

THE INFLUENCE OF HYDROGEOLOGY ON SITE-EFFECTS AT EARTHQUAKES IN BUCHAREST

D. Hannich¹, H. Hoetzi¹, G.-P. Merkler¹, M. Bretotean², A. Danchiv³, F. Zamfirescu³,
Viorica Ciugudean⁴

¹ University of Karlsruhe, Dept. of Applied Geology, Kaiserstr. 12, D-76128 Karlsruhe, Germany, hannich@agk.uka.de

² National Institute for Meteorology and Hydrology, Sos. Bucuresti-Ploiesti 97, sector 1, RO-71552 Bucharest, Romania, bret@meteo.inmh.ro

³ University of Bucharest, Fac. of Geology and Geophysics, Traian-Vuia-str. 6, sector 2, RO-70139 Bucharest, Romania, danchiv@ns.gg.unibuc.ro

⁴ S.C. METROUL S.A., Dept. of Hydrogeol. and Eng. Geol., Gutenberg-Str. 3-bis, sector 5, RO-70626 Bucharest, Romania, metroul@metroul.ro

Abstract: The site effects of strong earthquakes, even at great and relative equal hypocentral distances, may be most variable at a given site. The different resulting damages depend obviously on the local geologic and hydrogeologic conditions in the shallow underground. These determine the amplitude, the frequency content and the duration of the strong motion at a site.

The influence of hydrogeology on seismic site effects in Bucharest is studied here as a new contribution in this domain under different aspects. An integrative analysis of various properties and parameters of the aquifers will be done and correlated with observed site effects. Groundwater level variations and their direct influence on the liquefaction potential of shallow sandy layers will be studied. Experimental observations on the groundwater pore pressure during earthquakes will be executed, to verify results obtained under laboratory conditions. The variation of the shear wave velocity of sandy layers in dry and water saturated state will be also studied, to establish their influence on specific response spectra.

Keywords: site effects, hydrogeology, hypocenter, earthquake, aquifer, liquefaction, seismic

EINFLÜSSE DER HYDROGEOLOGISCHEN GEGEBENHEITEN AUF STANDORTEFFEKTE BEI ERDBEBEN IN BUKAREST

Zusammenfassung: Die Standorteffekte sind bei Starkbeben, auch bei großen und relativ gleichbleibenden Hypozentralentfernungen, sehr verschieden für einen gegebenen Standort. Die resultierenden, oft unterschiedlichen Schadensfolgen sind eindeutig von den lokalen geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten des Untergrundes abhängig. Diese bestimmen die Amplitude, den Frequenzinhalt und die Dauer der Bodenbewegung an einem Standort.

Der Einfluss der Hydrogeologie auf das seismische Verhalten des Untergrundes von Bukarest wird hier, als ein neuer, origineller Beitrag auf diesem Gebiet, aus verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet. Es wird eine integrative Analyse der Eigenschaften und Parameter der Aquifere in Zusammenhang mit den beobachteten seismischen Standorteffekten durchgeführt. Grundwasserstandsschwankungen und deren Einfluss auf das Verflüssigungspotential oberflächennaher sandiger Schichten sollen ausgewertet werden. Experimentelle in-situ Messungen des Porenwasserdruckes während Erdbeben verschiedener Magnituden werden durchgeführt, um Ergebnisse aus Laboruntersuchungen zu verifizieren. Änderungen der Scherwellengeschwindigkeit von Sandschichten in trockenem und gesättigtem Zustand sollen ebenfalls untersucht werden und somit deren Einfluss auf lokale Antwortspektren überprüft werden.

