

JULIUSZ GŁODEK

Centralny Urząd Gospodarki Wodnej

KATASTROFY I AWARIE ZAPÓR WYWOŁANE WARUNKAMI GEOLOGICZNYMI

UKD 627.81.004.6:55:624.13(100.2)

WSTĘP

Żywiłowy rozwój budownictwa wodnego, jaki od przeszło 25 lat obserwuje się w świecie bez względu na szerokość geograficzną, oznacza budowę obiektów piętrzących w najróżniejszych (często bardzo skomplikowanych) warunkach geologicznych. Jak wynika z załączonego zestawienia wysokość zapór wszystkich typów rośnie niemal w postępie geometrycznym (rycina).

Często lokalizacja obiektu piętrzącego dyktowana jest korzystnymi warunkami topograficznymi lub

względnymi technicznymi, czy też ekonomicznymi, które mogą nie pokrywać się z miejscem o dogodnych warunkach geologicznych. Czasem dzieje się wprost przeciwnie. Do „ulubionych” miejsc lokalizacji zapór należą przewężenia, przełomy dolin, miejsca występowania progów skalnych w dnie itp. Wystarczy choćby zacytować kilka najbardziej znanych przykładów dla potwierdzenia tego faktu. Sian-Myn-Sia, Glen Canyon, Bhakra, Nurek, Kariba, Monteynard, a ostatnio Dżerdapu (Żelazna Brama).

Ale właśnie takie miejsca, zależnie od swej genezy, odznaczają się obecnością dyslokacji tektonicznych,

zmiennością litologiczną itd. Stąd też wyłania się potrzeba niezmiernie dokładnego rozpoznania geologicznego w celu doboru odpowiedniego typu obiektu piętrzącego oraz zabezpieczenia przed przykrymi niespodziankami w czasie budowy i eksploatacji. Również zdarza się, że dobór miejsca lokalizacji zapory ma być wypadkową różnych czynników, a więc także i warunków geologicznych. W takim przypadku rozpoznanie geologiczne powinno rozciągać się na szerszy odcinek doliny rzeki, aby w wyniku badań przyjąć do zabudowy najbezpieczniejsze miejsce.

W niniejszym artykule nie poruszam zagadnień, jakie warunki geologiczne mogą być uważane za korzystne dla lokalizacji zapory, a jakie nie. Warto wspomnieć, że do najważniejszych grup problemów, które powinny być możliwie dokładnie naświetlone w wyniku przeprowadzonych badań geologicznych należą: a) skład litologiczny skał budujących podłoże, b) tektonika, a przede wszystkim dyslokacje, c) ruchy masowe, d) stosunki wodne w otoczeniu, e) zasoby materiałów budowlanych.

NAJWAŻNIEJSZE KATASTROFY WYWOŁANE WARUNKAMI GEOLOGICZNYMI

W ciągu minionego stulecia zanotowano na świecie około 1000 mniejszych i większych katastrof oraz awarii zapór. Przeszło 2/3 spowodowane zostało przyczynami geologicznymi, a właściwie niedostatecznym rozeznaniem warunków geologicznych miejsca, gdzie wznoszono obiekt piętrzący. Należy podkreślić jednak, że niezawsze dokładne rozpoznanie przyczyny było możliwe, gdyż wdarcie się wody poprzez zniszczony obiekt pociąga za sobą usunięcie potrzebnych dla takiego celu wskazówek, jak również nawet rozpoznane przyczyny niezawsze podawane są do publicznej wiadomości*.

