

Zusammenfassung

ZUR EROSIONSGESCHWINDIGKEIT

Am Beispiel mancher Lehrbücher für Hochschulen werden hier zuerst die geomorphologischen Lehrsätze über die „Erosionsgeschwindigkeit“, die unmittelbar mit dem Begriff des Erosionsprozesses in festen Gesteinen zusammenhängt, erörtert. In den bisherigen erosiven Deutungen gibt es zumindest Widersprüche. Es wird nämlich behauptet, dass fließendes Wasser allein nicht erodieren kann, sondern erst wenn es Bruchstücke von Gesteinen transportiert. Zugleich wird jedoch — und zwar gerade im Falle der „Erosionsgeschwindigkeit“ — behauptet dass „wenn der Flusslauf seine gesamte Energie zum Transport des Material verbraucht, kann er nicht erodieren“. Daraus ist ersichtlich, dass je weniger Material der Fluss transportiert, um so weniger Energie er auf diesen Transport aufwendet und um so mehr Energie ihm daher für die Erosion übrigbleiben muss. Der Fluss erodiert also am stärksten, wenn er überhaupt kein Material transportiert, denn dieses nimmt dem Fluss die Energie ab, die er sonst zum Erodieren nützen könnte. Einmal wird also behauptet, dass Wasser allein nicht erodieren kann, ein andermal wieder, dass am besten Wasser selbst erodiert.

Bei der Deutung der Erosionsgeschwindigkeit wird auf Hjulström (1939) hingewiesen, der angeblich den ganzen Erosionsprozess durchforscht hatte und nachher die Grenze zwischen der Transport- und „Erosions“ — Geschwindigkeit festlegte. In der Tat berücksichtigte Hjulström bei seinen Labor-Experimenten — und es war auch gar nicht möglich sie zu berücksichtigen — die wichtigen und sich stets ändernden Faktoren des natürlichen Milieus, vor allem die Eigenschaften der Böden der Flusstäler und des transportierten Materials, das Gefälle des Flusslaufes, die Durchflussmenge u. A., nicht. Ausserdem unternahm er die Experimente mit einzelnen Fraktionen des transportierten Materials isoliert und die auf diese Weise erhaltenen graphischen Darstellungen generalisierte er in ein Diagramm, dass das Endergebnis ermitteln sollte (s. Abb.). Seine Experimente, wie verdienstvoll sie auch sein mögen, kann man daher nicht als eine Entdeckung allgemeiner Gesetzmässigkeiten der Erosionsprozesse betrachten, also als Gesetzmässigkeiten, die in der Natur für alle Wasserläufe und bei allen sich verändernden Bedingungen gelten.

Bisweilen steht fest, dass der „Erosionsprozess“, bei dem die Erosion (d. h. die Abrasion) als gleichwertige Komponente mit dem Transport und mit der Sedimentation erscheint, auf dem Meeresufer festzustellen ist. Bei der Erosion der Flüsse wurde das Mass der Erosion keineswegs bewiesen und soweit man ihr nicht mehr zuerkennt, als das, was tatsächlich festgestellt wurde (Rillen, Glättungen), dann ist ihre Bedeutung als eines grundlegenden Naturprozesses sehr gering. Der Prozess der Flusserosion wird sicher präziser durch die Dreieit der Faktoren „Verwitterung—Transport—Sedimentation“ ausgedrückt.

ANTONÍN IVAN

NĚKTERÉ GEOMORFOLOGICKÉ A GEOLOGICKÉ ASPEKTY VÝSTAVBY ÚDOLNÍCH PŘEHRAD

1. Úvod

Ačkoliv přehrady se staví nejméně již pět tisíciletí (nejstarší známá přehrada Sadd el Katara v Egyptě na Wádi el Garawi byla postavena v letech mezi 2950—2750 př. n. l., N. Smith 1971, s. 1—4). běžným rysem krajiny, zejména kulturní krajiny, se staly teprve v našem století. Jejich mnohostranný užitek je v současné době jednak znásobován omezenými zásobami a vysokými cenami

klasických fosilních paliv, jednak rychle rostoucími požadavky na vodní zdroje. Od doby, kdy stavba přehrad přestala být záležitostí hlavně empirie a stala se věcí přesných výpočtů a moderní technologie spojené s hospodárností, význam geologických a geomorfologických poměrů vystoupil do popředí a jejich průzkum dnes předchází prakticky každou stavbu.

Výstavba každé větší přehrady sebou nese řadu různých geologických a geomorfologických problémů, které jsou podmíněny geologickou a geomorfologickou specifikou území, významně ovlivňují bezpečnost stavby a promítají se do stavebních nákladů. V současné době, kdy moderní technika dovoluje uskutečňovat stále větší a náročnější vodní stavby, význam průzkumu geologických a geomorfologických poměrů se ještě zvyšuje, a tato tendence bude zřejmě pokračovat i nadále. Jsou zde za prvé zkušenosti získané při katastrofách některých velkých přehrad, např. Malpassett a Vajont, kde nebyl význam všestranného geologického a geomorfologického průzkumu zřejmě dostatečně doceněn. Za druhé, budování soustavy přehrad v určitém povodí postupuje zpravidla od nejvýhodnějších profilů. Dá se proto očekávat, že každá další přehrada na téže toce bude realizována ve složitějších, resp. méně příznivých geologických a geomorfologických podmínkách než stavby předchozí. Za třetí, vedle těchto aspektů, zaměřených převážně na otázky bezpečnosti přehrad, ukazují příklady z praxe, že přehrady představují zásah do reliéfu, který zpětně ovlivňuje průběh geomorfologických procesů a vývoj tvarů. Konečně, za čtvrté, podstatně více než dříve se věnuje pozornost geologickým a geomorfologickým faktorům výstavby přehrad z hlediska problematiky životního prostředí v návaznosti na ekologii krajiny, její estetiku ap.