Schlüsselworte: Standorteffekte, Hydrogeologie, Hypozentralentfernung, Erdbeben, Aquifer, Verflüssigungspotential, seismisch, Magnitude

1. Einleitung

Die Standorteffekte sind bei Starkbeben, auch bei großen und relativ gleichbleibenden Hypozentralentfernungen für einen gegebenen Standort sehr verschieden. Dieses trifft besonders für den Standort der Stadt Bukarest im Falle der *Vrancea*-Beben zu. Da der epizentrale Bereich der *Vrancea*-Beben auf eine relativ kleine Fläche von cca. 40 x 80 km reduziert ist und die Beben konstant in einem Tiefenbereich von 70-180 km auftreten, kann für Bukarest von relativ konstanten hypozentralen sowie epizentralen Entfernungen der *Vrancea*-Beben ausgegangen werden (Wirth, 2001). Die resultierenden, oft unterschiedlichen Schadensfolgen in Bukarest müssen demzufolge eindeutig von den lokalen geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten des Untergrundes abhängig sein. Das heißt, dass im wesentlichen die Amplitude, der Frequenzinhalt und die Dauer der Bodenbewegung an einem Standort durch die lokalen geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten beeinflusst werden und somit die seismischen Standorteffekte erklären.

2. Geologische und hydrogeologische Gegebenheiten im Raum Bukarest

Bukarest liegt in der Rumänischen Tiefebene, die aus geologischer Sicht der Walachischen Senke angehört. Diese bildet ein Vorlandbecken des alpinen Karpaten-Orogens, das durch Heraushebung der Karpaten und durch Absenkung des südlichen Vorlands im mittleren Tertiär entstanden ist (Liteanu, 1951, Mandrescu & Radulian, 1998). Der Abtragungsschutt des sich im Norden heraushebenden Karpatenbogens führte zu einer molasseartigen Auffüllung des Beckens. Allein die Sedimente des Miozäns und Pliozäns erreichen Mächtigkeiten von über 1.000 m. Darüber folgen wechselnde stärker sandig-kiesige Sedimente des Pleistozäns, die sich für die hydraulische Trennung einzelner besser durchlässiger Schichten wichtig mit schluffig-tonigen Akkumulationen abwechseln. Den Abschluss bilden, vielfach die Geländeoberfläche einnehmend, die spätglazialen Lösssedimente. Letztere erreichen Mächtigkeiten von 3-16 m.

Aus hydrogeologischer Sicht muss für das seismische Verhalten des Untergrundes von Bukarest vor allem die quartäre alluviale Abfolge von Bedeutung sein, von welchen die drei wichtigsten zum Teil rinnenförmig ausgebildeten Sand-Kies-Schichten die drei Hauptaquifere im Untergrund von Bukarest bilden (vgl. Abb. 1): der „*Colentina*“ Aquifer (ab ca. 5 m Tiefe), der „*Mostitea*“ Aquifer (ab ca. 15 m Tiefe) und der „*Fratesti*“ Aquifer, (ab ca. 150 m Tiefe).