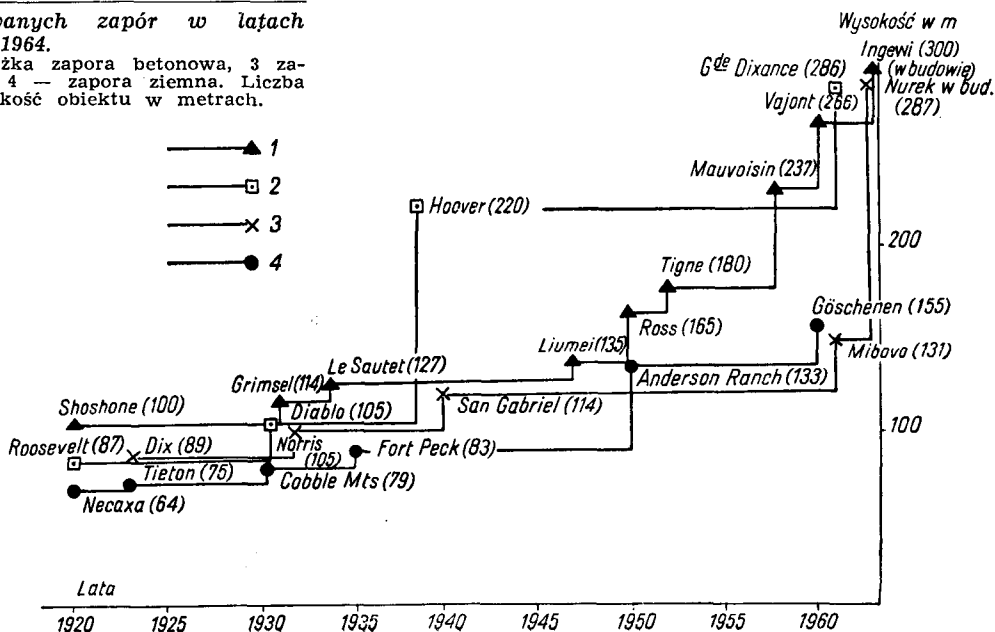
Do najważniejszych katastrof, które można bez wątplenia położyć na karb geologii należą: Bouzey we Francji, St. Francis i Austin w USA, Cheurfas w Algierii, Gleno we Włoszech, Birs w Szwajcarii, Malpasset we Francji, Rivadelago w Hiszpanii oraz ostatnio Vajont we Włoszech. Kilku z nich poświęcamy więcej miejsca w artykule.

Zapora Bouzey zbudowana w połowie XIX w. już po kilkunastu latach zapadła się wskutek rozmycia pod stopą fundamentu na znacznej długości zwierz-

* W USA do 1960 r. wybudowano 1764 zapory. Między 1864 a 1891 r. zanotowano tam aż 100 wypadków awarii i katastrof obiektów piętrzących, głównie typu ziemnego. W okresie 1918—1959 zanotowano jeszcze 33 niepowodzenia, z których 3 należały do dużych katastrof o znacznych szkodach materialnych i ofiarach w ludziach.

Wzrost wysokości budowanych zapór w latach 1920—1964.

1 — zapora łukowa, 2 — ciężka zapora betonowa, 3 — zapora z narzutu kamiennego, 4 — zapora ziemna. Liczba w nawiasie oznacza wysokość obiektu w metrach.



łej strefy piaskowców dolnotriasowych. Mimo nie-wysokiego piętrzenia wody (wysokość zapory wynosiła tylko 15 m) suffozja mechaniczna była intensywna, a przebieg katastrofy bardzo gwałtowny.

Katastrofa zapory St. Francis w Kalifornii wywołała wiele niekorzystnych komentarzy w prasie i stanowi swego rodzaju podręcznikowy przykład katastrofy wywołanej wskutek bagatelizowania warunków geologicznych. Obiekt piętrzył wody potoku górskiego Francisquito (około 80 km na N od Los Angeles) i miał wysokości 62,5 m. Szerokość u podstawy wynosiła tylko 5,5 m. Zapora wybudowana została w 1925 r., a w niespełna 3 lata później uległa zupełnemu zniszczeniu. Katastrofa tej zapory miała niezmiernie szybki przebieg i zginęło w niej 400 osób. Straty szacowano na około 16 mln dolarów. Siła walącej się wody była tak wielka, że bloki betonowe wyrwane z korpusu zapory, mające ciężar od 2500 do 3000 t zostały uniesione na odległość 1 km od miejsca zapory.

