

ROZHLEDY

LUDVÍK LOYDA

PŘEHRADY, ZEMĚTŘESENÍ A ÚDOLNÍ GENEZE

L. Loyda: *Dams, earthquakes and the valley genesis*. — Sborník ČSGS 85:4:297—306. — The author has collected much information obtained through exact geodetic measurements and geophysical methods on tectonic movements taking place in proximity of dams in different parts of the world. He brings examples of correlation between the origin of seismism and the positive as well as negative movements of blocks along fault-slopes at a change of water level in dams. In his opinion these phenomena are the best proof of the block faulting, and consequently of the tectonic origin of the valleys believed so far to be of purely erosional origin.

Říční údolí jsou už po několik generací považována za erozní. V poslední době se však objevilo více exaktně získaných a tedy i pádných důkazů, které této erozní představě zcela odporují. Ukázalo se totiž, že při napouštění údolních přehrad dochází k pohybům nejen dna, ale i svahů údolí, které se samozřejmě přenášejí i na hráz přehrad. Teorie a praxe se tedy dostaly do rozporu — na jedné straně stojí atektonický (erozní) výklad vzniku říčních údolí a na druhé straně přesně změřené či jinak zjištěné tektonické pohyby, probíhající právě v těchto „erozních“ údolích.

Možnost oddálení řešení tohoto zásadního konfliktu se objevila v aplikaci domněnky o isostasi. Podle této představy váha vody v údolní nádrži vyvolává elastické prohýbání údolního dna a tím i pohyb jeho svahů a nejbližšího okolí. Toio prohýbání je teoreticky možné i bez přítomnosti zlomů; takže erozní výklad mohl zůstat zachován.

Tektonické pohyby v oblasti údolních přehrad nejsou vůbec zjevem ojedinělým — např. Götz (1969) upozorňuje, že poklesy zemského povrchu probíhají u všech údolních přehrad a dosahují hodnoty několika milimetrů za rok. U elektrárny Schornstein dosáhly od r. 1964 do 1968 téměř 15 mm. U nás byl isostatický výklad aplikován při vysvětlování poklesů zjištěných v oblasti vodní nádrže Orlík. Pohyby zde byly zaznamenány nejen opakovaným nivelačním měřením v okolí nádrže, ale i sledováním stability podolského mostu, jehož konstrukce vykazovala stále změny (Kruis 1963).

Opakovaná měření výšková i délková byla prováděna na přehradě „Daniel Johnson“ v provincii Quebec v Kanadě (Moreau aj. 1972). Kolísání výšek bylo zjištěno v koruně hráze i v údolí — v období 1969–71 poklesl dokonce pravý břeh o 2,5 mm více než břeh levý. Kromě toho zde ovšem došlo i k pohybům ho

rizontálním, které — i když nebyly velké (1,7 mm v období 1965—1971) — probíhaly ve směru podélné i příčné osy údolí. Zde už isostatické prohýbání sotva může stačit k vysvětlení tak různosměrných pohybů. Podobné horizontální posuny byly zjištěny i u nás — např. u hráze vodní nádrže Ružín na Hornádu. Protože však postupem doby došlo k jejich téměř úplnému uklidnění (Staněk 1972), zdá se, že jde spíše o postupné usazování tělesa hráze a ne jen o důsledek tektonického pohybu.

Problém pohybů v oblasti údolních přehrad představuje o isostatickém prohýbání zřejmě nevyřešila, i když se ukázalo, že intenzita pohybů je přímo závislá na napouštění nádrže a na kolísání vodní hladiny. Např. Ziegler (1972) zjistil, že na malé přehradě Dhünnstalsperre, vybudované pro zásobování měst Remscheid a Solingen v letech 1960—1962, dosáhlo sedání hráze ještě před naplněním nádrže téměř 20 cm a později ještě několik dalších centimetrů. Po deseti letech zde však působí už jen kolísání vodní hladiny, které vyvolává pohyby hráze o amplitudě až 5 mm.

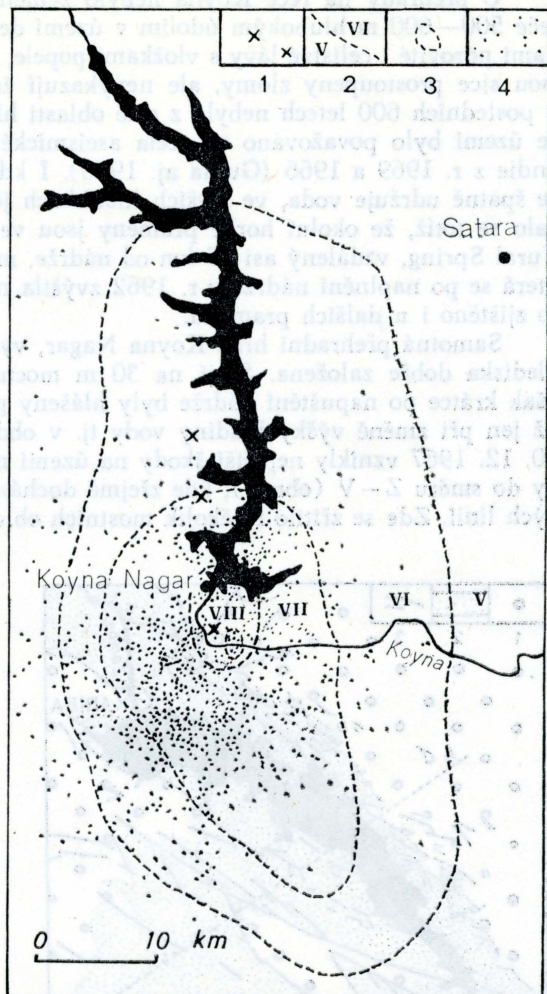
Podobnou zkušenost získal v poslední době i Miskolczy (1977), který objevil pohyb dna řeky Tisy opakovaným nivelačním měřením na jednotlivých mostních pilířích. Pohyb těchto pilířů nebyl stejný a kolísal od $-1,0$ do $+7,5$ mm v průběhu roku.