Geologické a geomorfologické aspekty výstavby přehrad můžeme rozdělit do tří skupin. Do první skupiny patří inženýrsko-geologické a geomorfologické podmínky výstavby vlastního vodního díla. Patří sem prošetření geomorfologických, petrografických, tektonických a hydrogeologických poměrů v prostoru přehradní hráze případně jiných objektů, zjištění propustnosti, únosnosti, přezkoumání stability svahů po celém obvodu nádrže i možné působení abrazních procesů a jejich důsledky, vyhledání vhodných těsnicích a stabilizačních materiálů aj. Metodika a cíle inženýrsko-geologických průzkumů této široké problematiky jsou velmi podrobně propracovány a existuje o nich rozsáhlá literatura (viz Q. Záruba — V. Mencl 1957, E. E. Wahlstrom 1974). Zde není potřeba touto problematikou se zabývat. Pokud dochází ke změnám v reliéfu, např. sesuvům, vzniku abrazních srubů a plošin, jsou nezvratné a mohou mít nepříznivé důsledky (u nás viz např. J. Linhart 1964).

Druhá skupina problémů, kterou se hlavně budeme zabývat, se dotýká podstatně širšího území než je vlastní přehrada a může zasahovat prakticky celé povodí. Zahrnuje jednak vliv geomorfologických procesů probíhajících v povodí nad přehradní nádrží, jednak zpětně vliv těchto staveb na fluvialní procesy a jejich prostřednictvím na utváření tvarů reliéfu. Ve srovnání s první skupinou faktorů je tato problematika podstatně složitější a stupeň jejího poznání velmi neúplný. Příčina tkví již v tom, že tyto procesy nejsou s výjimkou zanášení nádrží na první pohled dostatečně patrné a proto se jim také nepřikládá větší význam. Vedle zanášení splaveninami sem patří změny v erozně-denudační a akumulační činnosti vodních toků, změny v morfologii říčních, náplavových kuželů a údolních niv, a to jak v místě přehrad a nad ní, tak i níže po toku. Tyto jevy jsou většinou částí velmi složité řetězové reakce, případně projevy zpětných vazeb, které můžeme chápat jako působení fluvialního autoregulačního systému.

Poslední skupina endogenních aspektů zahrnuje izostatické reakce zemské kůry a vyvolaná zemětřesení. Tato problematika se objevila teprve v posledních desetiletích, zejména v souvislosti s budováním stále větších přehrad.

2. Denudace v povodí a zanášení nádrží

Zanášení nádrží splaveninami, t. j. hrubším materiálem transportovaným při dně, a plaveninami, tvořenými jemnými částicemi unášenými v suspenzi, je složitý problém nejen velkého praktického, ale i teoretického dosahu. Spadá zčásti do dynamické geomorfologie, zčásti do sedimentologie. Pro potřeby praxe se většinou řeší z hlediska rychlosti zanášení nádrže, protože na ní závisí její životnost.

Z teoretického hlediska považují někteří autoři údaje o zanášení přehrad za jeden z nejspolehlivějších pramenů pro stanovení rychlosti denudace v povodí (L. B. Leopold in W. L. Thomas ed. 1956, s. 640, S. A. Schumm 1963, s. 2—3). Denudační bilance zahrnuje součet materiálu usazeného v přehradě a materiálu, který zůstává v suspenzi a je spolu s vodou vypouštěnou z nádrže odnášen dále. Je zde několik metodických a interpretačních problémů. Např. přesnost výpočtů je ovlivňována tím, že množství materiálu usazeného v nádrži se měří v jednotkách objemových, množství plavenin v proudící vodě naproti tomu v jednotkách váhových. Dále, získané údaje nelze dost dobře generalizovat, zejména se uplatňuje velikost povodí. Bylo zjištěno, že čím menší je povodí na němž se nádrží zachycené splaveniny a plaveniny měří, tím větší vycházejí hodnoty rychlosti denudace. Proto generalizace hodnot získaných výzkumem na přehradách s malým povodím na velké oblasti, kontinentálního či subkontinentálního rozsahu nebo na danou klimamorfologickou oblast dává hodnoty vyšší než je skutečnost.

Geomorfologická podstata zanášení nádrží vyplývá z toho, že minerální materiál se do nich dostává působením souboru erozně-denudačních procesů. V naší klimamorfologické mírně teplé oblasti je zdaleka nejdůležitějším erozním i transportním činitelem tekoucí voda. Proto v libovolném příčném profilu říčního toku musí spolu s vodou projít všechny pevný materiál (s výjimkou materiálu odnášeného větrem nebo odstraňovaného lidskou činností), který byl denudován v části povodí nad tímto profilem.

Zde se částečně dotýkáme — a souvisí s tím také nastíněný problém rychlosti zanášení přehrad ve vztahu k velikosti povodí — otázky volby místa nádrže v rámci povodí. Při různých střezech, které jsou při plánování přehrad běžné, se někdy argumentuje (zejména, jsou-li přehradu uvažovány na dolních tocích v otevřeném, plochém území) tak, aby se tyto stavby budovaly na horních tocích, kde přece jen nejsou tak velkým zásahem do krajiny. Přehlíží se tím, že má-li přehrada vyrovnávat průtoky, vyloučit povodně a zajistit určité množství vody, musí být situována tak, aby kontrolovala co největší část povodí. Na druhé straně, jak ještě ukážeme, požadavek techniků, zcela vyloučit vyběžování toku a zaplavování údolní nivy se může z dlouhodobého geologického a geomorfologického hlediska jevit jako problematický.

Množství a složení splavenin a plavenin, které se dostávají do vodních toků a jejich prostřednictvím do přehradních nádrží závisí na řadě činitelů. Nejdůležitějšími jsou reliéf a klimatické poměry. Navzájem se zde složitě propojují vlivy hloubky a hustoty rozčlenění reliéfu, litologie, erozně-denudačních procesů, vegetačního krytu a hydrologického režimu. Stále větší význam nabývá lidská činnost, zejména způsob využívání půdy. Údaje o množství materiálu unášeného

řekami v různých typech reliéfu a různých klimamorfo-genetických oblastech uvádějí na př. J. Corbel (1959, s. 5—15) a Z. Kukul (1964, s. 25—36). Největší problémy představují splaveniny a plaveniny pro vodní nádrže v polosuchých oblastech. Pro jihozápadní části USA, kde současné denudační procesy mají vysokou intenzitu, byl zjištěn největší odnos pro průměrnou roční teplotu 10 °C při srážkovém úhrnu 300—380 mm. Při menších srážkových úhrnech odnos klesá v důsledku menšího specifického odtoku, zatímco větší srážky podporují rozvoj vegetačního krytu s jeho protierozními účinky (S. A. Schumm in H. G. Wright a J. C. Frye 1968, s. 543, obr. 2). Důležitými faktory jsou ovšem teplota (prostřednictvím výparu ovlivňuje odtok) a způsob vypadávání srážek.