Budowa geologiczna w miejscu lokalizacji zapory przedstawia się następująco. Prawy przyczółek oraz środkowa część korpusu posadowione były na łupkach, o wytrzymałości na zgniatanie od 225 do 700 kG/cm². Przy nasyceniu wodą cecha ta nie ulegała większym zmianom, czyli że współczynnik nasiąkliwości był duży, a zatem korzystny. Lewy przyczółek zapory oparto o warstwę zlepieńca o spoiwie ilastym i zawierającym gips. Zlepieńiec w stanie suchym posiadał wytrzymałość na zgniatanie 42—155 kG/cm². Współczynnik nasiąkliwości tej skały był bardzo niski, na co wskazywały wyniki badań na zgniatanie, przeprowadzone po zanurzeniu kilku próbek do wody. Już po 10 minutach wytrzymałość na zgniatanie malała do 15—58 kG/cm², a po całej dobie trzymywania próbek w wodzie 2 z nich rozpadły się całkowicie. Do obliczeń przyjęto średnio 13 kG/cm², co było dość ryzykowne i jak się okazało błędne. Warto dodać, że upad warstw był zgodny ze spadkiem dna doliny, a więc sprzyjał również powstaniu poślizgu.

Już w czasie napełniania zbiornika wodą zaobserwowano znaczną ucieczkę wody pod zaporą, szybko zwiększającą się z biegiem czasu. Godny podkreślenia jest fakt, że projektant zapory był na obiekcie na 12 godzin przed katastrofą i nie uznał filtracji za groźną, mimo że średni ubytek wody w ciągu ostatniej doby wzrósł przeszło 40-krotnie, tj. z 0,45 m³/sek. na 21 m³/sek. Główną przyczyną katastrofy była suffozja chemiczna (rozpuszczanie gipsu) oraz mechaniczna (wypłukiwanie ilastego spoiwa zlepieńca). Jednocześnie miało miejsce mięknięcie całej masy spoiwa skały wskutek przesączenia się wody, co doprowadziło do osłabienia podłoża i obsunięcia się

dolnej części korpusu zapory. Trzeba także podkreślić, iż mimo projektowania obiektu w tak niekorzystnych warunkach geologicznych nie przewidziano ani cementacji podłoża skalnego pod zaporą ani drenażu (oprócz środkowej części) ani nawet fug dylatacyjnych, chociaż zdawano sobie sprawę, że obiekt posadowiony został na podłożu, wykazującym różne cechy fizyczne i mechaniczne.

Zapora im. Toma Millera na rzece Kolorado w mieście Austin (Teksas) należała do niewysokich obiektów piętrzących, lecz jej zawalenie się w 1911 r. było niezwykle brzemienne w skutki. Zginęło wówczas 1000 osób, a straty materialne oceniano na kilka dziesiątków milionów dolarów. Zapora Austin miała 18 m wysokości i 390 m długości oraz 20 m szerokości w podstawie. Był to ciężki obiekt betonowy, posadowiony na warstwie spękanych wapieni kredowych. Już w czasie budowy, którą ukończono w 1909 r. zaobserwowano w dolnej części korpusu, poniżej powierzchni terenu duże pęknięcia, szybko powiększające się. W celu zapobieżenia katastrofie część pękniętą usunięto i zastąpiono nowym blokiem betonu. Warstwę słabych wapieni wybrano za pomocą wykopu tunelowego. 7 kwietnia 1911 r. przy niepełnym jeszcze piętrzeniu (około 3,5 m poniżej korony zapory) nastąpiło nowe pęknięcie i część zapory o długości 150 m oderwała się od reszty obiektu i przesunęła się w dół na odległość 20 m. Po 40 minutach oderwana część zapory przewróciła się i zniknęła pod wodą.