Princip isostasy zřejmě funguje jen tehdy, jestliže nejsou prováděna žádná přesná měření. Hodí se tedy pouze pro úvahy a nepodložené výklady. Ani tyto úvahy však nemohou být příliš promyšleny — lze totiž těžko věřit, že zvýšení vodní hladiny v řece může způsobit prohnutí zemské kůry, mocné zhruba 35 km. Ani u vodních nádrží, kde je výška vodního sloupce 100 i více metrů, nelze ve váze této vody vidět příčinu prohýbání kůry. To dokazují i jednoduché výpočty. Původní váha kry tvořící dno údolí by se totiž při napuštění nádrže např. do výšky 100 m zvýšila zhruba o jednu tisícinu, což nemůže stačit k vyvolání isostatického poklesu údolního dna. Jestliže však zesílení intensity pohybů zemského povrchu kolísá v souladu s měnicím se objemem vody v nádrži nebo v řece, pak z této časové souvislosti už sice lze usuzovat na nějakou souvislost příčinnou, ale zřejmě ne tak přímou a jednoduchou jakou nabízí aplikace isostatického prohýbání.

Při nedostatku jakýchkoli přesných výchozích údajů je ovšem nesnadné objevit hlubší spojitosti přírodních dějů i vyslovit domněnku, která by byla úplně správná. K tomu by muselo dojít pouhou náhodou. V poslední době provedena opakovaná nivelační měření přesvědčivě ukázala, že kry údolního dna i svahů se pohybují nestejnou rychlostí, a to i bez zvýšení vodní zátěže (Loyda 1976). Přesto však výsledky prací geodetů a geofyziků zůstávají pro teorii údolní geneze v podstatě nevyužity. Geodeti a geofyzikové tyto problémy sami neřeší a naopak geologové a geomorfologové zase neprovádějí přesná měření a ani se v tomto případě o ně příliš nezajímají. Tato vzájemná izolovanost velmi blízkých vědních disciplín je zřejmě vědě jen na škodu. Přesto však výsledky geodetických měření — ať už jsou či nejsou známy a využity v geologických vědách — uvádějí v naprostou pochybnost všechny dosavadní výklady o vzniku údolí.

Ověření správnosti starého Peschelova názoru na tektonický původ údolí však dnes přichází zcela neočekávaně i z jiné strany, a sice z oblasti seismiky. Už v r. 1945 D. S. Carder jako první poukázal na zajímavou souvislost vzniku zemětřesení s napouštěním údolní nádrže vodou. Od této doby byl tento jev pozorován už na více místech. Některé seismické otřesy byly přitom zvlášť silné a dosáhly intenzity VII—VIII a $M = 6$.

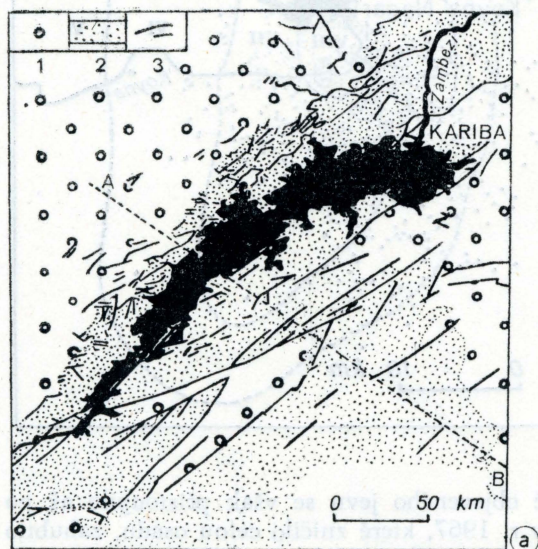
1. Seismicita oblasti vodní nádrže na řece Koyna od r. 1967 do konce r. 1971 (Gupta aj. 1976). Nejvíce otřesů a největší škody vznikly mezi ohybem řeky a hrází Koyna Nagar. 1. — epicentra otřesů hlavního zemětřesení 10. 12. 1967, 2 — intenzita otřesů hlavního zemětřesení, 3 — max. intenzita otřesů v zóně VIII, 4 — epicentra otřesů od 10. 12. 67 do 31. 12. 1971.