Ukládání splavenin a plavenin v přehradních nádržích má mnoho společných rysů s jezerní sedimentací. Podíl plavenin zachycený nádrží je hlavně funkcí retenčního času vody v přehradě (A. S. Fry in P. D. Trask ed. 1950, s. 348), splaveniny jsou zachycovány všechny. Platí zde vztah, že čím větší je poměr mezi objemem nádrže a plochou povodí, tím pomaleji se bude přehrada zanášet (H. M. Eakin 1936, s. 22; G. V. Lopatin ed. 1965, s. 202—210). Vedle toho jsou důležitými faktory tvar nádrže, reliéf jejího dna, způsob manipulace s nadrženu vodou a zda jsou v povodí směrem proti toku další nádrže.

Odhaduje se, že velké nádrže mohou zachytit 95—98 % přinášeného materiálu. Bude to platit zejména pro velké přehrady, které využívají členitý kotlinovitý reliéf. Naproti tomu menší množství splavenin a plavenin se usadí v nádržích, vybudovaných v úzkých údolích, kde šířka nádrže nepřekračuje podstatně šířku údolního dna.

Ubývání, nebo lépe ztráta objemu nádrže v důsledku zanášení splaveninami a plaveninami má mnoho zajímavých stránek. V USA toto zanášení, označované jako silting, představuje v řadě oblastí, zejména však na polosuchém jihozápadě a podél východního úpatí Appalačí, vážný ekonomický problém. Průměrná roční ztráta objemu vypočtená z údajů o 1069 přehradách v celých USA činí sice jen 0,2 % (viz D. R. Coates ed. 1973, s. 85), maximální hodnoty však převyšují až 7 %, to znamená životnost kolem 10 let. V SSSR se těmto problémům věnuje rovněž velká pozornost, hlavně v zemědělsky intenzivně obdělávaných jižních územích evropské části RSFSR a Ukrajiny se silnou půdní erozí (viz např. G. V. Lopatin ed. 1965). Rychlost zanášení našich nádrží je ve srovnání s jinými klimamorfo-genetickými oblastmi vcelku malá. Převážná část hmot přinášených do našich nádrží jsou plaveniny (podle S. Kratochvíla 1961, s. 93 je poměr splavenin k plaveninám asi 1 : 10).

Jak složitá je otázka zanášení v úvahách o životnosti nádrže a jak velký počet faktorů se zde uplatňuje, je možno ilustrovat na příkladu známé, 221 m vysoké přehrady Boulder Dam a její nádrže Lake Mead na řece Colorado, dokončené v r. 1935. Podle velmi podrobných komplexních výzkumů (W. O. Smith et al. 1960) činila ztráta objemu způsobená zanášením za prvních čtrnáct let 4,9 %. Skutečná ztráta zadržitelného množství vody se však zmenšila jen o 3,2 %. Rozdíl vznikl tím, že poměrně velké množství vody je následkem vzdutí nadrženo v původně nezvodněných horninách přibřežní části nádrže a v sedimentech jejích břehů a dna.

Na druhé straně, množství splavenin a plavenin usazených v nádrží bylo menší ve srovnání s výpočty, založenými na měřeních na řece Colorado před vybudováním přehrady. Bylo to tím, že část sledovaného čtrnáctiletého úseku zahrnovala suché období čtyřicátých let, kdy průtoky a spolu s nimi i množství přinášeného materiálu byly pod dlouhodobým průměrem.

Z údajů o rychlosti zanášení nádrže byla vypočítána její životnost na 230 let. Současně však byl vysloven předpoklad, že skutečná životnost bude značně delší. Předně, objem minerálního materiálu, který může přehrada při úplném zaplnění sedimenty zachytit je větší než je objem vlastní nádrže. Je to proto, že zatímco hladina vody mezi ústím řeky do nádrže a přehradní zdi je vodorovná, transport vody a splavenin v sedimenty zaplněné nádrži bude vyžadovat určitý spád. Z toho důvodu se vytvoří nad úroveň přepadu, po který bude sahat vrstva náplavů, směrem od přehradní zdi proti toku klín sedimentů. Jeho mocnost se bude tímto směrem zvětšovat a je pravděpodobné, že jeho utváření ovlivní rozsah zpětné aggradace v úseku toku nad přehradou. Dalším faktorem, který umožní zvýšení množství sedimentů usazených v nádrži bude postupné zvětšování jejich ulehlosti vytlačováním vody z pórů v důsledku vzrůstajícího zatížení nadloží. Jak bylo zjištěno, nezanedbatelné není ani zvětšování objemu nádrže rozpouštěním solí, zejména sádrovce, pod dnem přehrady (má také nepříznivé účinky na kvalitu vody vypouštěné z přehrady a využívané pro závlahy). Je rovněž známo, že s postupným zaplňováním nádrže splaveninami a plaveninami se stále větší část plavenin dostává dále a v nádrži se neukládá. Soudí se, že daleko nejpriznivějším činitelem ve zvýšení životnosti Lake Mead by však měla být výstavba dalších přehrad směrem proti toku Colorada, které by zachytily splaveniny a plaveniny z horní, nejsilněji erodované části povodí. Naproti tomu, velmi obtížné je stanovit vliv izostatického prohnutí zemské kůry v prostoru nádrže, které může objem nádrže jek zvýšit, tak i snížit (viz níže).

