

PETER DANIŠOVIČ

## O PRÍČINÁCH PRIETRŽE DUNAJSKEJ HRÁDZE PRI KLÚČOVCI

In June 1965, during the long-lasting flood on the Danube, the left-sided counterflood dam broke at Klúčovec (Danube river-kilometre 1801) and all the lower part of the Great Schütt (Žitný ostrov) in an area of 55 000 ha was overflowed. The cause of the dam breaking from the hydrotechnical point of view is explained by the author. For the final consequence, the dam-base of a small stability against filtration stress was the cause of breaking.

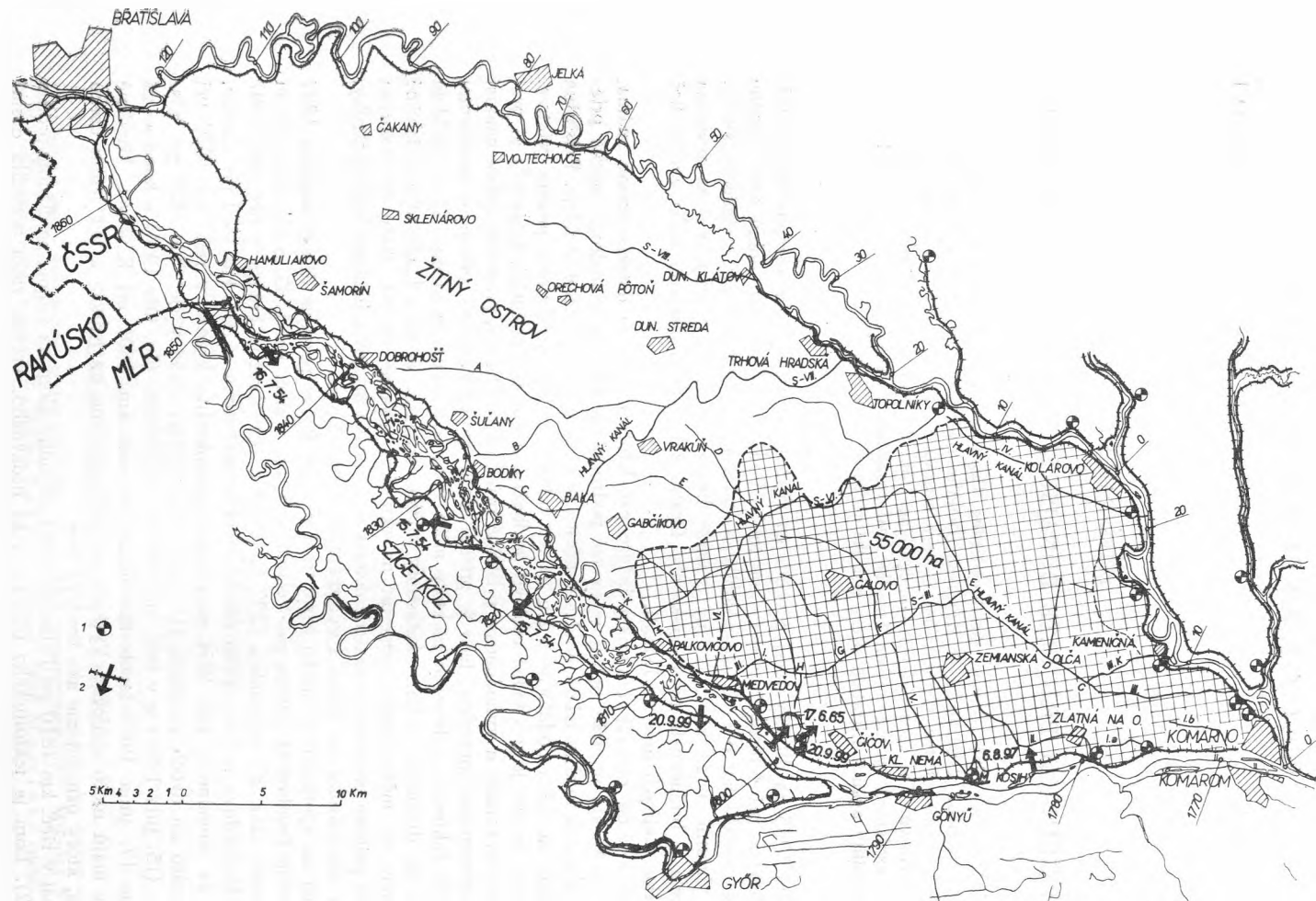
V júni 1965 za dlhotrvajúcej povodne na Dunaji sa pretrhla lavostranná protipovodňová hrádza pri Klúčovci v rieč. km 1801. Voda zaplavila celú dolnú časť Žitného ostrova (55 000 ha, obr. 1) a spôsobila čs. národnému hospodárstvu nesmierne škody. Je nevyhnutné teraz zistiť príčinu prietrže hrádze a urobiť všetko, aby sa podobná katastrofa v budúcnosti už neopakovala. Draho zaplatené skúsenosti treba využiť tiež v projekte vodných diel na Dunaji.

Pravá príčina prietrže dunajskej hrádze pri Klúčovci nie je doteraz presne známa, pretože v mieste prietrže neboli vykonané podrobné geologické a hydrogeologické prieskumy a ani o kvalite telesa hrádze v mieste prietrže nemáme potrebné údaje. Príslušné prieskumy sa robia dodatočne a len na ich základe sa má určiť pravá príčina prietrže.

Myslím, že nie je nevhodné vysloviť predbežnú mienku o príčinách katastrofy aj prv, ako budú vykonané a vyhodnotené príslušné prieskumy. Pravda, predbežný názor nemusí byť stopercentnou pravdou, lebo k prietrži došlo pravdepodobne súčasným pôsobením viacerých faktorov, z ktorých niektorý môže nám byť dosiaľ neznámy. Ale v každom prípade sa diskusiou príčiny katastrofy bližšie ozrejmia a na základe toho príslušné prieskumy sa môžu lepšie usmerniť na skutočne nejasné miesta. Ďalej sa pokúsím vysvetliť príčinu prietrže na základe doteraz dostupných údajov z hľadiska hydrotechniky, pravda, bez nároku na úplné a vyčerpávajúce vysvetlenie.

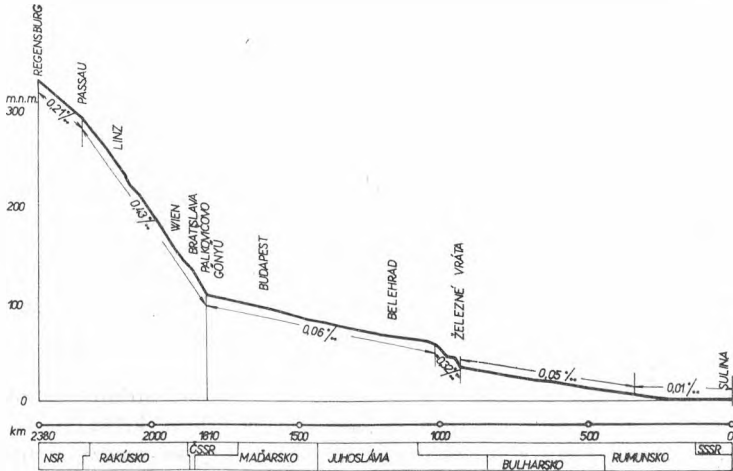
Dunaj na spomenutom úseku často trhal hrádze. Počas povodne dňa 6. augusta 1897 sa pretrhla lavobrežná hrádza pri Veľkom Léli, asi v rieč. km 1783, o dva roky potom za povodne dňa 20. septembra 1899 sa pretrhla pravobrežná hrádza v rieč. km 1807 oproti Medvedovu a toho istého dňa aj lavobrežná hrádza v rieč. km 1800 pri Čičove, potom za povodne v júli 1954 sa pretrhla pravobrežná hrádza v rieč. km 1820 pri Ásványráro na dvoch miestach (15. a 16. júla 1954), ďalej v rieč. km 1828 pri Kisbodaku (15. júla 1954) a v rieč. km 1846 pri Dunakiliti (16. júla 1954) a konečne za povodne 17. júna 1965 lavobrežná hrádza v rieč. km 1801 pri Klúčovci. Uvedené prietrže majú niečo spoločné. Vyskytli sa totiž približne na jednom a tom istom úseku Dunaja, ktorý označujeme ako brodový úsek.