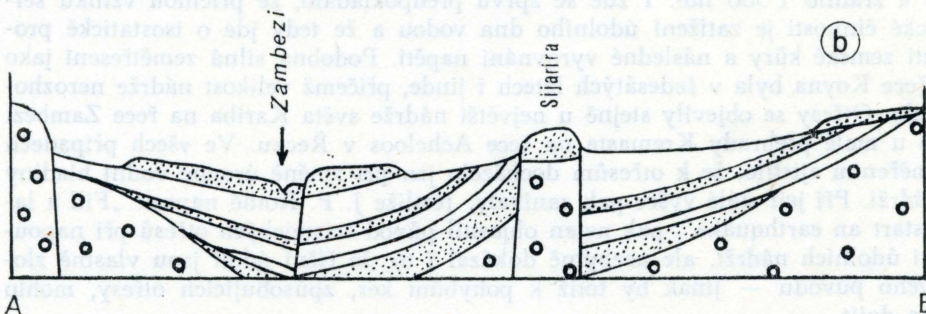
K výzkumu příčin tohoto nově objeveného jevu se však přistoupilo až po zemětřesení na řece Koyna v Indii v r. 1967, které zničilo celou osadu, zahubilo 200 a zranilo 1 500 lidí. I zde se zprvu předpokládalo, že příčinou vzniku seismické činnosti je zatížení údolního dna vodou a že tedy jde o isostatické prohnutí zemské kůry a následné vyrovnání napětí. Podobná silná zemětřesení jako na řece Koyna byla v šedesátých letech i jinde, přičemž velikost nádrže nerozhodovala. Otřesy se objevily stejně u největší nádrže světa Kariba na řece Zambezi jako u malé přehrady Kremasta na řece Acheloos v Řecku. Ve všech případech se měřením zjistilo, že k otřesům docházelo jen při změně úrovně vodní hladiny v nádrži. Při její stále výšce pak zanikaly. Jestliže J. P. Rothé napsal: „Fill a lake, start an earthquake“, pak nejen objasnil původ seismických otřesů při napouštění údolních nádrží, ale nezbytně dokázal i to, že říční údolí jsou vlastně zlomového původu — jinak by totiž k pohybům ker, způsobujících otřesy, mohlo sotva dojít.

U přehrady na řece Koyna nebylo zemětřesení vůbec očekáváno. Řeka zde teče 500–600 m hlubokým údolím v území dekkanských trappů, tvořených vrstvami pórovité i celistvé lávy s vložkami popele, jílu a jezerních sedimentů. Trappy jsou sice prostoupeny zlomy, ale nevykazují žádnou tektonickou aktivitu. Navíc v posledních 600 letech nebylo z celé oblasti hlášeno ani jediné zemětřesení, takže území bylo považováno za zcela aseismické. To dosvědčují i seismické mapy Indie z r. 1969 a 1966 (Gupta aj. 1976). I když v povrchových vrstvách trappů se špatně udržuje voda, ve větších hloubkách její cirkulace zřejmě existuje. Ukázalo se totiž, že okolní horké prameny jsou ve spojení s vodou nádrže — např. Tural Spring, vzdálený asi 25 km od nádrže, měl zprvu stálou kapacitu $1,3 \text{ l.s}^{-1}$, která se po naplnění nádrže v r. 1962 zvýšila na $10,5 \text{ l.s}^{-1}$. Podobné zvýšení bylo zjištěno i u dalších pramenů.

Samotná přehradní hráz Koyna Nagar, vysoká 103 m, je podle dosavadního hlediska dobře založena. Stojí na 30 m mocné vrstvě masivního čediče. Přesio však krátce po napuštění nádrže byly hlášeny první otřesy. Později se objevovaly už jen při změně výšky hladiny vody tj. v období dešťů. Při silném zemětřesení 10. 12. 1967 vznikly největší škody na území mezi přehradní hrází a ohybem řeky do směru Z–V (obr. 1), kde zřejmě dochází ke křížení významnějších zlomových linií. Zde se zřítilo i několik mostních oblouků a poškozena byla i přehradní

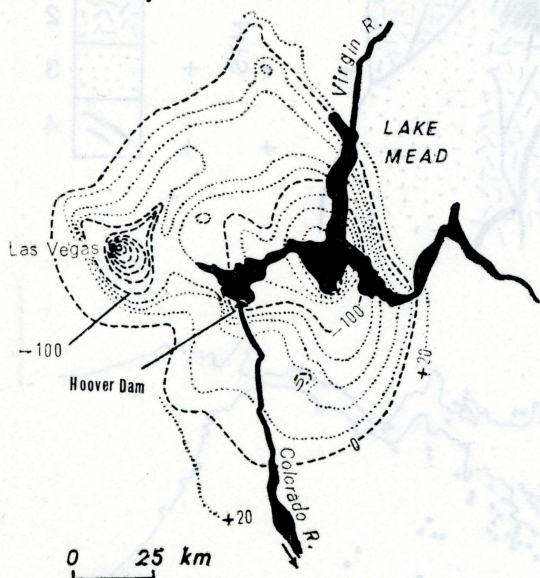


2. Riftové údolí řeky Zambezi s nádrží Kariba (a) a profil riftem (b). 1 — prekambrium, 2 — Karoo systém, 3 — hlavní zlomy.



hráz — a to nejen uprostřed, ale i při okrajích, kde se napojuje na horniny údolních svahů.