Doposud málo byl studován vztah mezi výparem a sedimentací v nádržích. Nepochybně velký výpar z přehradních nádrží v územích s teplým a suchým podnebím a častými větry (u Boulder Dam činí výpar 5—7 % množství vody přítékajícího ročně do přehrady, W. O. Smith et al. 1960, s. 2 a 143—145; u Assuánské přehrady se odhaduje mezi 10 až 40 %, N. Smith 1971, s. 241) zvyšuje nejen koncentraci solí ve vodě, ale také suspendovaných látek, čímž přispívá k jejich ukládání. A naopak, ukládání splavenin a plavenin v nádrži nepřímo přispívá k většímu výparu, neboť se jím zvětšuje plocha vodního povrchu vzhledem k objemu zadržené vody (T. L. Maddock in W. O. Smith et al. 1960, s. 247).

Ukládání splavenin a plavenin v přehradě není rovnoměrné. Nejvíce materiálu sedimentuje v prostoru ústí řeky do přehrady, kde ztráta spádu eliminuje transportační schopnost toku. Sedimentace zde má deltový charakter s tříděním na svrchní a spodní vrstvy. Deltové sedimenty obsahují všechny splaveniny vlečené po dně a část hmot unášených v suspenzi. U menších toků, které ústí do přehradní nádrže jako pobočky hlavního toku se původně kuželová sedimentace mění v deltovou.

Tvar delty je velmi silně ovlivňován mimo morfologii břehů také kolísáním hladiny nádrže. Jestliže je vzdálenost mezi místy, kde řeka ústí do nádrže při maximálním a minimálním stavu hladiny příliš velká, k vývoji delty nemusí vůbec dojít (N. I. Makkavejev et al. 1961, s. 134—142). Při kolísání hladiny dochází často k přeplavování a rozbrázdování sedimentů delty. Největší sedimentace je v místech, kde řeka vtéká do přehradní nádrže v době povodní.

Jemnější materiál unášený v suspenzi je zčásti odnášen dále do nádrže a může se ukládat po celém jejím dně. Jeho rozptýlení ve vodě není rovnoměrné. Transport provádějí hlavně turbidní proudy, které se vcelku málo mísí s okolní méně kalnou vodou. V technické praxi se označují jako hustotní proudy a znalost jejich pohybů může mít velký význam pro zmenšení rychlosti zanášení přehrady např

využíváním spodních výpustí (srov. S. Kratochvíl 1961, s. 95—96). Ukládání jemnozrných sedimentů na dně nádrže je ovlivňováno prouděním vody v přehradě, vegetací a členitostí reliéfu dna. Největší mocnosti sedimentů jsou zpravidla v prohlubeninách dna (viz např. Q. Záruba et al. 1967, s. 153).

3. Vliv přehrad na morfologii řečišť a údolních niv

Vybudování přehrady představuje z geomorfologického hlediska vznik nové místní erozní báze, ležící v podélném profilu vodního toku prakticky ve fixované poloze. Touto erozní bází je hladina nádrže v úrovni přepadu v koruně hráze. Zkušenosti ukazují, že vliv této umělé místní erozní báze může převýšit vlivy jiných, přírodních procesy vzniklých místních nebo dočasných erozních bází. Vliv přehrady se bude projevovat v úseku vodního toku jak nad přehradou, tak i pod přehradou, směrem po toku.

Ve směru proti toku jsou účinky zvýšení erozní báze méně složité. Nejnápadnějším rysem je zpětná aggradace, zjištěná jak na konkrétních přehradách, tak i experimentálně na modelech (N. I. Makkavejev et al. 1961, s. 128—130). Problém zpětné aggradace souvisí velmi úzce se zanášením nádrže, zejména růstem delty při ústí řeky do nádrže. Zpětná aggradace vede většinou ke zmenšení spádu. Pouze u koryt, jejichž dno je tvořeno šterkem, může naopak dojít k jeho zvýšení (L. B. Leopold, M. G. Wolman, J. P. Miller 1964, s. 260—265). Vzdálenost, na kterou se zpětná aggradace projevuje je malá, nejvýše několik kilometrů proti toku a rozhodně neovlivňuje celý tok nad přehradou.

Mnohem složitější a z praktického hlediska obtížně předvídatelné, jsou účinky přehrady na úsek vodního toku pod přehradou. Vybudování přehrady je příčinou dvou základních, člověkem uvážených a plánovaných zásahů. Prvním je změna hydrologického režimu, zejména vyloučení maximálních průtoků spojených s vyběřováním a nadlepšení průtoků minimálních. Druhým rysem je to, že voda vypouštěná z přehrady obsahuje málo, případně žádné plaveniny a rozhodně ne materiál vlečený po dně. Tyto, možno říci řízené změny, jsou začátkem řetězové reakce dalších, převážně již obtížně kontrolovatelných změn, jejichž prvotní příčina nemusí být v důsledku neobyčejné složitosti fluvialních procesů na první pohled patrná.

Základy znalostí fluvialní dynamiky jako souboru geomorfologických procesů, t. j. říční eroze, transportu a sedimentace ve vztahu k hydraulickým podmínkám a morfologii koryt a údolí řek se datují již z minulého století. Výzkumy posledních dvou, tři desetiletí přinesly řadu nových poznatků a upřesnění, které vycházejí jak ze studia přírodních toků, tak i modelů. V nejobecnější formě se tyto nové poznatky odrážejí v chápání vývoje říčního toku jako složitého otevřeného samoregulačního systému (např. R. J. Chorley 1962; L. B. Leopold, W. B. Langbein 1962), ale také ve změnách některých základních principů a termínů fluvialní morfologie, jako je např. profil rovnováhy.