Dunaj v rieč. km 1810 pri Palkovičove má nápadný zlom na svojom pozdĺžnom profile (obr. 2). Lom je tektonického pôvodu, a to nedávneho, pretože rieka nestačila dosiaľ



Obr. 1. Prietrže dunajských hrádzi a záplava dolnej časti Žitného ostrova po prietrži ľavostrannej protipovodňovej hrádze pri Klúčovi počas povodne v júni 1965. 1 — čerpacie stanice, 2 — miesta prietrží.

zlom vyrovnáť. Podunajská nížina medzi Bratislavou a Komárnom je poklesové územie, ktoré geológovia označujú ako Komárnanskú kotlinu. Hlboká kotlina je vyplnená neogénnymi morskými a jazernými sedimentmi a kvartérnymi riečnymi nánosmi. Od dôb tretohorných až podnes kotlina poklesáva. Dunaj po prechode cez „devínsku bránu“ dostáva sa pod Bratislavou do tejto poklesovej kotliny, kde v dôsledku náhlej straty sklonu a prietocnej rýchlosti ukladá dovlečené štrky v obrovskom náplavovom kuželi, ktorého vrchol sa nachádza pri Bratislave a základňa približne na zlome sklonu pri Palkovičove. Nánosmi sa postupne predlžuje smerom po toku. Ukladáním štrkov si Dunaj vyrovnáva zlom v pozdĺžnom profile do rovnovážnej krivky, aká je charakteristická pre všetky vývojovo ustálené rieky. Pozdĺžny profil Dunaja na úseku Bratislava — Komárno je teda dosiaľ vývojovo neustálený a k jeho ustáleniu by mohlo dôjsť za niekoľko stotisíc rokov, za predpokladu, že by Komárnanská kotlina prestala poklesávať.



Obr. 2. Schematický pozdĺžny profil Dunaja.

Pri prechode do Komárnanskej kotliny Dunaj ukladá ročne asi 400 000—500 000 m<sup>3</sup> splavenín. Štrky sa ukladajú na úseku rieč. km 1790 až rieč. km 1850. Nateraz ukladajú sa prevažne v hlavnom koryte Dunaja, kde vytvárajú štrkové lavice, plytčiny, brody s nedostatočnými plavebnými hĺbkami (preto sa celý tento úsek označuje ako brodový) a riečne ostrovy. Štrkovými nánosmi sa prietočná kapacita koryta značne znižuje a potom voda sa musí z koryta vylievať a hľadať si nové korytá.

V dôsledku akumulačnej činnosti si Dunaj na tomto úseku vytváral stále nové ramená a divočil. Už pri pohľade na mapu zistíme, že brodový úsek pod Bratislavou je pozoruhodným fenoménom. Rieka tečúca po náplavovom kuželi má koryto rozbité na hustú spleť vedľajších ramien. V kuželi pod Bratislavou vidíme tri ramená (hlavný tok so spleťou vedľajších ramien, Malý Dunaj a Mošonské rameno).

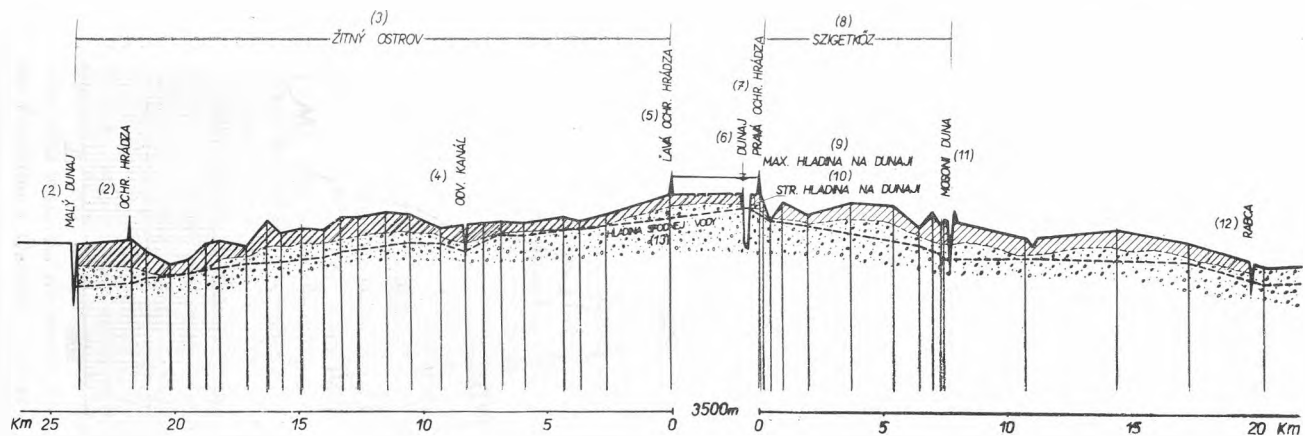
V rozľahlom náplavovom kuželi pod Bratislavou sa uložia prakticky všetky štrky, ktoré rieka prináša z Alpskej oblasti, takže niže pod Komárnom Dunaj unáša už len piesok a jemné splaveniny. Najintenzívnejšie ukladanie štrkov za obdobie 1901—1950 sa zistilo na úseku pri Gabčíkove (rieč. km 1820), kde za 50 rokov sa koryto Dunaja zdvihlo asi o 150 cm. V dôsledku regulačných prác na Dunaji a najmä v dôsledku

koncentračných stavieb na brodovom úseku sa teraz posunuje úsek intenzívneho ukladania štrkov smerom po vode, teda z úseku nad Palkovičovom do úseku pod Palkovičovom. Najintenzívnejšie zanášanie koryta sa teraz pozoruje na úseku Palkovičovo—Medvedov—Klišská Nemá.