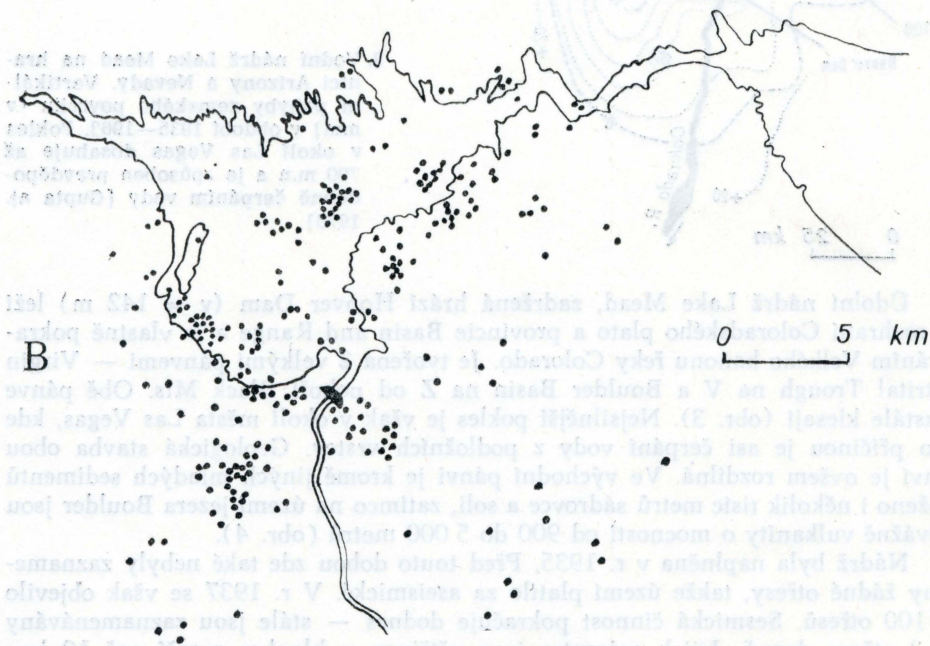
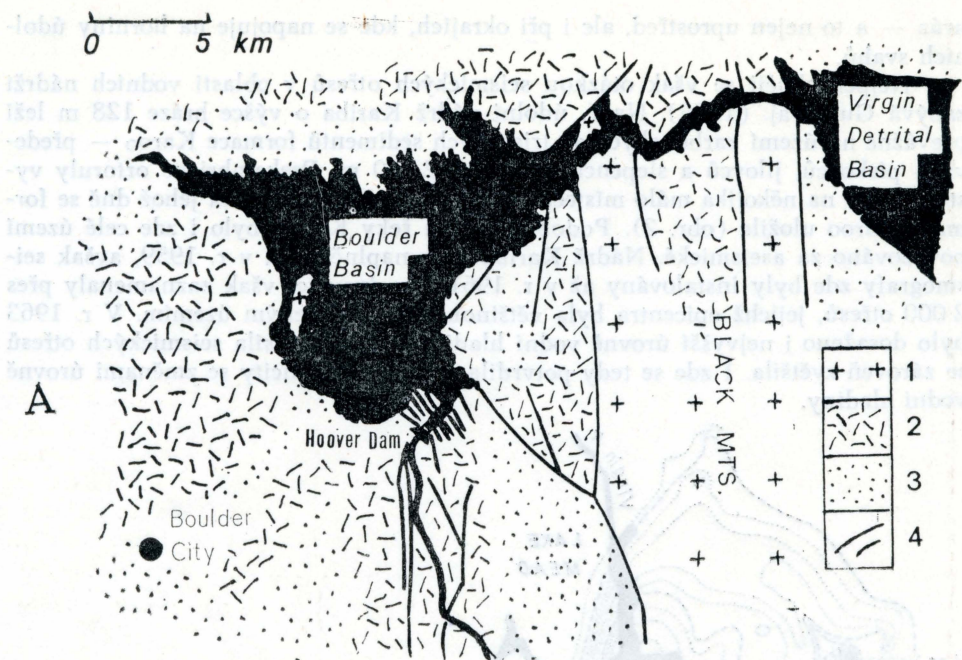
Nejpodrobněji se však otázkou seismických otřesů v oblasti vodních nádrží zabývá Gupta aj. (1976). Např. údolní nádrž Kariba o výšce hráze 128 m leží převážně na území karbonských až triasových sedimentů formace Karoo — především pískovců, jílovců a slepenců, mocných 2 800 m. Prekambrické ortoruly vystupují jen na několika málo místech. Tvoří však základ riftu, na jehož dně se formace Karoo uložila (obr. 2). Podobně jako u řeky Koyna bylo i zde celé území považováno za aseismické. Nádrž Kariba byla naplněna už v r. 1959, avšak seismografy zde byly instalovány až v r. 1961. Do dvou let však zaznamenaly přes 2 000 otřesů, jejichž epicentra byla většinou pod zaplaveným územím. V r. 1963 bylo dosaženo i nejvyšší úrovně vodní hladiny v nádrži a síla seismických otřesů se zároveň zvětšila. I zde se tedy potvrdila korelace seismicity se změnami úrovně vodní hladiny.



3. Vodní nádrž Lake Mead na hranici Arizony a Nevady. Vertikální pohyby zemského povrchu (v mm) v období 1935—1963. Pokles v okolí Las Vegas dosahuje až 700 m.n a je způsoben převděpodobně čerpáním vody (Gupta aj. 1976).