Ve fluvialní morfologii se v důsledku historického vývoje geomorfologie kladl vždy neobyčejný důraz na spádové poměry vodních toků, a to zejména v souvislosti s vypracováním profilu rovnováhy. Je známo, že podélný profil je funkcí sedmi proměnných veličin: průtoku, množství unášených plavenin a splavenin, velikosti unášených částic, odporu vůči proudění, rychlosti, šířky toku a hloubky. V autoregulačním systému říčního toku vyvolá změna kteréhokoliv z těchto faktorů, jak to také vyplývá ze známé a vcelku všeobecně uznávané definice

profilu rovnováhy od J. H. Mackina (1948, s. 471), posun všech nebo jen některých ze zbývajících faktorů tím směrem, aby se s co nejmenším vynaložením energie eliminoval účinek prvotní změny. Transport vody a minerálního materiálu v řece je energetickým procesem, v němž se kinetická energie vodního toku mění při překonávání odporu vůči proudění (tření na obvodu koryta, mezi částicemi navzájem, turbulencí) v energii tepelnou. Na bilanci tohoto energetického procesu závisí také rozsah a charakter akumuláčních procesů v korytě řeky. Názornou představu o této bilanci dávají odhady, podle nichž proudění vody a transport splavenin v erozních úsecích vyžadují 95—98 % energie, kterou má vodní tok k dispozici, a jen zbývající nepatrná část může být použita pro vymílání (M. Morisawa 1968).

Z uvedených sedmi veličin, které jsou v různém stupni závislé nebo nezávislé (viz např. G. H. Dury in R. J. Chorley ed. 1969, s. 319 a podrobná diskuse in S. A. Schumm, R. W. Lichty 1965) se výstavbou přehrad mění průtok (v přirozených podmínkách je stupeň jeho závislosti nejmenší), velikost sedimentárního břemene a velikost jeho částic. Tyto změny mají za následek změny zbývajících veličin přizpůsobením koryta novým podmínkám. Do určité míry jsou tyto změny analogické s opakovanými klimatickými změnami v pleistocénu, zejména přechodem od říčního režimu chladných glaciálů (velké, ale velmi nevyrovnané průtoky, velké sedimentární břemeno tvořené hrubými klastickými částicemi) k režimu teplých interglaciálů (celkově menší ale vyrovnanější průtoky, menší sedimentární břemeno a jeho jemnější zrnitostní složení).

Proudění vody vypouštěné z nádrže a zbavené splavenin a plavenin vyžaduje ve srovnání s poměry před výstavbou přehrad menší množství energie. Podle běžně aplikovaného principu chování vyrovnaného toku, resp. toku, který dosáhl profilu rovnováhy, se volná energie využije ke zmenšení spádu, které se uskuteční procesy hloubkové eroze. Výzkumy ukazují, že k těmto změnám skutečně dochází, nejsou však jediné nebo bezpodmínečně nutné a nemusí být ani na první pohled patrné.

Hloubková eroze v úseku pod přehradou může mít dosah na vzdálenost řádově set kilometrů. Maximální známé hodnoty prohloubení koryta činí až přes tři metry, při značné průměrné rychlosti zahlubování cca 3 cm/rok. Vyskytují se hned pod přehradou a směrem po toku klesají zároveň s tím, jak se postupně zmenšuje vliv přehrad na režim odtoku vody i splavenin. Zajímavé je, že množství erodovaného písčitého materiálu z koryta je zhruba ekvivalentní množství písčitých splavenin usazených v nádrži (L. B. Leopold, M. G. Wolman, J. P. Miller 1964, s. 457). Tato skutečnost naznačuje, že v systému přehrad na jednom toku může být předpoklad malého přínosu splavenin do nádrží ležících níže po toku málo opodstatněný.

Současně s procesy hloubkové eroze dochází v korytě i ke změnám ostatních závislých veličin, odporu vůči proudění, hloubky a šířky toku. V závislosti na místních geomorfologických podmínkách (složení břehů a dna) má eroze v úseku pod přehradou v různém stupni výběrový charakter, tzn. jsou odnášeny hlavně jemnější částice, zatímco hrubší materiál zůstává na místě. Tímto způsobem se zvyšuje drsnost koryta a zvyšují se ztráty energie v důsledku většího tření a turbulence (viz např. N. I. Makkavejev et al. 1961, s. 133). Je problematické, zda to platí po celý úsek ovlivněný přehradou. Např. L. B. Leopold a T. Maddock (1953, s. 39) soudí, že zvýšení odporu vůči proudění na řece Colorado u města Yumy, asi 560 km pod přehradou Boulder Dam, pramení spíše než ze zvětšení velikosti části na dně koryta ze zmenšení množství materiálu unášeného v sus-

penzi. V uvedeném místě došlo v důsledku výstavby přehrady ke zvětšení drsnosti koryta, hloubky koryta, zmenšení šířky (asi o 1/6) a poklesu střední rychlosti. Naproti tomu spád zůstal v podstatě stejný. Rovnováha toku v tomto místě byla tedy dosažena nikoliv změnou spádových poměrů, ale ostatních charakteristik koryta, zejména těch, které určují jeho příčný profil. Na tomto základě a analýzou dalších údajů docházejí L. B. Leopold a T. Maddock (1953, s. 46) k závěru, že změny vlastností říčního koryta jako reakce na změny řídicích faktorů a přizpůsobení se novým podmínkám by měly být obsaženy také v definici vyrovnaného vodního toku a profilu rovnováhy. Podobně při citaci již zmíněné definice profilu rovnováhy od J. H. Mackina soudí L. B. Leopold, M. G. Wolman a J. P. Miller (1964, s. 266), že se v ní klade příliš velký důraz na spád toku.

Změny v morfologii řečišť jsou způsobovány nejen změnou hydrologického režimu pokud jde o velikost průtoků, ale také způsobem vypouštění vody z nádrže. Týká se to zejména přehrad budovaných pro energetické účely. Plynulé změny v průtocích, jak je známe u přírodních toků, jsou nahrazeny velmi nerovnoměrným, případně i přerušovaným vypouštěním vody z nádrže. Podle pokusů na modelech (N. I. Makkavejev et al. 1961, s. 133) to má za následek tendenci k rozšiřování koryta na účet jeho hloubky a dále vznik dunových forem na dně, které se pohybují směrem po toku.