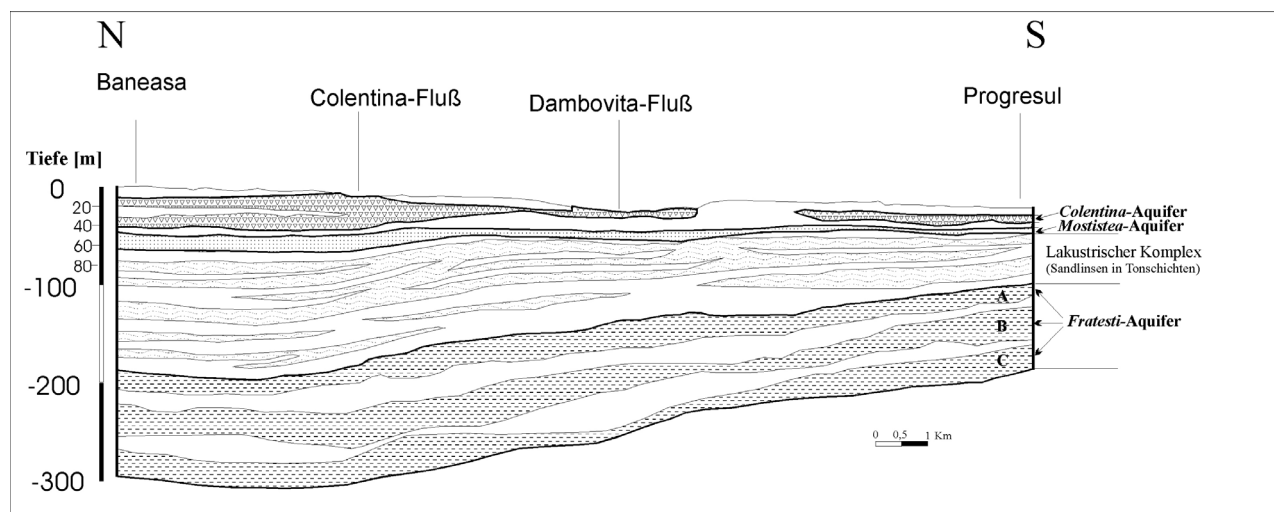


Abb. 1: Geologischer Vertikalschnitt im Raum Bukarest, mit der Darstellung der Hauptaquifere, die der quartären Schichtfolge angehören (nach Sandi et al., 1982)

Der *Fratesti*-Aquifer stellt den mächtigsten Aquifer in der quartären Schichtfolge im Untergrund von Bukarest dar. Durch seine große Mächtigkeit sowie durch seine regionale Kontinuität im gesamten südlichen Raum Rumäniens, wie auch im Untergrund von Bukarest, spielt dieser Aquifer insbesondere als Reflexions- bzw. Refraktionsgrenze in der Bebenwellenausbreitung eine bedeutende Rolle.

Der zweit-tiefste Aquifer, der *Mostistea*-Aquifer liegt quasi-horizontal, weist aber zahlreiche Unterbrechungen (Sand-Linsen) und Mächtigkeits-Variationen auf (vgl. Abb. 2). Durch seine oberflächennahe Lage, die Korngrößenverteilung (Mittel- bis Feinsand) sowie den Wassergehalt, müsste diesem Aquifer standortbedingt ein bedeutendes Verflüssigungs- und Drainagepotential bei Starkbeben zugewiesen werden.

Der oberflächennahe *Colentina*-Aquifer weist ebenfalls große Mächtigkeitsunterschiede (2-20 m) auf und ist nicht im gesamten Untergrund von Bukarest anzutreffen (vgl. Abb. 2). Durch seine Tiefenlage in unmittelbarer Nähe der Erdoberfläche, und durch die Ausbildung eines freien Grundwasserspiegels (vgl. Abb. 2) kommt diesem Aquifer ebenfalls eine wichtige Rolle aus Sicht der Verflüssigungs- und Drainagemöglichkeit bei Starkbeben zu. Die lateralen Inhomogenitäten dieses Grundwasserleiters sowie die an ihn gebundenen saisonalen als auch anthropogen bedingten Grundwasserspiegelschwankungen (durch Grundwasserentnahmen) sprechen für ein erhöhtes Verflüssigungs- und Drainagepotential, das untersucht werden muss.