Powodem tego niepowodzenia był brak dokładnego rozpoznania warunków geologicznych miejsca, gdzie zlokalizowano zaporę. Niezbyt staranne zacementowanie spękanej strefy wapieni pod stopą fundamentu umożliwiło przepływ wody pod ciśnieniem, co przyspieszyło rozwijanie się zjawisk krasowych i wytworzenie kawern, które wydatnie zmniejszyły wytrzymałość podłoża. Dla pełnej informacji warto dodać, że zapora Austin została odbudowana w okresie II wojny.

Przykładem katastrofy spowodowanej powstaniem osuwiska warstwowo-konsekwentnego było zniszczenie zapory w innym mieście amerykańskim o identycznej nazwie. Tym razem chodzi o zaporę Austin znajdującą się w stanie Pensylwania. I ten obiekt nie był duży, gdyż jego wysokość wynosiła 15 m, a długość 168 m, szerokość u podstawy tylko 9 m. Jednak sam przebieg katastrofy i skutki były poważne. Zginęło wówczas 100 osób.

Zapora Austin w Pensylwanii posadowiona była na fliżu składającym się z naprzemianległych ławic piaskowców i łupków ilastych. Stopa zapory spoczywała na ławicy spękanych piaskowców o miąższości 60 cm. Woda poprzez spękania i pory w piaskowcu nasyciała podścielającą warstwę łupków ilastych, po której nastąpiło przesunięcie części zapory. Momentem sprzyjającym takiemu procesowi był dość duży upad warstw w dół rzeki. Analogiczna niekorzystna sytuacja tektoniczna spowodowała pęknięcie i przesunięcie zapory Gleno we Włoszech w 1923 r. Zapora ta miała 56 m wysokości. Gwałtowne opróżnienie zbiornika w przeciagu zaledwie 5 minut przyczyniło się do powstania wysokiej do 30 m fali, która pociągnęła za sobą śmierć 500 osób.

Wiele rozgłosu przed paru laty wywołała katastrofa zapory Malpasset w południowej Francji. Była to zapora typu łukowego o wysokości 66,5 m i długości 300 m, zlokalizowana na rzece Reyran, około 10 km w górę od Fréjus. Szerokość zapory u podstawy wynosiła 6,9 m, a w koronie tylko 1,5 m. Była to więc budowa o niezwykle śmiałej konstrukcji i potocznie przyrównywano ją do „wygiętej żyłki”. Zbudowana została w 1958 r., a w niespełna rok później, w nocy z 1 na 2 grudnia, po przerwaniu się wody nagromadzonej w zbiorniku nastąpiło zalanie Fréjus, gdzie poniosło śmierć 400 osób, a straty materialne szacowano na 30 mln nowych franków.

Podłoże zapory w Malpasset tworzyła niewielka asymetryczna antyklina zbudowana z osadów kar-

bońskich reprezentowanych tu przez piaskowce i łupki ilaste przypominające fliż. Antyklina była nałożona na stary archaiczny masyw Maures Esterell, zbudowany z gnejsów. Prawy przyczółek zapory posadowiony był bezpośrednio na gnejsach, a lewy oparty był o karbońskie łupki ilaste. Ta strona otrzymała dodatkowe wzmocnienie betonowe, do którego, podobnie jak w innych budowlach w tej części Francji, użyto kruszywa z porfiru.