Přehrada zasáhne změnami v morfologii nejen tok, na kterém byla vybudována, ale může podstatně ovlivnit i jeho pobočky. Zatímco totiž v přírodních, člověkem neovlivněných podmínkách je určitá návaznost a synchronnost mezi vrcholovými průtoky na hlavním toku a pobočkách, vybudováním přehrady je tento rys porušen (L. B. Leopold in W. L. Thomas ed. 1956, s. 922). Zde bude pravděpodobně velmi záležet na tom, jakým způsobem se pobočka s hlavním tokem spojuje. Jestliže se oba toky stékají ve společné údolní nivě, prohloubení koryta na hlavním toku, jako důsledek výstavby přehrad, vyvolá na pobočce vlnu zpětné eroze případně přizpůsobení jiných charakteristik koryta. Zcela jinak tomu bude v případě, jestliže pobočka má ve srovnání s hlavním tokem značný spád a tvoří při vyústění do jeho údolí náplavový kužel. K vlně zpětné eroze v tomto případě pravděpodobně nedojde. Naopak, hrubý klastický materiál vynášený z pobočného údolí není v důsledku vyloučení vysokých průtoků, které mají pro morfologii koryta největší význam, odnášen v takové míře, jak tomu bylo dříve. Růst náplavových kuželů se proto při jinak stejném velkém přínosu materiálu pobočkou zrychlí. V praxi to může znamenat např. zhoršení plavebních podmínek na hlavním toku, zvláště tam, kde je údolní dno úzké a kužely zasahují přímo do řečiště (v Grand Canyonu na řece Colorado se tímto způsobem zhoršily podmínky pro turisticky velmi využívanou plavbu na vorech a člunech).

Velmi málo zatím víme o vlivu změn v hydrologickém režimu způsobených člověkem na změny ve struktuře údolních niv, na jejichž možnost poprvé poukázal rovněž L. B. Leopold (in W. L. Thomas ed. 1956, s. 922). Vychází přitom ze dvou skutečností. První je, že údolní nivy jako akumulární tvary jsou řekou budovány právě do takové výšky, která umožňuje pravidelné 1–2 roční zaplavování vyběžením. S tím úzce souvisí druhá skutečnost, týkající se vlastních procesů utváření údolní nivy. Děje se z převážné části bočním přemísťováním koryta v údolním dně, z menší části vertikálním příkládáním vrstev (viz blíže zejména M. G. Wolman, L. B. Leopold 1957; V. Šancer 1961). Při povodních probíhá na povrchu údolních niv — tedy mimo řečiště — nejen akumulace, ale i eroze. Kdyby se totiž ukládáním povodňových hlín povrch údolních niv neustále zvyšoval, četnost vyběžení by se musela postupně zmenšovat. Hydro-

logické údaje ani historické zkušenosti na tocích, o nichž jsou velmi dlouhé záznamy (Nil, Hoangho), to však nepotvrzují.

Podle představy L. B. Leopolda by změny ve struktuře údolní nivy postupovaly asi takovým směrem, aby se znovu dosáhlo podmínek pro její opětné pravidelné zaplavování. Znamenalo by to buď snížení povrchu údolní nivy nebo zvýšení dna říčního koryta. Snížení výškového rozdílu mezi povrchem údolní nivy a dnem koryta by pak umožnilo vyběžování i při nižších maximálních průtocích. Kdyby k tomu skutečně došlo, znamenalo by to v mnoha případech anulování účelu, pro který byla přehrada vybudována. Ovšem tyto změny — pokud by se uskutečnily — by byly, i přesto, že údolí nivy patří mezi nejdynamičtější tvary současného reliéfu, zřejmě záležitostí delšího vývoje a vyžadují např., aby koryto řeky nebylo ve svém bočním přemísťování v údolní nivě omezováno umělými hrázemi, nebylo prohlubováno bagrováním ap. Dále jsou zde jiné, často protichůdně působící antropogenní vlivy. Např. vliv urbanizace se v mnoha případech projevuje prokazatelně tak, že se zvětšuje šířka koryta (T. R. Hammer 1972, L. B. Leopold 1973). Jaké budou geomorfologické důsledky kombinace těchto a dalších možných vlivů (např. způsob využití půdy v povodí), nelze většinou v důsledku složitosti celé problematiky za současného stavu výzkumu uvažovat ani v nejobecnější rovině.

4. Přehradý a endogenní dynamika

Voda přehradních nádrží představuje místní přitížení povrchu litosféry. Již od vzniku izostatické teorie v polovině minulého století, která vysvětluje různou výškovou polohu ker zemské kůry, a zejména od rozvoje glacioizostatických výzkumů je známo, že zemská kůra je na jakékoliv odtížení a přitížení velmi citlivá. Soudí se, že reaguje i na takové vlivy, jako jsou změny atmosferického tlaku. Izostatické pohyby se studují zpravidla jako reakce na změny v zatížení, k nimž došlo ve vzdálenější či bližší geologické minulosti. Jsou to studia glacioizostatických pohybů vyvolaných vznikem a zánikem kontinentálních ledovců a s tím spojených eustatických kolísání mořské hladiny v kvartéru. Podobného typu, ale již více hypotetické jsou úvahy o izostatických zdvích v důsledku odtížení kontinentů denudací (S. A. Schumm 1963, s. 9—12, A. Holmes 1965, s. 576—577) a poklesech v důsledku zatížení sedimenty (R. K. Matthews 1974, s. 50—58). Ve srovnání s tím je zřejmé, že zatížení velkou přehradou představuje teoreticky velmi cenný objekt, model, na němž je možno proces izostatického přízpusobování sledovat exaktními metodami od jeho začátku. Praktický význam izostatického poklesávání vyvolaného zatížením přehradní nádrží spočívá v tom, že objem nádrže se může buď zvětšit (vlastní nádrž klesá více než místo, v němž je hráz) nebo zmenšit (opačný proces). Protože izostatické poklesávání má diferenciální charakter, může mít také značný vliv na spádové poměry vodních toků, zejména poboček hlavního toku, a tím i na charakter jejich geomorfologické činnosti (L. B. Leopold in W. L. Thomas ed. 1954, s. 922). Podrobnější výsledky výzkumu izostatického poklesávání zatížením nádrží byly dosud publikovány jen u přehrady Boulder Dam. Podle C. R. Longwella (In W. O. Smith et al. 1960, s. 33—38) má celkový pokles činit 27 až 40 cm. Do roku 1950 dosáhl největší pokles 17 cm. Hodnota maximálního celkového poklesu byla nověji zpřesněna na 1 m při rychlosti 4 mm/rok (J. F. Brothie, R. Silvester 1969).