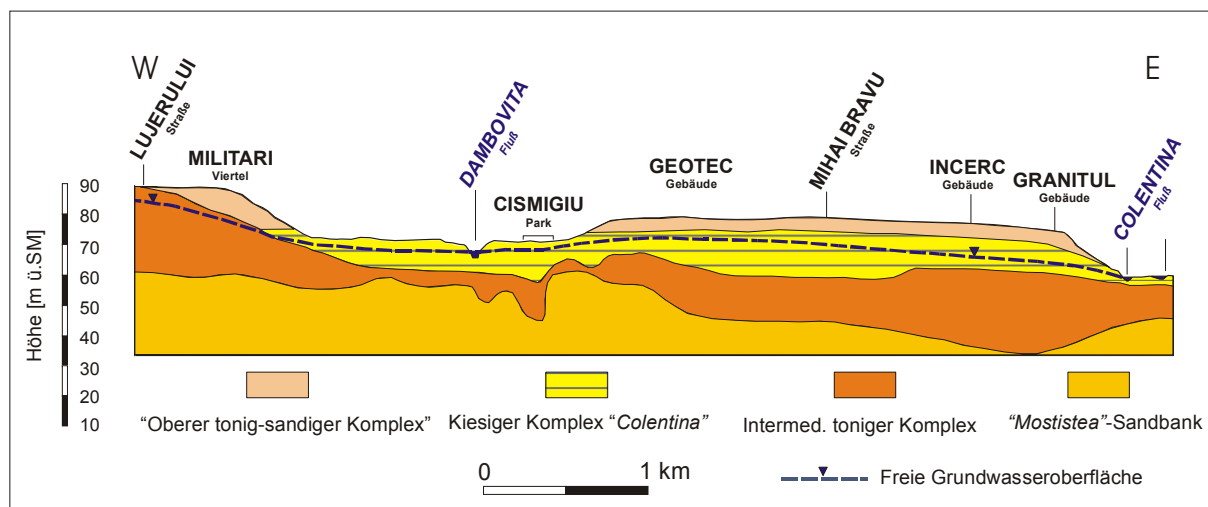


Abb. 2. Die oberflächennahen Schichten „Colentina“ und „Mostistea“ sowie die freie Grundwasseroberfläche im Raum Bukarest (nach Ciugudean et al., 1999)

3. Die Seismizität im Bukarester Raum

Es ist bekannt, dass Bukarest, durch seine Nähe zu der epizentralen Region der *Vrancea*-Beben, in einem der Erdbebengefährdetesten Gebieten Europas liegt. Beben mit Magnituden bis 7.5 konzentrieren sich in der sogenannten *Vrancea*-Region, die unmittelbar außerhalb des Karpatenbogens liegt. Das stärkste bis jetzt bekannte *Vrancea*-Beben war im Jahr 1940 und hatte die Magnitude 7,7. Jedoch das Beben von 1977 war bislang das Beben mit den größten Opfern und Schäden. Eine Statistik (Radu, 1974, 1991) zeigt die Häufigkeit mit welcher *Vrancea*-Beben auftreten können:

- Beben mit Magnituden $M_w \geq 5,0$: 1 - 2 Mal im Jahr
- Beben mit Magnituden $M_w \geq 6,5$: 1 jedes 10^{te} Jahr
- Beben mit Magnituden $M_w \geq 7,0$: 1 jedes 25^{te} Jahr
- Beben mit Magnituden $M_w \geq 7,4$: 1 jedes 50^{te} Jahr

Diese relativ hohe Frequenz von möglichen Starkbeben begründet das Interesse zur Ermittlung der Einflussfaktoren der unterschiedlichen Standorteffekte in Bukarest, um somit zur Schadensbegrenzung beizutragen.

4. Einfluss der Hydrogeologie auf Standorteffekte

Oft schwer zu erklärende Standorteffekte bei Starkbeben wurden in der Literatur auf örtliche spezielle hydrogeologische Bedingungen zurückgeführt, ohne aber eindeutige Zusammenhänge zu definieren. Aus Literaturangaben ist bekannt, dass z.B. in Japan die hydrogeologischen Bedingungen in Zusammenhang mit Sandverflüssigung gebracht werden; in Russland wird die Lage des Grundwasserspiegels in der Methode von Medvedev (1965, 1977) zur Berechnung von MSK-Intensitäten berücksichtigt; in den USA und Kanada

wird die Hydrogeologie wegen dem tiefliegenden Grundwasserspiegel und dem anstehenden Festgestein wenig oder nicht in Betracht gezogen.