Údolní nádrž Lake Mead, zadržaná hrází Hoover Dam ($v = 142$ m) leží na rozhraní Coloradského plato a provincie Basin and Range a je vlastně pokračováním Velkého kaňonu řeky Colorado. Je tvořena 2 velkými pánvemi — Virgin Detrital Trough na V a Boulder Basin na Z od pohoří Black Mts. Obě pánve neustále klesají (obr. 3). Nejsilnější pokles je však v okolí města Las Vegas, kde jeho příčinou je asi čerpání vody z podložních vrstev. Geologická stavba obou pánví je ovšem rozdílná. Ve východní pánvi je kromě jiných mladých sedimentů uloženo i několik tisíc metrů sádrowce a soli, zatímco na území jezera Boulder jsou převážně vulkanity o mocnosti od 900 do 5 000 metrů (obr. 4).

Nádrž byla naplněna v r. 1935. Před touto dobou zde také nebyly zaznamenány žádné otřesy, takže území platilo za aseismické. V r. 1937 se však objevilo už 100 otřesů. Seismická činnost pokračuje dodnes — stále jsou zaznamenávány 1—2 otřesy denně. Jejich epicentra jsou většinou v hloubce menší než 10 km. Otřesy jsou však vázány jen na pánvi Boulder — i když celkový pokles je u pánve Virgin Detrital mnohem intenzivnější. Mocná vrstva jemných sedimentů zde zřejmě izoluje hluboko ležící skalní podklad od vody v nádrži.



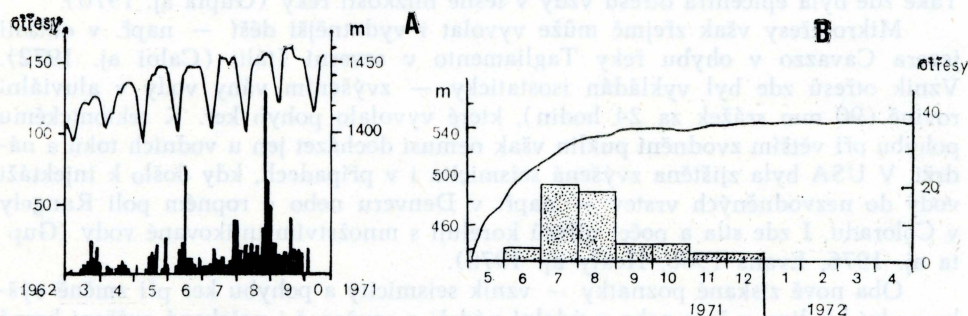
4. Boulder Basin, seismicky aktivní část vodní nádrže Lake Mead.

A. Přehledná geol. mapa: 1 — prekambričké vyvřeliny a metamorfity, 2 — terciární vyvřeliny, 3 — terciární a kvartérní sedimenty, 4 — hlavní zlomy.

B. Epicentra otřesů v období od 1. 7. 1972 do 30. 6. 1973.

Vodní nádrž Kremasta na řece Acheloos zasahuje do území vápenců, břidlic a flyše. Podobně jako u přehrady na řece Koyna i zde se objevila spojitost vody v nádrži s okolními termálními prameny. V Řecku, kde dochází průměrně k 2–3 otřesům měsíčně, nebylo okolí přehrady o nic aktivnější. V období 1700–1965 zde nebyl zaznamenán žádný významnější otřes. Přehrada vysoká 147 m byla naplněna koncem července 1965. Už v srpnu však zesílila seismická aktivita a do počátku února 1966 zde bylo zaznamenáno 740 otřesů. Dne 5. 2. 1966 při silném zemětřesení dokonce zahynulo 60 lidí a bylo pobořeno přes 1 500 domů. Ještě do konce r. 1966 proběhlo přes 2 500 otřesů až do $M = 5,6$. I zde byla epicentra mělká (do 20 km) a závislost otřesů na kolísání vody v nádrži stejná jako u nádrží předchozích.

Podobná korelace byla zjištěna dále i u nádrže Talbingo (výška hráze 162 m) v Austrálii, kde v období 13 let před jejím naplněním došlo pouze k jedinému otřesu. Napouštění zde začalo 1. 5. 1971 a už 19. 5. se začaly objevovat první otřesy. Do července jich bylo 39. Později však ustaly, protože hladina vody se ustálila (obr. 5b). U přehrady „Hendrik Verwoerd“ (v = 66 m) na řece Oranje v Jižní Africe začala seismická činnost až po 6 měsících od počátku napouštění a udržela se až do doby, kdy byla dosažena stálá výška hladiny. U údolní nádrže Vaiont v sev. Itálii, která má nejvyšší hráz na světě (v = 266 m), se stupňoval počet otřesů po dobu jejího naplňování a kolísál v souvislosti se změnami úrovně vodní hladiny. Katastrofa v r. 1963 však nebyla způsobena otřesem, ale sesutím zvodněného svahu do plné nádrže.