Neočekávaným jevem, který se objevil rovněž až v souvislosti s výstavbou velkých přehrad, je aktivizace zemětřesné činnosti. Poprvé byla jednoznačně

zjištěna u přehrady Boulder Dam, postavené v r. 1935, zpětně se však tomuto vlivu připisalo zemětřesení v prostoru přehrady Maraton v Řecku v r. 1929. V tektonicky aktivních územích jako jsou Středomoří, Kalifornie a Japonsko se totiž mohou umělé faktory vyvolávající zemětřesení více než kde jinde kombinovat s faktory výlučně tektonickými. V tektonicky klidné oblasti Boulder Dam se první otřesy objevily během napouštění přehrady při výšce hladiny kolem 100 m. Nejsilnější otřesy byly zaznamenány po dokončení napouštění v roce 1939 (až M 5). Síla otřesů se od té doby snížila, byla však v úzké souvislosti na stavu vody v nádrži. Do r. 1973 přesáhl celkový počet otřesů číslo 10 000 (Bolt et al. 1974, s. 31). Podobné vztahy mezi napouštěním, stavem hladiny a seismickou činností jsou dnes již známy u velkého počtu přehrad. Poměrně silná zemětřesení byla zaznamenána na přehradě Kariba na řece Zambezi (výška hráze 128 m, nejsilnější otřes M 6,1), Kremasta v Řecku (160 m, M 6,3) a na 300 m vysoké Nurské přehradě v SSSR. V r. 1964 došlo v Indii v prostoru přehrady Koyna, v tektonicky zcela klidné oblasti Dekkanského plató, k zemětřesení o síle M 6,4 při němž zahynulo 180 lidí. Také u 261 m vysoké přehrady Vajont v Itálii, na níž došlo v r. 1963 k velké katastrofě v důsledku sesuvu, bylo pozorováno zvýšení seismické činnosti, která při dočasném snížení hladiny v nádrži opět poklesla (S. Müller 1970).

Bylo zjištěno, že uměle vyvolaná zemětřesení se zvláště často vyskytují u přehrad vyšších než 100 m. Byla však zaznamenána i u přehrad vysokých jen 40 m. Hypocentra těchto zemětřesení jsou většinou v prostoru pod nádrží, v hloubkách nejčastěji do 6 km (N. I. Nikolajev 1973, s. 6). Názory na příčinu vzniku otřesů nejsou jednotné. Někteří autoři je spatřují v porušení izostatické rovnováhy novým zatížením. Nověji se dává přednost výkladu, že zvýšený tlak puklinových a průlinových vod pod přehradou zmenšuje tření na již existujících tektonických poruchách, takže potřebné napětí k překonání meze pevnosti a tím vzniku otřesů je menší než tomu bylo v původních podmínkách. Přehrada zde tedy do značné míry působí jako „spouštěcí mechanismus“, který se může uplatnit zejména tam, kde je mnoho zlomů a území má kernou stavbu. Podrobně diskutuje možné příčiny a procesy vedoucí k umělým zemětřesením I. G. Kissin (1972). Význam tlaku podzemních vod pro aktivizaci zlomů byl prokázán zemětřeseními, která doprovázela vypouštění odpadních vod pod vysokým tlakem do hlubokého vrtu v Denveru v USA. Tento případ byl velmi široce komentován ve světové literatuře. Ještě instruktivnější svou komplexností je uměle vyvolané zemětřesení, které v r. 1963 zničilo nevelkou přehradu Baldwin Hills u Los Angeles a které vedlo k soudnímu sporu mezi tímto městem a naftovou společností, již se zemětřesení kladlo za vinu (A. H. Hamilton, R. L. Meehan 1971). Přehrada byla vybudována v r. 1951 v území protínaném řadou zlomů s prokazatelně kvarténními pohyby. Dno celé nádrže bylo pokryto nepropustným kobercem, znemožňujícím průsak vody do propustných podložních písků. Území je tvořeno terciárními sedimenty s velkými naftovými ložisky, která však byla vytěžena již ve třicátých letech. V šedesátých letech byla těžba obnovena pomocí vtlačování vody z vrtů. V r. 1963 došlo k aktivizaci zlomu na dně přehrady s vertikálním pohybem 15 cm a k protržení přehradní hráze. Za příčinu aktivizace zlomu bylo označeno zmenšení tření na zlomové ploše uměle zvýšeným tlakem průlinových vod.

Přestože uměle vyvolaná zemětřesení jsou jistě nežádoucím a často i nebezpečným jevem, nelze přehlédnout jejich teoretický význam pro seismologii a geologii. Jejich výzkum dává do budoucnosti určité naděje na ovládnutí ničivých zemětřesení tektonického původu.

Předkládaný přehled nemohl vyčerpat velmi složitou problematiku vztahů mezi přehradami na jedné straně a geologickou stavbou a reliéfem na straně druhé. Naším cílem bylo ukázat nutnost komplexního přístupu k výzkumu geologických a geomorfologických aspektů přehrad, tím spíše, že i u nás se v současné době staví několik velkých nádrží, jejichž stavba byla předmětem mnoha diskusí a jejichž dlouhodobým dopadem na reliéf si můžeme být jisti. Kromě toho mohou v důsledku svých rozměrů vyvolat u nás v této souvislosti neznámé jevy. Zároveň je třeba, aby přehradám byla věnována větší pozornost i z hlediska teoretické geomorfologie, neboť mohou sloužit jako modely pro sledování vývoje exogenních procesů.