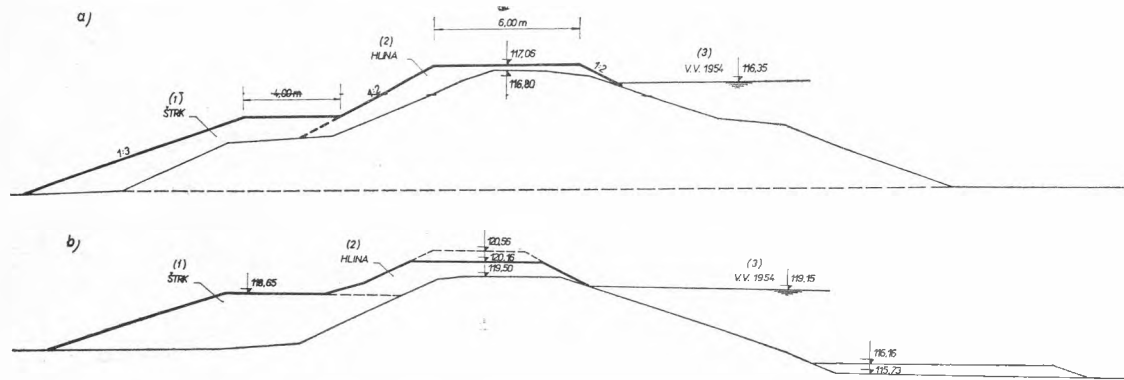
Neustále zdvíhanie koryta má za následok tiež neustále zvyšovanie hladiny Dunaja. Koryto na brodovom úseku leží na chrbte mohutného nánosového kužeľa, t. j. vo vyvýšenej polohe. V pričnom údolnom profile územia sa skláňa od Dunaja naľavo smerom k Malému Dunaju a napravo smerom k Mošonskému ramenu (obr. 3). Pri každej povodni voda z Dunaja by sa rozlievala na obidve strany a zaplavovala by celú Podunajskú nížinu. Človek však chcel na tejto, ináč úrodnej nížine zaviesť intenzívnu poľnohospodársku výrobu, nerušenú častými záplavami, a preto po obidvoch stranách Dunaja vybudoval, najmä v druhej polovici minulého storočia, súvislé protipovodňové hrádze. Konečnú ich výšku ustálil na základe zameranej hladiny povodne r. 1889, ktorá sa považovala za najvyššiu v minulom storočí, takže k zameranej výške hladiny pridal 1,50 m ako rezervu na prípadné vlny, očakávané nánosy v koryte a pod. Pri povodni r. 1954, ktorá bola približne rovnako vysoká ako povodeň r. 1889, sa však konštatovalo, že pôvodne stanovená výšková rezerva hrádze sa za uplynulé obdobie už stratila, lebo hladina povodne na zlomovom úseku (brodovom úseku) siahala až ku korune hrádzí a len urýchlenným dospávaním koruny hrádze počas povodne sa podarilo zabrániť preliatiu hrádze, a tým obrovskej katastrofe. Stratu výškovej rezervy protipovodňových hrádzí nemožno si vysvetliť ináč ako zvýšením koryta v dôsledku ukladania štrkov. Teda neustálym ukladaním štrkov v koryte Dunaja na brodovom úseku protipovodňové hrádze stávajú sa stále nižšími a ich bezpečnosť proti preliatiu sa stále znižuje. Súčasne sa však zvyšuje aj výškový rozdiel hladiny v Dunaji a v chránenom území, t. j. zvyšuje sa pretlak vody z Dunaja, zvyšuje sa filtračné prúdenie, a tým sa znižuje bezpečnosť hrádzí.

Na zvyšovanie hladiny povodní pôsobí však aj iný faktor. Štrkové ostrovy vynorené z vody veľmi rýchlo zarastajú. Najprv sa tam uchytiťa vrbové kríky, neskôršie však aj iné stromy. Dunajské ostrovy a vôbec celé inundačné územie medzi protipovodňovými hrádzami, určené pre odtok veľkých vôd, je porastené bujnými lužnými lesmi s veľmi hustým podrastom. Na tejto húštine sa zachytávajú plávajúce predmety (stromy, haluze, listie), ktoré ešte viac upchávajú prietočný profil a v takto zaškrtenom prietočnom profile hladina sa vzdúva. Ďalej aktívne ramená majú veľmi nepravidelnú a pre odtok veľkých vôd dosť nevýhodnú trasu. Prúd vody z bočných ramien na niektorých miestach naráža skoro kolmo na prúd vody v hlavnom koryte, a tak vzniká vírnaté prúdenie a straty na spáde a hladina sa zvyšuje. Konečne trasa hlavného koryta na niektorých miestach nevýhodne križuje hlavný smer povodne, čo tiež nepriaznivo vplýva na výšku hladiny. Protipovodňové hrádze na niektorých úsekoch majú tiež nepriaznivú trasu pre odvádzanie vody počas povodne. To všetko spôsobuje, že hladina počas povodne sa zvyšuje a bezpečnosť protipovodňových hrádzí sa znižuje.

Výška povodňovej hladiny je však rozhodujúcim faktorom pri ochrane nízkopoloženého územia, nielen pokiaľ ide o bezpečnosť hrádzí proti preliatiu, ale aj pokiaľ ide o ich bezpečnosť proti podometiu tzv. sufóznymi účinkami, pravda, pri bezpečnosti proti podometiu okrem výšky povodňovej hladiny uplatňuje sa tiež faktor času, t. j. trvanie zvýšenej hladiny. Pri povodni r. 1954 sa usudzovalo, že dunajské hrádze na čs. strane sú dostatočne silné, pretože odolali náporu najväčšej doteraz zaznamenatej povodne, len sa ukázali už nízke. Preto boli v rokoch 1958—1960 dosypané na profil, vyznačený na obr. 4. Pri tomto prevýšení hrádzí sa súčasne rozšíril aj ich základ, a tým sa zvýšila tiež ich stabilita.



Obr. 3. Údolný priečný profil v rieč. km 1827 Dunaja. 1 — Malý Dunaj, 2 — ochranná hrádza, 3 — Žitný ostrov, 4 — odvodňovací kanál, 5 — ľavá ochranná hrádza, 6 — Dunaj, 7 — pravá ochranná hrádza, 8 — Szigetköz, 9 — maximálna hladina na Dunaji, 10 — stredná hladina na Dunaji, 11 — Mosoni Duna, 12 — Rabca, 13 — hladina spodnej vody

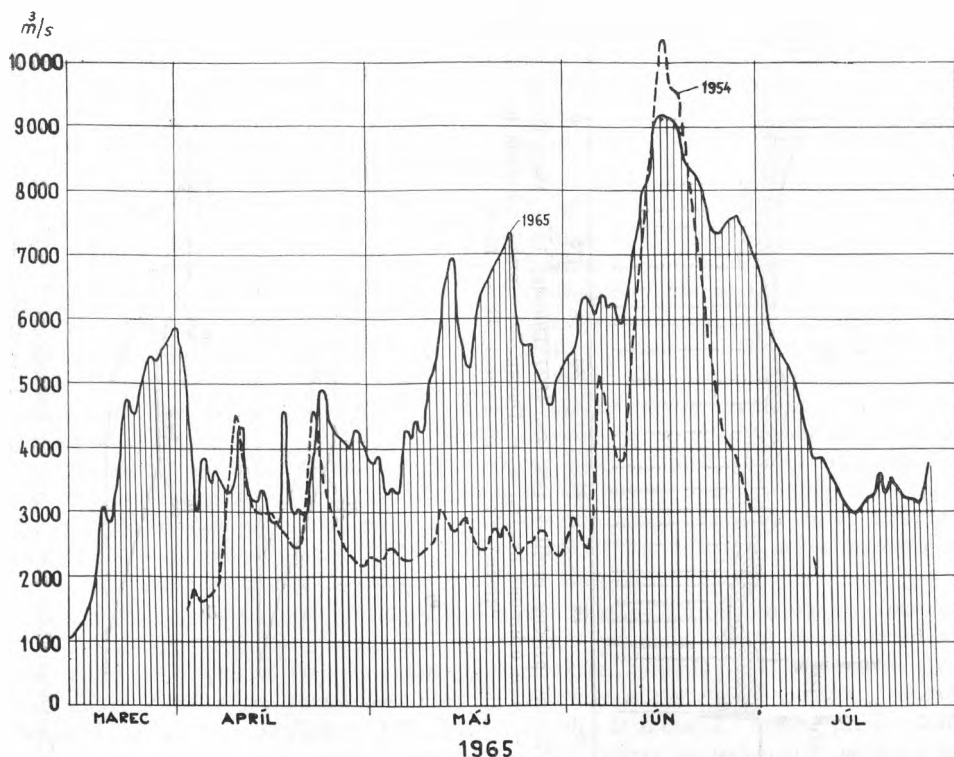


Obr. 4. Charakteristické priečne profily ľavostrannej dunajskej hrádzy po rekonštrukcii v rokoch 1955–1960. a — pri Gabčíkove, b — pri Kľúčovci, 1 — štrk, 2 — hlina, 3 — výška hladiny povodne r. 1954.