5. Korelace křivky hladiny vody a seismických otřesů.

A. Kolísání hladiny vody a seismických otřesů u nádrže Talbingo v Austrálii.

B. Uklidnění otřesů při ustálení hladiny vody v nádrži Kurobe v Japonsku.

Stejně kolísání seismické aktivity bylo zjištěno při stoupání a klesání vodní hladiny v nádržích Grandval (výška hráze = 80 m) a Monteynard (v = 130 m) ve Francii, u nádrží Canalles (v = 150 m) a Camarillas (v = 49 m) ve Španělsku, Contgra ve Švýcarsku, Marathon v Řecku, u nurecké nádrže na řece Vachš v SSSR, u nádrže Oued Fodda (v = 89 m) v Alžírsku, Kurobe (v = 180 m) v Japonsku (obr. 5a), Benmore (v = 96 m) na Novém Zélandu, Eucumbene (v = 116 m) a Blowering (v = 113 m) v Austrálii, Mangla (v = 135 m) v Pákistánu, Hsinfengkiang v Číně aj. Existenci slabších otřesů a jejich časovou korelaci lze samozřejmě zjistit jen u nádrží, v jejichž blízkosti jsou instalovány seismografy — a to není zdaleka všude.

Pro vznik otřesů stejně jako pro vznik pchybů dna a svahů údolí není zřejmě důležitý ani tak objem či rozsah nádrže, jako spíše výška vodního sloupce nad

jejím dnem. Jak upozorňuje Ivan (1977), objevují se otřesy už při výšce vody 40 m. Důležité jsou samozřejmě i horninové složení a stavba údolí, puklinatost hornin ap. Zvýšení počtu otřesů však není způsobeno vodní zátěží, ale jen tlakem vodního sloupce, kterým je voda vlačována do míst (pórů, puklin, zlomů), kam se jinak nedostane. Zvodněním suchých puklin a zlomů tak vznikají vhodnější podmínky pro posuny ker. Při poklesu vody v nádrži se zmenší tlak vodního sloupce a to je zřejmě dostačující změnou, způsobující další posun ker i další otřesy (Gupta aj. 1976). Jedinou podmínkou pro vznik kerných pohybů a otřesů je ovšem volný přístup vody k trhlinám a zlomům v podložní hornině. Je-li voda od podloží izolována např. vrstvou jílu ap. (Lake Mead) nebo je-li vrstva zvodněných hornin příliš mocná a rozlehlá, takže zvýšení vodního stavu v řece se v ní prakticky neprojevuje, nebo jestliže jednotlivé kry nemají tendenci k diferencovanému pohybu, pak ani zvodnění zlomových ploch nemůže žádný pohyb usnadnit nebo dokonce vyvolat. V těchto případech může docházet jen k takovým pohybům, které by zde probíhaly i v případě, že by údolí nebylo zatopeno. V této situaci zůstává kolísání hladiny bez následků — jako např. u pljavinské hydroelektrárny na řece Daugavě (Indrikson 1973) nebo u bratské nádrže na Angaře či krasnojarské na Jeniseji (Nikonov 1976), kde sice dochází k poklesům dna rychlostí až 10 a 6 mm za rok, ale bez seismických otřesů.

U nás se této tematiky dotkli např. Demek (1978), Ivan (1977), Horský (1976), Svatoš (1972). K poznatkům získaným studiem seismicity v okolí vodních nádrží je nutno ještě dodat, že už v r. 1963 zjistil McGinnis podobné zvětšování počtu otřesů i jejich síly při pouhém zvýšení vodního stavu v řece Mississippi. Také zde byla epicentra otřesů vždy v těsné blízkosti řeky (Gupta aj. 1976).

Mikrootřesy však zřejmě může vyvolat i vydatnější déšť — např. v oblasti jezera Cavazzo v ohybu řeky Tagliamento v severní Itálii (Caloi aj. 1972). Vznik otřesů zde byl vykládán isostaticky — zvýšením váhy vody v aluviální rovině (90 mm srážek za 24 hodin), které vyvolalo pohyb ker. K tektonickému pohybu při větším zvodnění puklin však nemusí docházet jen u vodních toků a nádrží. V USA byla zjištěna zvýšená seismicita i v případech, kdy došlo k injektáži vody do nezvodněných vrstev — např. v Denveru nebo v ropném poli Rangely v Coloradu. I zde síla a počet otřesů koreluje s množstvím injikované vody (Gupta aj. 1976, Evans 1966, Healy aj. 1970).

Oba nově získané poznatky — vznik seismicity a pohybu ker při změně výšky vodní hladiny v řece nebo v údolní nádrži a současně i nečekané ověření kerné stavby údolí — nebyly vůbec výsledkem cílevědomého výzkumu. Bylo by jistě nesprávné, kdyby právě z tohoto důvodu zůstaly přehlíženy. Jejich závažnost je zřejmá, a to nejen pro vědu, ale především pro praxi — pro projekci a stavbu údolních přehrad a jiných vodních staveb. Na základě zjištěných souvislostí nebude zřejmě možno zaručit naprostou stabilitu žádné údolní přehrady resp. vyloučit nebezpečí otřesů. Navíc tam, kde se v okolí uvažuje i s důlními pracemi, se tato problematika stává mnohem aktuálnější.

Literatura:

- CALOI P., MIGANI M. (1972): Movements of the fault of the Lake of Cavazzo in connection with the local rainfalls. — *Ann. Geofis.* XXV:1:15—20, Roma.
- CARDER D. S. (1945): Seismic investigations in the Boulder Dam area. 1940—1944, and the influence of reservoir loading on earthquake activity. — *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 35:174—192.
- DEMEK J. (1978): Änderungen der geomorphologischen Vorgänge und des Reliefs der Erde infolge der Tätigkeit der menschlichen Gesellschaft. — *Wirtsch.-geogr. Studien* 2:4:61—82 (Festschrift K. A. Sinnhuber, I. Teil), Wien.