Um den Einfluss der hydrogeologischen Gegebenheiten im Untergrund von Bukarest auf die erdbebenbedingten Standorteffekte beobachten zu können, sollen diese im Rahmen eines Sonderforschungsvorhabens der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter diversen komplexen Aspekten untersucht werden:

- die relevanten hydrogeologischen Daten aller quartären Aquifere aus dem Raum Bukarest sollen erfasst und georeferenziert über ein GIS systematisiert werden.
- eine Überprüfung des Verflüssigungspotentials der oberflächennahen sandig-kiesigen Bodenschichten in Bukarest (*Colentina* und *Mostistea*) soll durchgeführt werden, unter besonderer Berücksichtigung der Grundwasserspiegel-Schwankungen bzw. der unterschiedlichen Wassersättigung. Die Wassersättigung der Sandschichten ist eine der Bedingungen, dass Bodenverflüssigungen auftreten können (Ishihara, 1993, Kramer, 1996, Zaharescu et al., 1977)
- Die Änderung der Scherwellengeschwindigkeit für Sande und Kiese in trockenem bzw. gesättigten Zustand soll untersucht werden, die dann unterschiedliche Transferfunktionen bzw. seismische Antwortspektren der Bodenschichten zur Folge haben können.
- im Rahmen des Sonderforschungsvorhabens sollen die aktuellen Höhen des freien Grundwasserspiegels sowie deren saisonale und anthropogen bedingten Schwankungen in Bukarest über ein GIS erfasst und in ein 2D-Grundwassermodell für den oberen Grundwasserleiter, den *Colentina*-Aquifer eingebunden werden. Über das erstellte Modell soll es möglich sein die Grundwasserstände für unterschiedliche hydrologische Zustände und den davon abhängigen Wassergehalt in den oberflächennahen Schichten flächenhaft und zu einem bestimmten Zeitpunkt vorauszubestimmen, um so das Schadensrisiko bei Starkbeben durch Verflüssigungsphänomene sowie durch unterschiedlich verstärkte Scherwellengeschwindigkeiten richtig einschätzen zu können.

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurden unter anderem folgende erste Schritte unternommen:

- ✓ relevante hydrogeologische Parameter der drei Hauptaquifere wurden aus bereits durchgeführten Pumpversuchen bzw. anderen hydrogeologischen Experimenten archiviert, wie Transmissivitäten, Durchlässigkeitswerte, Mächtigkeiten, Speicherkoeffizient u.a. Zugleich wurden neue Pumpversuche durchgeführt.
- ✓ erste Daten über Langzeitbeobachtungen der Grundwasserspiegelschwankungen im Raum Bukarest wurden erhoben (vgl. Abb. 3). Langzeitdaten aus weiteren repräsentativen Piezometerbohrungen im Bukarester Raum werden ermöglichen allgemeingültige saisonale Schwankungen des freien Grundwasserspiegels zu ermitteln. Anthropogene Einflüsse werden ebenfalls verfolgt. Als Neuheit wurden durch Registrierungen im Rahmen eines NATO-Projektes saisonal bedingte Schwankungen des Grundwasserspiegels mit Amplituden bis zu 2 m des *Fratesti*-Aquifers festgestellt (Hötzl et al., 2002)

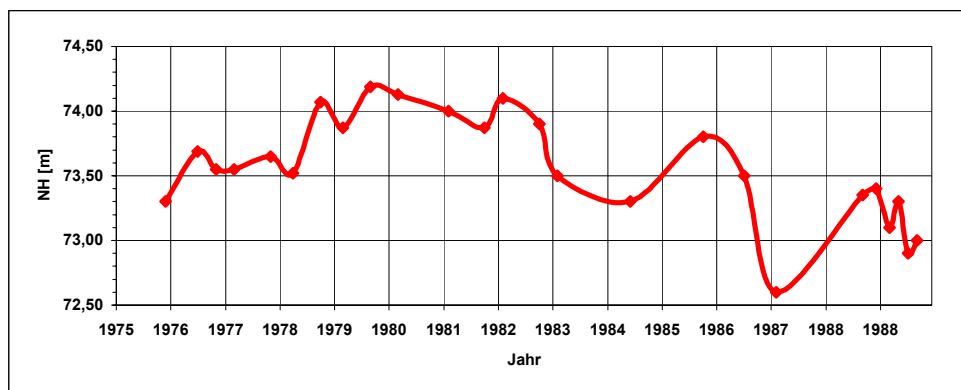


Abb. 3. Schwankungen des Grundwasserspiegels in der Piezometerbohrung Piata Rosetti, in der Zeitperiode 1975-1989 (Daten von METROUL S.A.)