Povodeň v júni 1965 ukázala, že opatrenia z rokov 1958—1960 nezabránili prietrži ľavostrannej hrádze, hoci v pôvodnom nezosilnenom stave r. 1954 vydržala nápor povodňového prietoku 10 400 m<sup>3</sup>/s, no r. 1965 napriek značne zosilnenému profilu nevydržala nápor povodne o prietoku 9000 m<sup>3</sup>/s. Vysvetliť si to môžeme len tak, že kulminácia povodne v Bratislave r. 1954 bola síce vyššia (a v profile Klúčovec asi rovnaká), ale jej priebeh bol pomerne krátky oproti povodni r. 1965 (obr. 5). Tu, zrejme, silne zapôsobil faktor času, t. j. dlhé pôsobenie vysokého pretlaku vody. Jedno je isté, že dunajská hrádza pri Klúčovci nebola preliata vysokým vodným stavom v Dunaji, lebo koruna ľavobrežnej hrádze bola aj počas kulminácie povodne asi o 130 cm vyššia ako hladina v Dunaji v tomto mieste. Preliatie hrádze ako možná príčina prietrže sa teda vylučuje, čo potvrdzujú tiež očití svedkovia, ktorí boli na mieste v okamihu pretrhnutia hrádze.

Druhou príčinou pretrhnutia hrádze by mohlo byť jej ušmyknutie na klzkom a rozbahnenom podloží pôsobením vodného tlaku. Túto možnú príčinu deštrukcie hrádze očití svedkovia tiež vylučujú. Koruna hrádze sa v okamihu deštrukcie neposunula, ale zvisle prepadla.

Tretou možnou príčinou prietrže by bolo porušenie stability vzdušného svahu hrádze filtračným prúdom vody, presakujúcim cez hrádzové teleso. Silný filtračný prúd by mohol vyvolať zosuv vzdušného svahu. Očití svedkovia katastrofy nespozorovali takýto



Obr. 5. Chronologická čiara prietoku na Dunaji v profile Bratislava počas povodne r. 1965 a premietnutá čiara povodne r. 1954.

úkaz. Ostatne hrádza bola rekonštruovaná, ako sme už uviedli, v rokoch 1958—1960 a dostala rovnaký profil z rovnakého materiálu ako na iných úsekoch, ktoré náporu povodne dobre odolali. Príčina prietrže neväzí teda v telese hrádze, ale v jej podloží. Svedčia o tom mnohé okolnosti.

O prietrži hrádze pri Klúčovci máme tieto svedecké výpovede: Tajomník MNV v Klúčovci s. Čičmanec hovorí, že v čase od 22. do 26. mája 1965, keď konal pohotovostnú službu na hrádzi, pozoroval na úseku, kde neskoršie došlo k prietrži, asi 7 jednotlivých výverov, ktoré boli vzdialené od päty hrádze asi 2 m. Boli pomerne slabé a vytekajúca voda bola čistá. Keď 12. júna 1965 opäť nastúpil do pohotovostnej služby na hrádzi, videl, že výverov na dotyčnom úseku bolo už viac (asi 11) a niektoré boli ohradené betónovými skružkami („hrncami“). Niektoré vývery však boli už zaliate vodou, ktorá sa nazhromaždila v priehlbni pri päte hrádze. Zátopa mohla mať hĺbku 20 cm až 1 m. Niektoré vývery vynášali aj piesok a vzduchové bubliny. Terén pri päte hrádze bol pružný a pri chôdzi „fučal ako roztrhaná harmonika“. Jednotlivé vývery však neboli veľké a nezdalo sa, že by mohli byť nebezpečné, lebo vytekajúca voda bola čistá. Do polnoci 16. júla 1965 sa vývery podstatne nezväčšili.

Andrej Gál z Klúčovca, člen druhej pohotovostnej skupiny, ktorý nastúpil službu na hrádzi po polnoci, spozoroval za svitania (asi medzi 4. a 5. hod.), že z jedného prameňa vyteká kalná voda. Hneď vec hlásil na MNV a žiadal o pomoc. Asi o 5,30 hod. prišli na miesto výverov pri hrádzi dve traktorové vlečky naložené vrecami s pieskom a asi 20 družstevníkov z obce. Vrecami ohradili kalný výver, ktorý mal, zrejme, silnejší tlak a hrúbku „ako ruka“. Voda vo vývere bola vzduťatá, spočiatku asi 10—15 cm nad hromádkou piesku o priemere 30—50 cm. Výver obložili vrecami na výšku asi 1 m. Vedľa ohrádzky sa vytvoril nový kalný výver, ktorý lokalizovali obdobne ohrádzkou z pieskových vriec, ktoré medzitým doviezli vojaci. Spoločným úsilím vybudovali ohrádzku okolo nového výveru z dvoch radov vriec do výšky asi 1,5 m, keď vedľa vo vzdialenosti asi 4—5 m smerom po vode vyrazil ďalší výver, ktorý mohol mať priemer asi 40 cm, šľahal do výšky najprv asi 1 m, o chvíľu až do výšky hrádze (približne) a bol veľmi kalný. Na lokalizáciu tohto silného výveru nemali poruke zásobu vriec naplnených zeminou, preto poslali vlečky pre novú zásobu vriec. Zatiaľ hodili do krátera výveru niekoľko vriec naplnených pieskom, ale silný prúd vody ich vyhodil. Kráter bol asi 2 m od päty hrádze. K vytvoreniu gejzíru došlo asi o 9,30 hod. 17. 6. 1965. Na hrádzi neboli zrejme nijaké trhliny alebo poklesy.

Tesne pred pretrhnutím hrádze (asi 10,30 hod.) pribehol na miesto inž. Šmelko z VUIS Bratislava. Udáva, že pri päte hrádze vytekala už mohutný prúd kalnej vody (asi 1—5 m<sup>3</sup>/s), no hrádza ešte stála. Otvor pri päte hrádze sa rýchlo rozširoval. Na návodnej strane hrádze voda začala víriť a vyvracať lesný porast. O niekoľko minút sa koruna hrádze prepadla a voda začala prúdiť prietržou a odnášať vyvrátené stromy. K prietrži došlo asi o 10,50 hod. Prietrž sa rýchlo rozširovala a konečne sa ustálila na šírke 85 m. Hĺbka výmoľa spôsobeného silným prúdom vody cez prietrž bola od 10 do 22 m pod korunou hrádze. Prietržou vnikalo do priestoru Žitného ostrova asi 1200 m<sup>3</sup>/s. Voda postupne zaplavovala územie smerom na Gabčíkovo, potom severne na Čalovo, Kolárovo a východne na Komárno. Záplava pred Kolárovom mala byť zachytená narýchlo vybudovanou ochrannou hrádzou pri samotnej obci. Provizórna hrádza však nápor vody nevydržala a Kolárovo bolo tiež zaplavené. Pred Komárnom sa povodňová vlna zastavila na novovybudovanej hrádzi pred mestom. Pred záplavou sa ochránilo iba Komárno a Čalovo, čiastočne Opatovský Sokolec, Zemianska Olča a Okoličné, ináč celý dolný Žitný ostrov bol zaplavený.