W sprawie przyczyn katastrofy Malpasset wysuwano początkowo mniej lub więcej słuszne domysły. Dopiero jednak ostatnio, po paroletnich pracach dochodzeniowych komisji rządowej można podać przyczynę. A więc bezpośrednim powodem było pęknięcie skały poniżej fundamentu lewego przyczółka opartego o strome zbocze doliny, które budowały łupki ilaste przewarstwione piaskowcami. Zapora byłaby tak długo bezpieczna, jak długo przyczółek ten mógłby przyjmować na siebie nacisk wody w zbiorniku. Z raportu komisji wynika, że pewne roboty budowlane mogły wywołać zwiększenie przecieków wody, które zmiękczyłyby bok skalny i spowodowały jego przesunięcie z lewego zbocza. Blok ten był ograniczony z jednej strony wyraźną płaszczyną uławiczenia, nachyloną zgodnie ze spadkiem dna doliny, a z drugiej obecnością płaszczyn laminacji biegnących w przeciwnym kierunku. Wynikało to z budowy tektonicznej, ale wywołane zostało stosowaniem materiałów wybuchowych przy pracach drogowych. Nagrzewanie skał przez słońce, gdy poziom wody w zbiorniku był niski, a następnie nasycenie nią w okresie deszczów, obficie padających na krótko przez katastrofę spowodowało infiltrację w szczeliny. Wskutek nawilgocenia łupków ilastych nastąpił poślizg. Komisja wykonując in situ badania modułu sprężystości i innych cech udowodniła, że gdyby polowe badania były przeprowadzone przed rozpoczęciem budowy nie doszłoby do katastrofy (4).

Swego rodzaju rekordzistką katastrof jest zapora Ferguig na rzece Chabra, w Algierii. Obiekt ten wybudowano w 1870 r., a już w rok potem uległ pęknięciu i zsunięciu w dół rzeki. Po dokonaniu naprawy w 1887 r. nastąpiła nowa katastrofa, a po ponownym usunięciu uszkodzeń w 1927 r. zanotowano trzecią poważną awarię. Zapora odbudowana została po raz czwarty w 1960 r.

Podłoże zapory Ferguig przedstawia się następująco. Tworzy ją seria fliżowa reprezentowana przez piaskowce i łupki ilaste lekko nachylone w dół rzeki. Seria ta była ścięta uskokiem o niewielkiej amplitudzie, powyżej którego zlokalizowano zaporę. W czasie pierwszej katastrofy nastąpiło obsunięcie się dolnej części obiektu wskutek nawilgocenia warstwy łupków ilastych, do której sięgał żąb stopy fundamentu. W czasie pierwszej odbudowy zapory znacznie rozszerzono jej stopę i bardziej pogłębiono fundament, zbliżając się do uskoku. Druga katastrofa spowodowana została różnicą napięć tektonicznych w górotworze po obu stronach uskoku. Trzecie niepowodzenie wywołane było wstrząsem sejsmicznym (2).

W tym samym roku, kiedy miała miejsce katastrofa zapory Malpasset, zanotowano także awarię w Hiszpanii. Mianowicie w styczniu 1959 r. runęła wysoka na 24 m betonowa zapora Vega de Terra koło miasta Rivadelago. Powodem katastrofy było nierównomierne osiadanie obu przyczółków zapory, z których jeden oparty był o granit, a drugi o skały osadowe (8).

Wielka katastrofa, jaka wydarzyła się w końcu 1963 r. w Vajont w północnych Włoszech wprowadziła nie pociągnęła za sobą zniszczenia zapory, ale spowodowana została również czynnikami geologicznymi. Przyczyną było powstanie wielkiego osuwiska na lewym brzegu zbiornika, wskutek czego związało się doń ponad 250 mln m³ mas skalnych. W ciągu 7 minut dwukilometrowej długości zbiornik wypełnił się do wysokości 175 m, przekreślając całkowicie swe funkcje gospodarcze.

I tu znów mamy do zanotowania niezbyt sumienne zachowanie się obsługi eksploatacyjnej, gdyż w

Tabela I

Przyczyna katastrofy	Typ zapory			
	ziemna	łukowa	c. betonowa	żelazna
ucieczka wody pod zaporą	27	2	9	1
ucieczka wody wokół przyczółków zapory	2	—	—	—
osiadanie podłoża oraz osuwiska	10	—	—	—
ruchy tektoniczne	—	—	—	—