- EVANS D. M. (1963): Man-made earthquakes in Denver. — *Geotimes*, May-June, 11—18
- GÖTZ B. (1969): Auswertung einer Folge von Senkungsbeobachtungen. — *Vermessungstechnik* 17:3:107—108, Berlin.
- GUPTA H. K., RASTOGI B. K. (1976): Dams and earthquakes. — *Developm. in geotechn. Engineering*, 11, Elsevier, 229 p.
- HEALY J. H., RALEIGH C. B. (1970): Earthquakes induced by fluid injection and explosion. — *Tectonophysics* 9:205—214.
- HORSKY O. (1976): Geologické poznatky z výstavby přehrad ve Španělsku. — *Geol. průzkum XVIII*:6:183—185.
- INDRIKSON E. K. (1973): Issledovanie vertikal'nykh snieschenij zemnoj poverchnosti na pljavinskom geodinamičeskom poligone. — *Sovrem. dviž. zem. kory*, Tatu 5: 144—149.
- IVAN A. (1977): Některé geomorfologické a geologické aspekty výstavby údolních přehrad. — *Sborník ČSZ* 82:4:321—332.
- KRUIS B. (1963): Výzkum svislých pohybů zemské kůry v oblasti vodního díla Orlík. — *Výzk. zpráva VÚGTK Praha*, č. 141, 11 p.
- LOYDA L. (1976): The tectonic origin of river valleys and its geodetic investigation. — *Rozpravy ČSAV, řada MPV*, 86:11:1—83.
- MISKOLCZI L. (1977): Analyse der Höhenänderungen von Brückenauflagern. — *Vermessungswesen u. Raumordnung*, 39:6 322—328.
- MOREAU R. L., BOYER B. (1972): Les méthodes topographiques appliquées à l'auscultation du barrage Daniel Johnson (Manicougan 5). — *Canad. Survèor* 26:1:20—37.
- NIKOLAJEV N. I. (1973): Usilenije regional'noj i lokal'noj sejmičnosti, svjazannoje s zapolnenijem krupnych vodochranilišč. — *Novejšaja tektonika, novejšije otloženiya i čelovek* 5:194—206, Izd. MGU Moskva.
- NIKONOV A. A. (1976): Sovremennyye technogennyje dviženija zemnoj kory. — *Izv. AN SSSR, ser. geol.*, 12:135—150.
- ROTHÉ J. P. (1972): Seismes artificiels. — *Tectonophysics* 9:215—238.
- STANĚK V. (1972): Sledovanie polohových posunov kamennej hrádze Ružín I trigonometrickou metódou. — *Geod. kart. obzor* 18:11:294—298.
- SVATOŠ A. (1972): Vliv nádrží na seizmicitu okolního území. — In: *Přehradné dni 1972*, Sbor. ref. III, Banská Bystrica 1972, 29—37.
- ZIEGLER A. (1972): Deformationsmessungen an der Dhünntalsperre. — *Vermessungstechn. Rundschau*, 34:6:201—208.

Zusammenfassung

STAUBECKEN, SEISMIZITÄT UND TALENTSTEHUNG

Die Flusstäler werden schon seit mehreren Generationen als Ergebnisse der Erosionstätigkeit betrachtet. Zu dieser Annahme tritt in der letzten Zeit eine vollkommen gegensätzliche Erfahrung hinzu. Bei der Auffüllung des Staubeckens kommt es nämlich oft zur Bewegung der Talsohle und der Talhänge, die sich auch auf den Körper des Staudammes überträgt. Es entsteht also eine Konfliktsituation — auf der einen Seite die Deutung der Talentstehung aufgrund der Erosion, also die atektonische Deutung — auf der anderen Seite die genau gemessenen und bewiesenen tektonischen Bewegungen innerhalb des Tales. Dieser offensichtliche Widerspruch zwischen einer Theorie und der Realität führte bisher zu keiner Lösung.

Eine Erklärung für die Bewegung wurde in der Lehre über Isostasie gesucht. Danach ruft das Gewicht des Wassers im Staudamm eine Einbiegung der Talsohle und damit auch die Bewegung der Talhänge und der unmittelbaren Umgebung hervor. Mit der Bewegung längs der Brüche rechnet die Geologie — beeinflusst durch die Geomorphologie — nicht, obwohl diese Bewegung durch geodätische Messungen verlässlich festgestellt wurde. Die Richtigkeit der isostatischen Deutung muss man allerdings auch bezweifeln. Das ursprüngliche Gewicht der Scholle, die die Talsohle bildet, würde sich nämlich nach der Auffüllung des Staubeckens z. B. in die Höhe von 100 m nur um ein Tausendstel vergrößern und dies würde natürlich kaum zur Veranlassung einer isostatischen Einbiegung der Talsohle genügen.