Pretože obdobná katastrofa sa udala r. 1954 na pravostrannej (maďarskej) hrádzi

v rieč. km 1820 pri Ásványráro za obdobných hydrologických, geologických a hydrogeologických podmienok, bude zaujímavé prečítať si zprávu maďarského svedka tejto prietrže. Prípad opisuje inž. László Marek, ktorý asi pol hodiny pred pretrhnutím hrádze (15. júla 1954 o 10. hod.) kontroloval hrádzu a pozoroval najmä jej vzdušný svah. Terén pri vzdušnej päte hrádze bol zaliaty asi 20–30 cm vrstvou čistej priesakovej vody. Na mieste, kde neskoršie bola hrádza pretrhnutá, nespozoroval pri pochôdzke nič podozrivé. Keď sa potom vrátil na toto miesto, spozoroval, že vo vzdialenosti asi 5 m od päty hrádze vystrekoval do výšky asi 1,40 m vodný prúd o priemere asi 1 m. O niekoľko sekúnd po výstreku spozoroval na návodnej strane hrádze na hladine asi vo vzdialenosti 10 m od koruny hrádze mohutné vírenie vody, pričom sa v hladine vytvoril lievik. Gejzír na vzdušnej strane o nejakú minútu zosilnel asi na 1,50 m a potom náhle ustal. Pravdepodobne v dôsledku závalu v podloží hrádze. V tomto okamihu vzdušný svah a koruna hrádze ešte pevne stáli. Potom asi o pol minúty sa objavil na mieste pôvodného výveru nový gejzír o šírke značne väčšej (asi 4 m) a striekal do výšky asi 0,5 m. Vytekajúca voda bola veľmi kalná. Asi o ďalšiu polminútu koruna hrádze hlboko zaklesla a voda sa začala valiť cez prietrž mohutným prúdom. Všetko toto sa odohralo v niekoľkých minútach. Prerava zo začiatku bola široká asi 7–8 m, o ďalšie minúty sa rozšírila na 10–12 m a o ďalších šesť hodín na 45 m. V maďarských zprávkach sa píše, že k prietrži došlo na neočakávanom mieste, bez akéhokoľvek predchádzajúceho náznaku a že prerava sa tak rýchlo rozšírila, že bolo celkom nemožné ju uzavrieť, alebo čo i len obmedziť ľudskými a materiálými prostriedkami, ktoré stáli k dispozícii (Ihrig Dénes—Lászlóffy Woldemár, *A Duna júliusi árvize*, Külömnymomat a Magyar Technika 1954, évi 11. számból).

Zaujímavý je tiež opis prietrže lavostrannej hrádze pri Čičove počas povodne r. 1899. Dňa 20. septembra 1899 sa pri vzdušnej päte hrádze objavil sústredený výver. Výverové miesto prikryli vrecami naplnenými zeminou. Nato vo vzdialenosti asi 2 m od päty hrádze sa vytvoril nový výver, do ktorého tiež hádzali vrecia naplnené zeminou. Vytvárajúci prúd vody sa však zosilňoval a voda vystrekovala až do výšky človeka. Vtedy už aj na návodnej strane spozorovali na hladine vody vír. Počas niekoľkých minút hrádza sa prepadla. O niekoľko hodín prerava dosiahla šírku 160 m a potom sa rozšírila až na 255 m (Balint István, *Az alsóczallóközi és csilizkőzi ármentesítő és belvizlevezető társulat 1876—1926*, Komárom 1926).

Z uvedených opisov troch prietrží hrádze, ktoré sa odohrali približne na tom istom úseku Dunaja, je zrejmé, že všetky mali približne rovnaký priebeh, a teda aj rovnakú príčinu. Vo všetkých troch prípadoch došlo k prelomeniu podložia hrádzí sústredeným priesakovým prúdom vody.

Pre bezpečnosť hrádzí sú teda veľmi nebezpečné miesta, kde v ich podloží sa bezprostredne striedajú hrubozrnné, veľmi priepustné vrstvy štrku s vrstvami alebo vložkami (šošovkami) veľmi jemného až prachovitého piesku, málo priepustného a kde štrkové koryto Dunaja priamo komunikuje s veľmi priepustnými štrkovými vrstvami podložia hrádzí pri pomerne krátkej priesakovej dráhe. Takáto skladba podložia sa zistila pri orientačnom geologickom prieskume podložia lavostrannej dunajskej hrádze r. 1955. Geologickým vrtom S137, vyhlbeným na vzdušnej päte hrádze niečo vyššie smerom proti toku nad terajšou prietržou, sa zistila napr. táto skladba podložia: do hĺbky 1,65 m hlina, v hĺbke 1,65–7,80 m hlinitý piesok, v hĺbke 7,80–19 m štrk, v hĺbke 19–19,20 m hlina a v hĺbke 19,20–21 m opäť štrk. Zistený koeficient priepustnosti štrkových vrstiev bol miestami až 1000 krát väčší ako pri vrstvách jemnopiesčitých alebo hlinitopiesčitých, t. j. štrkovou vrstvou voda presakuje až 1000 krát rýchlejšie ako susednou jemnopiesčitou. Štrkovými vrstvami pri krátkej priesakovej dráhe za väčšieho



pretlaku voda teda prúdi skoro ako potrubím a pri silnom prúdení strháva jemné častice z kontaktných vrstiev jemného až prachovitého alebo hlinitého piesku. Strhnuté jemné častice prúd vody prepravuje cez hrubé póry štrkovej vrstvy a vynáša ich na povrch v sústredených výveroch (obr. 6). Premiestovanie jemných častíc filtračným prúdom vody označujeme názvom sufózia. Odnášaním jemných častíc filtračným prúdom vody cez hrubozrnnú vrstvu štrkov vznikajú v podloží hrádze zväčšené póry až duté priestory, v ktorých sa prietok vody uľahčuje a urýchľuje odnášanie jemných častíc z kontaktnej vrstvy. Do vytvorených dutých priestorov sa potom hrádza prevalí (porušenie filtračnej stability podložia, prietrž hrádze prevalením podložia).

Striedanie vrstiev hrubšieho a jemnejšieho zrna dunajských nánosov v dotyčnej oblasti možno vysvetliť častým striedaním sedimentačných cyklov režimu riečného s režimom jazerným. Táto oblasť, ako sme už uviedli, leží na prechode medzi horným a dolným úsekom Dunaja, teda na nápadnom zlome pozdĺžneho profilu Dunaja (obr. 2). Na tomto prechodnom úseku sa počas malých prietokov vytváral riečny sedimentačný režim, veľký sklon hladiny sa predlžoval nižšie a v dunajskom koryte sa ukladali len hrubšie sedimenty, kým jemnejšie častice splavenín odnášal vodný prúd ďalej. Počas povodní zasa bol tu jazerný sedimentačný režim, lebo pred vybudovaním protipovodňových hrádzí sa v Komárňanskej kotline vytvárala počas každej povodne široká záplava, jazero s nepatrnými prietočnými rýchlostami a v dôsledku toho jazerný sedimentačný režim. Teda sa tu ukladali tiež jemné piesky a hlina, ktoré by Dunaj ináč odnášal až do Čierneho mora.

Odtok vody zo širokej Komárňanskej kotliny cez pomerne úzke hrdlo „vyšehradskej brány“ trval, prirodzene, dlhšie ako prítoková povodňová vlna do tohto jazera, a preto tiež jazerný sedimentačný cyklus trval dlhšie ako vlastná povodeň.



Obr. 6. Drobné vývery za hrádzou s vynášaním jemného piesku — sufózne javy. (Maximálny priemer zrna piesku 1 mm, asi 50 % priemer zrna 0,1–0,25 mm.)