- ✓ für die Bestimmung von charakteristischen Scherwellengeschwindigkeiten für verschiedene Bodenschichten und insbesondere zur Einschätzung deren Änderung für trockene oder gesättigte Sandschichten, wurden rezent in 7 Bohrungen im Raum Bukarest VSP-Messungen (*Vertical Seismic Profiling*) durchgeführt, deren Ergebnisse zu diesem Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung stehen. Im Moment stehen derartige Werte aus einer einzigen Bohrung auf dem INCERC-Gelände zur Verfügung (vgl. Abb. 4). Berechnete Transferfunktionen für das geologische Bohrprofil von INCERC, für trockene und gesättigte *Colentina*-Kiessande (v_s -Werte aus Literaturangaben, vgl. Kramer, 1996) zeigen deutlich unterschiedliche Amplituden (Abb. 5).
- ✓ die Vorbereitung der Eingangsdaten für ein 2D-Grundwassermodell sind im Anfangsstadium und werden fortgeführt.

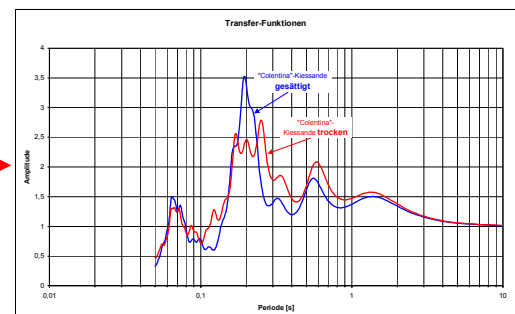
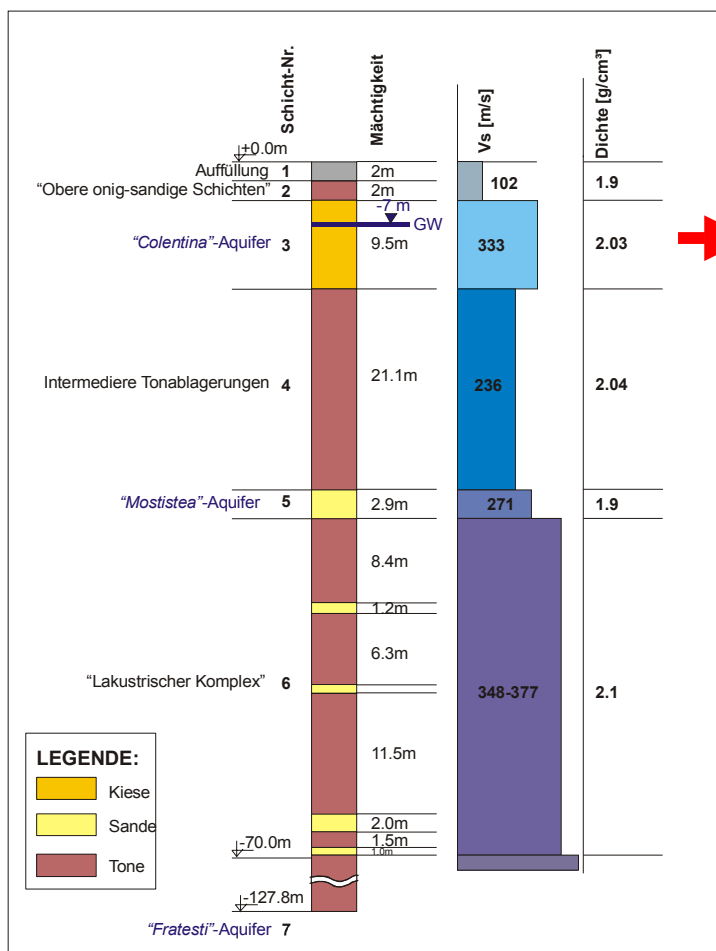