Literatura

- BOLT B. A. ET AL. (1975): Geological hazards. 328 str., Berlin, Heidelberg, New York.
- BROTCHIE J. F., SILVESTER R. (1969): On crustal flexure. *Journal Geophys. Res.*, 74:5240—5252, Richmond.
- COATES D. R. ed. (1973): *Environmental geomorphology and landscape conservation*. Vol. III. Non — urban, 483 str., Stroudsburg, Pennsylvania.
- CORBEL J. (1959): Vitesse de l'érosion. *Zeitschrift für Geomorphologie, N. F.*, 3:1—23, Göttingen.
- EAKIN H. M. (1936): Silting of reservoirs. U.S.D.A. Technical Bulletin, 524, 128 str. Washington.
- HAMILTON D. H., MEEHAN R. L. (1971): Ground rupture in the Baldwin Hills. *Science*, 72:333—344, Washington.
- HAMMER T. R. (1972): Stream channel enlargement due to urbanization. *Water Resource Research*, 8: 1530—1540, Washington.
- HOLMES A. (1965): *Principles of physical geology*. 1288 str., London.
- CHORLEY R. J. (1962): *Geomorphology and general systems theory*. Geol. Survey Prof. Paper 500 — B, 10 str., Washington.
- CHORLEY R. J. ed. (1969): *Water, Earth and Man*. 538 str., London.
- KISSIN I. G. (1972): O probleme zemletrjasenij vyzvannyh inženěrojnojj dějatel'nostju. *Sovetskaja geologija*, 15:2:68—80, Moskva.
- KRATOCHVÍL S. (1961): *Vodní nádrže a přehrady*. 955 str., Praha.
- KUKAL Z. (1964): *Geologie recentních sedimentů*. 441 str., Academia, Praha.
- LEOPOLD L. B. (1973): River channel change with time: an example. *Geological Society of America Bulletin*, 84:1:1845—1860, Boulder, Colorado.
- LEOPOLD L. B., LANGBEIN W. B. (1962): The concept of entropy in landscape evolution. *Geol. Survey Prof. Paper 500—A*, 20 str., Washington.
- LEOPOLD L. B., MADDOCK T. (1953): The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *Geol. Survey Prof. Paper 252,57 str.*, Washington.
- LEOPOLD L. B., WOLMAN M. G., MILLER J. P. (1964): *Fluvial processes in geomorphology*. 522 str., San Francisco and London.
- LINHART J. (1964): Abrasní činnost na Knáničské přehradě. *Sborník ČSZ*. 59:185—196, Praha.
- LOPATIN G. V. ed. (1965): *Vodnyj balans i zailenije malych vodochranilišč černo-zemnovo centra RSFSR*. 241 str., Moskva — Leningrad.
- MACKIN J. H. (1848): Concept of the graded river. *Geological Society of America Bulletin*. 59:463—512, New York.
- MAKKAJEV N. I. ET AL. (1961): *Ekspierimentalnaja geomorfologija*. 194 str. Moskva.
- MATTHEWS R. K. (1974): *Dynamic stratigraphy*. 370 str. Englewood Cliffs, New Jersey.
- MORISAWA M. (1960): *Streams, their dynamics and morphology*. 175 str., New York.
- MÜLLER S. (1970): Man — made earthquakes. *Ein Weg zum Verständnis natürlicher seismischer Aktivität*. *Geologische Rundschau*. 59:792—805, Stuttgart.
- NIKOLAJEV N. I. (1973): *Iskusstvennyje zemletrjasenija*. *Priroda* 7:2—17, Moskva.
- SCHUMM S. A. (1963): The disparity between present rates of denudation and orogeny. *Geol. Survey Prof. Paper 454 H*, 13 str., Washington.

- SCHUMM S. A., LICHTY R. W. (1965): Time, space and causality in geomorphology. American Journal of Science, 263:110—119. New Haven.
- SMITH N. (1971): A history of dams. 279 str., London.
- SMITH O. W. ET AL. (1960): Comprehensive survey of sedimentation in Lake Mead, 1948—49. Geol. Survey Prof. Paper 295.245 str., Washington.
- ŠANCER E. V. (1961): Tipi alluvialnych otloženij. Voprosy geologii antropogena, 188—199, Moskva.
- THOMAS W. L. ed. (1956): Man's role in changing the face of the Earth. 1193 str., Chicago and London.
- TRASK P. D. ed. (1950): Applied sedimentation. 707 str., New York — London.
- WAHLSTROM E. E. (1974): Dams, dam foundations, and reservoir sites. 278 str., Amsterdam — Oxford — New York.
- WOLMAN M. G., LEOPOLD L. B. (1957): River flood plains: some observations on their formation. Geol. Survey Prof. Paper 282—C, 107 str., Washington.
- WRIGHT H. G., FRYE J. C. eds. (1968): The Quaternary of the United States; ruské vydání Četvertičnyj period v SŠA. 696 str., Moskva.
- ZÁRUBA Q. ET AL. (1967): Geologie přehrad na Vltavě. 222 str., Academia, Praha.
- ZÁRUBA Q., MENCL V. (1957): Inženýrská geologie. 486 str., Academia, Praha.

Summary

SOME GEOMORPHOLOGICAL AND GEOLOGICAL ASPECTS OF WATER DAM BUILDING

The article is a review of the present knowledge of relations between geomorphological and geological processes on one side and dams and reservoirs on the other side. In the paper the author discusses 1) the problems of denudation in river basins in connection with silting of reservoirs, 2) the effects of dams on the course of fluvial processes both upstream and downstream of dams and 3) the endogenic aspects of dam building (isostatic adjustment and induced earthquakes). Not only practical but also theoretical importance of study of these problems is stressed.

GEOGRAFIE A ŠKOLA

VÁCLAV NĚMEČEK

JEDNOTNÁ PŘÍPRAVA UČITELŮ GEOGRAFIE V NDR

Učitelství zeměpisu pro všeobecně vzdělávací polytechnickou střední školu se studuje podle jednotných učebních plánů a osnov jak na vysokých školách pedagogických, tak i na univerzitách. Učitelské studium je čtyřleté dvouoborové a jeden z předmětů se studuje jako hlavní. Je tedy možno studovat zeměpis jako hlavní nebo vedlejší obor. Nové jednotné učební plány a osnovy byly vypracovány ústředními oborovými komisemi pro zeměpis a pro metodiku vyučování zeměpisu při ministerstvech pro lidové vzdělávání a pro vysoké a střední odborné školství v letech 1975—1976.