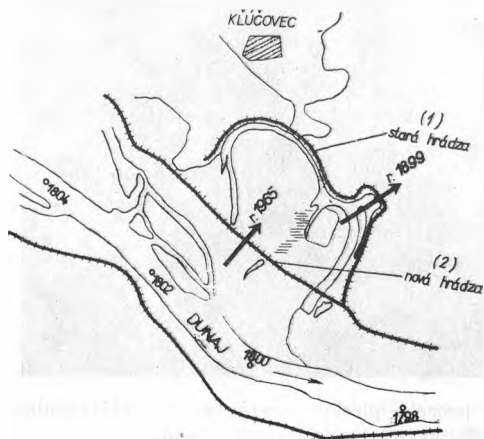
Po prechode povodne a postupnom vyprázdení komáriňanského jazera si Dunaj eróziou vytváral nové koryto vo vlastných nánosoch. Jemné nánosy vyerodoval a koryto si zasa vystlal zrnom, ktoré odpovedalo zväčšenej vlečnej sile toku na tomto úseku. Na prechodnom úseku dochádzalo k striedavému triedeniu splavenín podľa jestvujúcej vlečnej sily vodného prúdu. Hrubé splaveniny (štrky), ktorých váha prevyšovala medznú vlečnú silu vodného prúdu, sa usadzovali v koryte rieky a jemnejšie odnášal vodný prúd ďalej.

Na starších i novších mapách Podunajskej nížiny, najmä na leteckých fotosnímках územia, sú zrejme bývalé ramená rieky, ktorá meandrovala vo vlastných nánosoch. Dno ramien, aktívnych i mŕtvych, najmä v pruhu bývalej prúdnice toku, je vystlané hrubším štrkom. Odstavené mŕtve ramená neskoršie boli vyplnené jemnejším pieskom alebo bahnom na štrkovom podloží dna.

Trasa protipovodňových hrádzí prechádza cez mnohé jemnými nánosmi vyplnené bývalé ramená rieky a ich meandre, t. j. križuje bývalé korytá Dunaja, dolu vystlané štrkom a hore vyplnené jemnými nánosmi. Na mnohých miestach bývalé korytá Dunaja prechádzajú skoro kolmo pod hrádzami (obr. 7), a teda na mnohých miestach v podloží hrádzí prebieha skoro kolmo na trasu hrázde súvislá vrstva hrubozrnných štrkov (dnová výstelka bývalého koryta) silne priepustných. Ak táto silne priepustná vrstva náhodou komunikuje s terajším dunajským korytom a na pomerne krátkej vzdialenosti tiež s priestorom za hrádzou, potom za povodňovej hladiny dochádza k silnému filtračnému prúdeniu vody cez túto privilegovanú vrstvu a k odplavovaniu jemných častíc z kontaktnej plochy jemných náplavov.

Pri kontaktnej horizontálnej sufózii sa uplatňuje veľmi silno faktor času. Trvá to určité obdobie, než prúd presakujúcej vody odnesie z kontaktnej plochy taký objem jemných častíc, že sa vytvorí väčšia súvislá dutina, do ktorej sa potom nadložie preválí. Tým sa dá vysvetliť, že nezosilnená dunajská hrádza r. 1954 vystavená rovnakému vodnému pretlaku, pravda, kratšie trvajúcemu, ostala neporušená, kým r. 1965 po zosilnení pri tom istom pretlaku sa pretrhla.

Dva dni pred prietrzou hrázde pri Klúčovci sa tiež pretrhla ľavobrežná dunajská hrádza pod Komárnom pri Patinciach (rieč. km 1752). Lokality obidvoch prietří majú zhruba rovnaký morfológický vývoj. Pri Klúčovci sa do Dunaja vlieval Čilízsky potok (obr. 8), ktorý má asi rovnaký pôvod ako Malý Dunaj obkľučujúci Žitný ostrov alebo Mošonské rameno, obkľučujúce Szigetköz. Je to bývalé rameno rieky, ktoré odbočovalo



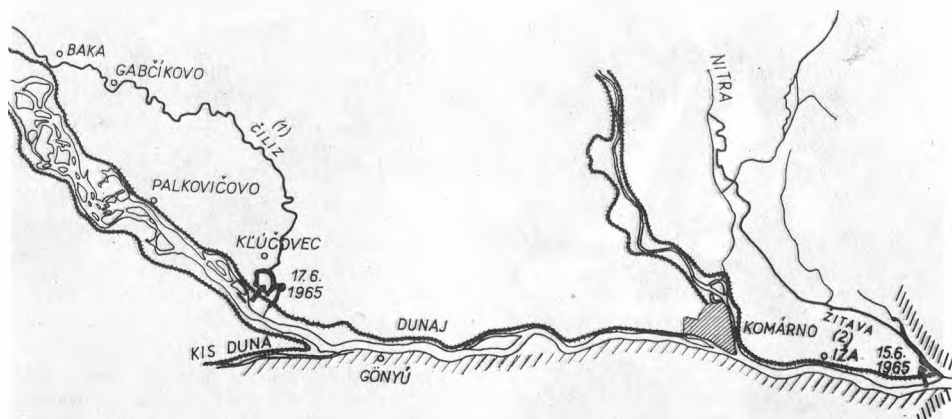
Obr. 7. Meandre bývalých koryt (ramien) Dunaja v okolí prietří ľavostrannej protipovodňovej hrázde pri Klúčovci. 1 — stará hrádza, 2 — nová hrádza.

z Dunaja obdobne ako Malý Dunaj a ktoré obklučovalo kedysi tzv. Čilizköz ako Malý Dunaj tzv. Csallóköz a ktoré ešte v 15. stor. bolo aktívne. Na tomto ramene nad obcou Gabčíkovo bolo niekoľko mlynov. Rameno malo spätné hrádze od zaústenia do Dunaja obdobne, ako to má Váho—Dunaj. Rameno bolo neskoršie odstavené a dnes zbiera už len priesakové vody na úseku Baka—Kľúčovec. Pri ústí potoka do Dunaja pri Kľúčovci sa vytvorila široká vodná plocha, v ktorej sedimentovali jemné nánosy a vytvárali bahniškú. Cez tieto bývalé bahniškú prechádza teraz lavo-brežná dunajská hrádza.

Obdobná situácia je pri Patinciach. V týchto miestach zaúšťovala do Dunaja stará Žitava (obr. 8) s Nitrou a možno kedysi aj s Váhom a zo starého ústia tu ostali široké vodné plochy a rozsiahle bahniškú. Trasa lavostrannej hrádze prechádza cez toto zanešené ústie starej Žitavy, ktorá zaúšťovala do Dunaja po okraji vyvýšeného územia na začiatku úseku, kde Dunaj začína pretekať v zúženom údolí. Pri striedaní hydrologických cyklov striedali sa tu tiež sedimentačné cykly. Boli obdobia, keď v ústí Žitavy vodný prúd vytváral hlboké koryto s hrubozrnnou dnovou dlažbou a zasa obdobia, keď sa na to miesto usadzovali jemné a bahnité nánosy a vznikali rozsiahle močiare.

Z tohto hľadiska zaúšťovacie trate Čilizkeho potoka a starej Žitavy ukazujú sa ako najslabšie miesta lavostrannej dunajskej hrádze, ktoré mohli predurčiť budúcu pohromu hrádzí na týchto miestach.