Gegen die atektonischen, auf der Erosion aufbauenden Auslegungen und gegen die bloße Durchbiegung der Kruste spricht jedoch die Entdeckung der seismischen Erschütterungen in Gebieten der Talsperren, die kurz nach deren Auffüllung in Erscheinung treten. Die Erschütterungen beweisen ganz klar, dass das Tal tektonischen Ursprungs,

d. h. eins aufgrund von Brüchen entstanden sein muss, sonst wäre es nährmlich zu den Schollenbewegungen, durch welche die Erschütterungen hervorgerufen werden, nicht kommen können. Diese durch das Eingreifen des Menschen hervorgerufenen Erschütterungen können relativ stark sein; so kamen z. B. bei den plötzlichen Erdbeben am Flusse Koyna im Jahre 1967 200 Menschen ums Leben. Dabei wurde das Gelände in weiterer Umgebung des Staubeckens als vollkommen aseismisch angesehen (Abb. 1). Im ebenso aseismischen Gebiet des Staubeckens Kariba am Zambezi (Abb. 2) zeigten sich bei der Auffüllung des Beckens Erschütterungen, deren Zahl und Stärke sich in Abhängigkeit vom Schwanken des Niveaus der Wasseroberfläche im Staubecken vergrösserte. Beim Staubecken Lake Mead am Flusse Colorado kam es zu Erschütterungen blos in seinem westlichen Teil (Boulder Basin), der aus Vulkaniten besteht, während der zweite Teil (Virgin Detrital Trough) infolge der mächtigen Schicht von Salz, Gipsstein und Ton auf der Talsohle, die ein Durchdringen des Wassers in grössere Tiefen verhindern, aseismisch geblieben ist (Abb. 3, 4). In ähnlicher Weise ereigneten sich seismische Erschütterungen kurz nach dem Auffüllen des relativ kleinen Wasserbeckens Kremasta am Flusse Acheloos in Griechenland, wobei 60 Menschen ums Leben gekommen sind. Es werden noch weitere Staubecken angeführt, bei denen festgestellt wurde, dass es zur Korrelation mit dem Schwanken der Wasseroberfläche kam (Abb. 5).

Die Epizentren der Erschütterungen liegen bei allen Staudämmen niedrig, ausnahmsweise in Tiefen bis 20 km. Eine Erhöhung der Zahl und der Stärke der Erschütterungen beim Auffüllen des Beckens wird offensichtlich nicht durch die Belastung durch Wasser verursacht, wie bisher vorausgesetzt wurde, sondern durch das Durchsickern des Wassers längs der Brüche und Spalten unter erhöhtem Druck, d. h. an den Stellen, wohin das Wasser normalerweise nicht durchdringen kann. Aufgrund der Durchwässerung neuer Spalten und Bruchflächen entstehen dann günstigere Bedingungen für die Bewegung der Schollen.

Das erwähnte Phänomen kommt nicht nur bei Staubecken vor. Die erhöhte Seismizität trat auch in den Fällen vor, in welchen es zur Injektage des Wassers in die tieferen Schichten, so z. B. in Denver und vor allem in dem Erdölgebiet von Rangely (Colorado) kam. Auch dort korrelieren die Stärke und die Zahl der Erschütterungen mit der Menge des injizierten Wassers.

Eine ähnliche Erhöhung der Zahl und Stärke von Erschütterungen wurde auch ausserhalb der Staubecken — und zwar blos bei Erhöhung des Wasserstandes des Flusses (Mississippi) — festgestellt. Damit werden freilich die Ergebnisse der geodätischen Messungen, durch die die permanente tektonische Bewegung im Tal entdeckt wurde, begläubigt und die Richtigkeit der tektonischen Deutung der Talentstehung bestätigt.

Titel zu den Abbildungen:

1. Die Seismizität des Gebietes des Staubeckens am Flusse Koyna vom Jahre 1967 bis Ende des Jahres 1971 (Gupta u. A. 1976). Die meisten Erschütterungen und die grössten Schäden entstanden zwischen der Biegung des Flusses und dem Deiche Koyna Nagar. 1 — Die Epizentren der Erschütterungen des stärksten Erdbebens 10. 12. 1967, 2 — Intensität der Erschütterungen des stärksten Erdbebens, 3 — Die maximale Intensität der Erschütterungen in der Zone VIII, 4 — Epizentrum der Erschütterungen vom 10. 12. 1967 bis 31. 12. 1971.
2. Riftal des Flusses Zambezi mit dem Staubecken Kariba (a) und ein Profil des Riftes (b). 1 — Praekambrium, 2 — Karoo-System, 3 — Die wichtigsten Brüche.
3. Das Staubecken Lake Mead an der Grenze zwischen Arizona und Nevada. Die vertikalen Bewegungen der Erdoberfläche (in mm) im Zeitabschnitt 1935—1963/64. Die Senkung der Umgebung von Las Vegas erreicht fast 700 mm und wird wahrscheinlich durch das Schöpfen des Wassers verursacht (Gupta u. A. 1976).
4. Boulder Basin, der seismisch aktive Teil des Staubeckens Lake Mead (Gupta u. A. 1976).
A. Übersichtliche geologische Skizze. 1 — Praekambrische Ergussgesteine und Metamorphite, 2 — Tertiäre Ergussgesteine, 3 — Tertiäre und quartäre Sedimente.
B. Epizentren der Erschütterungen im Zeitabschnitt vom 1. 7. 1972 bis 30. 6. 1973.
5. Korrelationskurven der Wasseroberfläche und der seismischen Erschütterungen (Gupta u. A. 1976).
A. Das Schwanken der Wasseroberfläche und die Erschütterungen bei dem Staubecken Talbingo in Australien. B. Beruhigung der Erschütterungen bei Stabilisierung der Wasseroberfläche im Staubecken Kurobe in Japan.