Tabela II

Obiekt	Zakres wierceń w mb.	Zakres robót górniczych w mb.
Krasnojarsk	18 175 (mechan.) 1 416 (ręczn.)	900 (sztolnie)
Sian-Myn-Sia	8 790 (mechan.)	2929 (szybki)
Brack	ok. 9 000 „	„
Bartlett	7 950 „	„
Thakravadi	ok. 14 000 „	„
El Kensera	ok. 3 000 „	„
Dzardapu	2 400 „	„
(Żelazna Brama)	przyczółki 1 800 (mechan.) koryto rzeki	250 (sztolnie)
Okutadami	1 700 (mechan.)	1313 (sztolnie)
Solina	ok. 2 000 (mechan.)	300 (sztolnie)

1960 r. w czasie budowy nastąpiło „wstępne” obsunięcie się skał po zboczu (około 800 tys. m³). Zbocze to nie ustabilizowało się do momentu katastrofy i jeszcze na 10 dni przedtem zarejestrowano ruch wynoszący około 41 cm na dobę. Fakt ten jedynie spowodował obsługę do rozpoczęcia powolnego opróżniania zbiornika. Do momentu katastrofy obniżono poziom wody w zbiorniku o 23 m. Ogromna masa wody, jaka wylała się przez koronę zapory i runęła w dolinę Piawy pociągnęła za sobą śmierć 3000 ludzi w kilku miasteczkach i wsiach. Najbardziej ucierpiało miasto Longarone położone w odległości 1 km od zapory Vajont. Jak wspomniano, sama zaporą (najwyższa na świecie w klasie łukowych — 265 m) wyszła prawie nietknięta z opresji, jeżeli nie liczyć drobnego uszkodzenia w pobliżu lewego przyczółka o długości 10 m i wysokości 1,5 m.

Zapora Vajont usytuowana jest w wąskiej gardzieli, którą wytworzył potok Vajont (lewy dopływ Piawy) w zdolomityzowanych wapieniach jury środkowej. Posiadają one upad w górę rzeki (sytuacja korzystna) i uległy nieznacznym dyslokacjom tektonicznym. Przy projektowaniu obiektu przyjęto dopuszczalny nacisk wynoszący 681 kG/cm². W przeciwieństwie do miejsca lokalizacji zapory podłoże zbiornika zbudowane jest głównie z wapieni i margli górnourajskich i dolnokredowych. Całość jest silnie pocięta uskokami. Stwierdzono także występowanie brył radiolarytów, występujących w przewarstwie niach ilastych, stwarzających możliwość poślizgów. Właśnie na takiej warstwie ilastej, która nasycona została wodą, nastąpiło obsunięcie się mas skalnych, tworzących nadkład.

Według autorów amerykańskich (8) geologiczne przyczyny katastrof zapór można zgrupować w sposób następujący:

- rozmycie podłoża pod zaporą, np. wskutek sufozji, rozwijania się krasu itp. — 40%,
- nierównomierne osiadanie obiektu, wynikające często z różnic litologicznych skał 10%,
- osuwiska — 5%,
- trzęsienia ziemi — 1%,
- inne przyczyny geologiczne — 44%.

Prawdopodobnie liczby te nie obrazują stanu faktycznego, jeśli chodzi o cały świat, gdyż jak można było się przekonać ostatnio, osuwiska odegrały wcale

Tabela III

Obiekt	Wiercenia w mb.	Głębokość zastrzyków w m	Skały podłoża zapory
Peruca	120 000	200—250	wapienie
Camaraza	90 000	112—394	wap. zdolomit.
Santa Giustina	85 000	200	dolomity
Hoover	80 000	do 160	granit i brekcja
El Bosque	75 000	—	—
Pieve di Cadore	73 390	90—100	dolomity
Bu Hanifia	63 000	—	margle i wapienie
Mauvoisin	45 000	do 200	łupki krystal.
Val Gallina	30 000	—	—
Dokhan	28 000	—	—
El Ghrib	25 500	100	margle i piaskowce
Ikawa	19 500	—	łupki krystal.
Castillon	16 000	100	wapienie
Ikari	11 500	—	granit i brekcja
Génnissiat	9 700	60	wapienie
Ued Fodda	9 500	—	—
Fontana	9 000	—	—

nie bagatelną rolę w niszczeniu zapór. Dlatego bardziej zbliżona do rzeczywistości jest ilościowa klasyfikacja autorów francuskich (5).