Niet pochybnosti o tom, že príčinou pretrhnutia hrádze pri Kľúčovci bol sústredený priesak cez nejakú veľmi priepustnú vrstvu alebo dutinu v podloží hrádze pri značnom rozdiel hladín pred hrádzou a za ňou pri pomerne krátkej priesakovej dráhe, t. j. pri značnom gradiente. „Krátky spoj“ pre sústredený priesak sa mohol vytvoriť morfológickým vývojom podložia hrádze, ako to bolo opísané, ale tiež ľudskou činnosťou alebo činnosťou živočíchov a rastlín. Pri výstavbe ochranných hrádzí sa z dôvodov úsporných brala zemina z materiálových jám v bezprostrednej blízkosti hrádze, najčastejšie na návodnej strane hrádze, pričom sa usudzovalo, že vytvorené priehlbne sa postupne vyplnia kolmatáciou pri povodňových prietokoch. Povrchová hlinítopiesčitá vrstva je pomerne nepriepustná a tvorí so zemnou hrádzou, ktorá je nasypaná tiež z nepriepustného hlinitého materiálu, dôležitý protifiltračný celok. Predlžuje filtračnú dráhu, znižuje filtračný gradient, priesakové rýchlosti a priesakové množstvo. Keď sa teraz predložený nepriepustný koberec skráti výkopom materiálovej jamy, zhorší sa veľmi filtračná stabilita podhrádzia, bezpečnosť hrádze a zvýši sa množstvo presakujúcej vody.



Obr. 8. Zaústenie dvoch starých prítokov. (1 — Čilizký potok, bývalé rameno Dunaja, aktívne ešte v 15. stor., 2 — stará Žitava s Nitrou a možno kedysi aj s Váhom.)

Pravda, materiálové jamy sa časom zakolmatovali, ale vrstva krycích nánosov ostala tenká a okrem toho je prederavená koreňmi stromov, ktoré sa tam uchytili a začali bujne vegetovať.

Aj na vzdušnej strane hrádze sa povrchová hlinitá vrstva niekedy prederavila výkopom rozličných jám, či už materiálových, alebo pre telefónne stĺpy, medzníky, stromy a pod. Tiež vysoké stromy mohli koreňmi prevrátať povrchovú vrstvu a pri kývaní za vetra vytvoriť hlboké prieduchy až do štrkovej vrstvy, a takto vytvoriť „krátky spoj“ pre sústredený priesak.

Niekedy aj zvieratá (kráľici, škrečky, sysle a i.) prevrtávajú teleso hrádze alebo jej podhrádzie a vytvoria tak voľnú cestu pre sústredený priesak počas povodne. Táto možná príčina prietrze dunajskej hrádze počas povodne r. 1965 je málo pravdepodobná, lebo býva to prípad ojedinelý, kým počas uvedenej povodne pozorovalo sa pozdĺž celej ľavostrannej hrádze viac ako 2000 výverov, ktoré boli určite pôvodu morfológického. Stromovým porastom pozdĺž hrádze treba však venovať pozornosť. V súčasnosti sa medzi hydrotechnikmi vedie spor o tom, či sa pred hrádzou na návodnej strane má ponechať lesný porast, alebo či sa má vyrúbať a vyklčovať aspoň pás, potrebný pre zriadenie predloženého hlinitého tesniaceho koberca, ktorým by sa priesaková dráha predĺžila a filtračná stabilita podložia zvýšila.

Lesný porast pred hrádzami má svoje kladné účinky, napr. chráni zemnú hrádzu pred rozrušením vetrovými vlnami alebo ľadochodom, zmiernuje prietochnú rýchlosť vody a tým chráni predhrádzie pred veľmi nebezpečnými výmolmi, ktoré by tu mohla vytvoriť rýchle prúdiaca voda a pod., ale súčasne má aj záporné stránky, a to v tom, že vysoké stromy svojimi hlbokými koreňmi prevrtávajú povrchovú nepriepustnú vrstvu (predložený nepriepustný koberec) a pri kývaní vo vodnom prúde uvoľňujú priesakovú cestu do veľmi priepustného štrkového podložia. Mysliteľné je nebezpečenstvo aj dlhých horizontálnych koreňov, ktoré by prechádzali pod hrádzou. Na fotografickej snímke (obr. 9)



Obr. 9. Prietrž ľavostrannej dunajskej hrádze pri Klúčovci. Foto ČTK.

z prietrže hrádze pri Klúčovci počas povodne r. 1965 vidieť, ako predpolie hrádze je zarastené vysokými stromami. Nech sa nebezpečná priesaková dráha vytvorila akýmkoľvek spôsobom, v konečnom dôsledku príčinou prietrže hrádze bolo nestabilné podložie na filtračné namáhanie.

Zdokumentovať dnes pravú príčinu prietrže dunajskej hrádze pri Klúčovci je úloha veľmi ťažká a skoro nemožná, lebo pri prietrži bola vodou odnesená nebezpečná priesaková dráha, filtračne nestabilné zeminy v podloží, stromy v profile prietrže, ktoré pri prietrži boli vyvrátené a odnesené a pod. V mieste prietrže nebol urobený geologický a geotechnický prieskum. Roku 1955 boli urobené v susedných profiloch orientačné geologické vrty, ale tieto profily pri povodni obstáli a logicky usudzujúc profil prietrže musel byť v podloží slabší ako preskúmané susedné profily.

†

Z toho, čo sme uviedli, vyplýva:

1. Podložie protipovodňových dunajských hrádzí má veľmi zložitú skladbu v smere vertikálnom a horizontálnom, ktorá doteraz bola len orientačne preskúmaná. Nie sú známe skutočne kritické miesta.

2. Nebezpečné sú bývalé ramená Dunaja vyplnené jemnými a nesúdržnými nánosmi, najmä nebezpečné sú pruhy bývalých prúdnic vodného toku, ktoré sú vystlané veľmi priepustnými štrkmi, v ktorých pri krátkej priesakovej dráhe sa môže vytvoriť veľmi silný filtračný prúd strhujúci jemné častice z nadložnej kontaktnej vrstvy. Prúdnicové pruhy bývalých korýt sú pomerne úzke (niekoľko 10 m), majú veľmi nepravidelný priebeh a pre ich vyhľadanie musela by sa robiť pomerne veľmi hustá geologická sondáž. Nebezpečné sú tiež bývalé ústia prítokov alebo obtokov (bývalé bahniská, močariny a pod.).

3. Bezpečnosť protipovodňových hrádzí sa dá zvýšiť buď technickou sanáciou podložia hrádzí (nepriepustné clony), alebo zriadením dostatočne širokého a hrubého nepriepustného koberca, predlžujúceho priesakovú dráhu a znižujúceho rýchlosť filtračného prúdenia na prípustnú veľkosť.

4. Úpravou medzihrádzového priestoru možno znížiť hladinu povodní, čím sa zvýši bezpečnosť dunajských hrádzí a zmenší množstvo vody presakujúcej do chráneného územia.

*Recenzoval E. Šimo*

Peter Danišovič

## ÜBER DIE URSACHEN DES DONAUDAMMBRUCHES BEI KLÜČOVEC

Im Juni 1965, während des langanhaltenden Hochwassers durchbrach der Schutzdamm am linken Ufer bei Klúčovec (Flusskm 1801) und das Wasser überschwemmte den ganzen östlichen Teil der Schüttinsel in einem Ausmass von 55 000 ha (Abb. 1).

