): Das Grundwasser als geophysikaler Indikator. Zeitschrift für Geophysik 20/1. Würzburg.
- ROTHE, J. P. (1941): Les séismes alpins et les sources. Annales Inst. Physique Globe Strasbourg, 3/3.
- TODD, D. K. (1960): Ground Water Hydrology. John Wiley & Sons, New York.
- VORHIS, R. C. (1955): Interpretation of hydrologic data resulting from earthquakes. Geol. Rundschau (1955) Bd. 43/1.