Abb. 5. Berechnete Transferfunktionen für trockene bzw. gesättigte „Colentina“-Kiessande

Abb. 4. Geologisches Profil der INCERC-Bohrung, mit charakteristischen Scherwellengeschwindigkeiten (v_s) sowie Dichten. (nach Lungu et al., 1999)

5. Schlussfolgerungen

Dieses neuartige Thema der Beeinflussung der Standorteffekte durch hydrogeologische Gegebenheiten bei Erdbeben soll im Rahmen dieses Sonderforschungsprojektes für die spezifische Lage von Bukarest untersucht werden. Der Forschungszeitraum soll sich in einer ersten Etappe bis Ende des Jahres 2004 erstrecken. Dann sollten die ersten konkreten Ergebnisse vorliegen.

6. References

- Hötzl, H., Merkler, G.-P., Hannich, D., Ciugudean, Viorica, Danchiv, A. (2002). Influence of Groundwater Oscillations due to Earthquakes on Underground/Overground Constructions. CLG-Scientific Report, NATO-Brussels.
- Ishihara, K. (1993). Liquefaction and flow failure during earthquakes, *Geotechnique* 43, No.3
- Kramer, St. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. University of Washington, Prentice-Hall Int. Series
- Liteanu, G. (1951). Geology of the city of Bucharest, Technical studies, Series E, Hydrogeology No. 1 (in Rumänischer Sprache)
- Lungu, D., Aldea, A., Moldoveanu, T., Ciugudean, V. & Stefanica, M. (1998). Surface geology and dynamical properties of soil layers in Bucharest . In: Vrancea Earthquakes, Wenzel, F., Lungu, D. & Novak, O. (eds.), Kluwer Academic Publishers
- Mandrescau, N. & Radulian, M. (1998). Seismic microzoning of Bucharest (Romania): a critical review. In: Vrancea Earthquakes, Wenzel, F., Lungu, D. & Novak, O. (eds.), Kluwer Academic Publishers
- Medvedev, S. V. (1965). *Engineering Seismology*, Moscow-1962, jerusalim-1965
- Medvedev, S. V. (1977). *Seismic Zoning*, Nauka, Moscow (in Russian)
- Radu, C. 1974: Contribution à la étude de la seismicité de la Roumanie et comparaison avec la seismicité de sud-est de la France. PhD-thesis, Université de Strasbourg, 404p
- Radu, C. et al. (1977). Fenomene geologice asociate cutremurului din 4 martie 1977 („Geologische Phänomene in Verbindung mit dem Erdbeben vom 4. März 1977“, in Rumänischer Sprache). In: CFPS, Bukarest, p. 409-422
- Radu, C. & Polonic, Gabriela (1982). Seismicitatea teritoriului Romaniei cu referire speciala la regiunea Vrancea („Die Seismizität des Rumänischen Territoriums, mit besonderem Hinblick auf die Vrancea Region“, in Rumänischer Sprache). In: Balan, S, Crotescu, V. and Cornea, I. (Editors), Editura Academiei Bucuresti, p. 75-136
- Radu C., 1991: Strong earthquakes occurred on the Romanian territory in the period 1901-1990, *Vitralii*, 3, p 12-13 (in Romanian)
- Sandi, H. & Perlea, V. (1982). Studii ingineresti asupra miscarii seismice a terenului, in *Cutremurul de pamant din Romania de la 4 martie 1977*. In Balan, S, Crotescu, V. and Cornea, I. (Editors), Editura Academiei Bucuresti, p. 137-221
- Wirth, W. (2001). Das multidisziplinäre seismische Testgelände INCERC als Kalibrierungsstandort für Standorteffekte in Bukarest. (Draft Report)
- Zaharescu, E., Perlea, V., Perlea, M. (1977). Lichefierea nisipurilor in timpul cutremurului de la 4 martie 1977 (Sandverflüssigungen während dem Erdbeben vom 4. März 1977, in Rumänischer Sprache), *Hidrotehnica*, 22, 5, 123-126