Der Verfasser erklärt die Ursache des Dammbrechens auf Grund der bisher erreichbaren Angaben. Vor allen stellt er fest, dass am betreffenden Donauabschnitt die Schutzdämme bereits mehrmals durchbrochen waren, so z. B. zur Zeit des Hochwassers im Jahre 1897 durchbrach der Damm am linken Ufer am Flusskm 1783 bei Velký Lél, im Jahre 1899 durchbrach der Damm am rechten Ufer am Flusskm 1807 gegenüber Medvedov und auch am linken Ufer am Flusskm 1800 bei Čičov, im Jahre 1954 am rechten Ufer am Flusskm 1820 bei Ásványráró und schliesslich der Damm am linken Ufer am Flusskm 1801 bei Klúčovec. Alle diese Dammbüche haben sich in der Nähe des bekannten auffälligen Bruches des Längsprofils der

Donau bei Palkovičovo (Flusskm 1810 — Abb. 2) abgespielt. An diesem auffallenden Bruch verringerte sich plötzlich die grosse Neigung der oberen Strecke in eine verhältnismässig kleine Neigung des mittleren Abschnitts der Donau. Im Raum des Bruches lagert die Donau grosse Schottermengen ab (jährlich caa 500 000 m<sup>3</sup>) und das Flussbett hebt sich allmählich. Die Donau fliesst am Grat eines Ablagerungskegels entlang, in erhöhter Lage über dem Nachbargebiet. Bei jedem Hochwasser würde die Donau aus den Ufern treten und sich über die Donautiefenebene ergiessen, wenn beiderseits der Donau auf den Ufern keine zusammenhängende Schutzdämme errichtet wären. Die Dämme leiten nicht nur das Wasser, sondern auch die Geschiebe- und Sinkstoffe, die im Inundationsgebiet zwischen Dämmen intensiv ablagern. Das Inundationsgebiet wird aufgetragen und die Dämme werden relativ niedriger. Dies wurde bei Gabčíkovo festgestellt aus dem Oberflächenunterschied der Hochwasserniveaus im Jahre 1954 und 1899.

Obwohl der Hochwasserstand im Jahre 1965 an der Stelle bei Klúčovec gleich hoch war wie während des Hochwassers im Jahre 1954 und obwohl der Damm wie in der Abb. 4. veranschaulicht, gestärkt war, kam es trotzdem im Jahre 1965 zum Dammbruch. Die Ursache des Bruches liegt offensichtlich im langen Anhalten des Hochwassers (Abb. 5).

Der Damm bei Klúčovec war nicht überflutet, da die Oberfläche der Donau zur Zeit des Dammbruches etwa 130 cm unter der Dammkrone war. Laut Zeugenaussagen kam es weder zum Gleiten noch zum Rutschen der luftseitigen Dammböschung. Augenzeugen berichten, dass sechs Stunden vor dem Einbruch der Katastrophe am Fusse des Dammes eine kleine Quelle trüben Wassers entstanden ist, das vom Liegenden feinen Sand heranzuführte. Eine Bereitschaftsgruppe trachtete die Quelle mit einer Umzäunung aus mit Erde gefüllten Säcken, die mit Schotter überschüttet wurden, zu lokalisieren. Als es gelang die Quelle auf diese Weise zu erdrosseln, entsprang jedoch in der Entfernung von caa 4—5 m eine neue, viel heftigere Quelle trüben Wassers, dessen Breite 40 cm betragen durfte und sprang in die Höhe von 1,5 m und höher. Zur Erdrosselung dieser Quelle hatte die Bereitschaftsgruppe keine genügenden Mittel zur Verfügung und so entstand in Kürze ein Durchbruch, durch den in das Gebiet der Schüttinsel das Wasser mit 1200 m<sup>3</sup>/s flutete.

Ähnlich ereignete sich der Dammbruch auf der rechten Uferseite bei Ásványráro im Jahre 1954 als auch der an der linken Uferseite bei Čičov bei der Hochwasserkatastrophe im Jahre 1899.

In allen drei Fällen kam es zum Bruch des Liegenden der Dämme durch konzentriertes Durchsickern des Wassers.

Im Liegenden der Donaudämme wechseln sehr durchlässige schotter-sandige Schichten mit schwach durchlässigen Schichten feiner Sande und Sandlehme. Manchmal sind sehr grobkörnige mit sehr feinkörnigen Schichten in unmittelbarer Berührung. Durch die grobkörnigen Schichten vermag das Wasser mit grosser Geschwindigkeit durchsickern und das feinkörnige Material aus der Kontaktschicht mitführen (Abb. 6). Auf diese Weise können im Liegenden der Dämme Hohlräume entstehen, in die dann die Dämme zusammenfallen.

Das Wechseln der Schichten feineren und gröberen Kornes der Donauablagerung im betreffenden Gebiet kann man mit dem häufigen Wechseln der Fluss- und Seeablagerungszyklen am Übergangsabschnitt des Komorner Kessels erklären. Die länglichen Sedimentationszyklen waren durch das intensive Meandrieren der Donauarme in die Querrichtung umgebildet. An vielen Stellen kreuzen die Dämme ehemalige Donauarme (Abb. 7).

Für konzentriertes Durchsickern können Schotterstreifen (Bodenpflaster) ehemaliger Stromlinien vorbestimmt werden.

Zwei Tage vor dem Dammbruch bei Klúčovec wurde der Donaudamm bei Patince durchbrochen. Die Durchbrüche haben sich an ähnlichen Lokalitäten abgespielt — an Stellen ehemaliger Mündungen von Nebenflüssen (Čilizký Potok, Žitava — Abb. 8).

Ein „Kurzschluss“ für einen konzentrierten Durchsickerungsstrom konnte auch durch menschliche Mitwirkung (Materialgruben, Krater nach Fliegerbomben u. ä.) und auch durch die Tätigkeit von Tieren entstehen. Einen Kurzschluss konnten auch Baumwurzeln bilden, die in der Nähe des Dammes wachsen.

Mag es zum Entstehen des Durchsickerungsweges auf jede beliebige Art gekommen sein, in der Schlussfolgerung war die Ursache des Dammbruches das ungenügend stabile Liegende des Dammes gegenüber den Filtrationsbelastungen.

Abb. 1. Donaudammbrüche und Überflutung des östlichen Teiles der Schüttinsel (Žitný ostrov) nach dem Durchbruch des Schutzdammes auf der linken Uferseite bei Klúčovec im Juni 1965. 1 — Pumpenaggregate, 2 — Durchbruchstellen.

Abb. 2. Schematischer Längsprofil der Donau.

Abb. 3. Querprofil des Donautales im Flusskm 1827. 1 — Kleine Donau, 2 — Schutzdamm, 3 — Schüttinsel, 4 — Entwässerungskanal, 5 — linker Schutzdamm, 6 — Donau, 7 — rechter Schutzdamm, 8 — Szigetköz, 9 — maximaler Wasserstand der Donau, 10 — mittlerer Wasserstand der Donau, 11 — Mosoni Duna, 12 — Rabca, 13 — Oberfläche des Grundwassers.

Abb. 4. Charakteristische Flussprofile des linken Donaudammes nach der Rekonstruktion im J. 1955–1960, a — bei Gabčíkovo, b — bei Klúčovec, 1 — Schotter, 2 — Lehm, 3 — Höhe der Hochwasser Oberfläche im J. 1954.

Abb. 5. Chronologische Linie des Donaudurchflusses im Profil Bratislava während des Hochwassers im J. 1965 und projizierte Linie des Hochwassers im J. 1954.

Abb. 6. Kleine Quellen hinter den Damm mit dem Heranführen von feinen Sand — suphöse Erscheinungen (Maximaler Durchmesser des Sandkorns 1 mm, cca 50 % der Sandkörner hat den Durchmesser von 0,1 — 0,25 mm).

Abb. 7. Meander ehemaliger Flussbetten (Arme) der Donau in der Umgebung der Schutzdammbrüche bei Klúčovec. 1 — alter Damm, 2 — neuer Damm.

Abb. 8. Mündung zweier alter Nebenflüsse. 1 — Čilizský potok, alter Donauarm, aktiv noch im 15. Jahrhundert, 2 — alte Žitava mit dem Fluss Neutra und früher ew. auch mit der Waag.

Abb. 9. Durchbruch des linken Donaudammes bei Klúčovec.

Aus dem Slowakischen übersetzt von G. H o r n á