NAJWAŻNIEJSZE NIEPOWODZENIA WYWOŁANE WARUNKAMI GEOLOGICZNYMI

Oprócz wielkich katastrof zanotowano także wiele mniejszych niepowodzeń inżynierskich, w wyniku których obiekt piętrzący nie spełnia swej roli w życiu gospodarczym kraju lub wymagał wiele kosztownych i trudnych zabiegów technicznych. Najczęściej nie może on retencjonować takiej ilości wody, jaka miała być niezbędna do planowych zadań.

Do najbardziej głośniejszych tego typu niepowodzeń należą trudności z zaporami hiszpańskimi: Camaraza, Maria Cristina oraz Monte Jague. Zapora Camaraza, wysoka na 120 m została zbudowana w 1920 r. na rzece Noguera. Już w czasie budowy zaobserwowano duże przecieki pod stopą, które po zakończeniu robót wzrosły do 11,5 m³/sek. Później corocznie ilość wody wzrastała przeciętnie o 5%, wskutek czego utworzony przez zaporę zbiornik nie odgrywa większej roli gospodarczej. Ogromny zakres robót uszczelniających nie przyniósł pożądanego rezultatu. Powodem ucieczki jak stwierdzono po zbudowaniu zapory są silnie spękane wapienie, w których rozwijają się bez przerwy zjawiska krasowe.

Zapora Maria Cristina we wschodniej Hiszpanii posiada wysokość 30 m. Obiekt ten miał wytworzyć zbiornik o pojemności 28 mln m³ służący nawadnianiu gruntów. Tymczasem wskutek rozwijającego się krasu udało się spiętrzyć wodę do 12 m i utworzyć zbiornik o pojemności 4 mln m³. Analogiczna sytuacja istnieje w przypadku zbiornika Monte Jague w Andaluzji. Wysoka do 72 m zaporą w ogóle nie może spiętrzyć wody, gdyż ta ucieka szczelinami krasowymi do sąsiedniej doliny Gwadalkiwiru.

Wiele innych niepowodzeń spowodowanych nie tylko krasem, ale i innymi zjawiskami, a przede wszystkim osuwiskami, zanotowano w wielu krajach, nie wyłączając Polski. Wystarczy m. in. wymienić choćby wielkie osuwisko, jakie powstało w czasie budowy zapory Castillon na rzece Verdon, w południowej Francji, duże przecieki pod zaporą Bort les Orgues we Francji, Dokhan w Iraku, Bhakra w Indii, Kyrdżali w Bułgarii itd.

ROBOTY ZABEZPIECZAJĄCE

W świetle zacytowanych przykładów można stwierdzić, że możliwie wczesne i dokładne rozpoznanie geologiczne miejsca lokalizacji zapory i zbiornika może dopomóc projektantowi w doborze odpowiedniej koncepcji zapory i przyjęciu właściwych robót zabezpieczających.

O tym jak skuteczne jest właściwe przeprowadzenie prac, może świadczyć kilka poniższych przykładów. Przy zaporze Hoovera na rzece Kolorado, której budowę ukończono w 1935 r. ucieczka wody wynosiła 28 l/sek. Po całkowitym napełnieniu zbiornika w 1938 r. ucieczka wzrosła do 130 l/sek, natomiast po przeprowadzeniu robót uszczelniających, trwających do 1949 r., tj. przez 11 lat, ubytek wody zmalał do nieznacznych ilości 9 l/sek. Ze zbiornika Le Sautet we Francji ogólna ilość wody uciekającej wynosiła aż 2500 l/sek. bezpośrednio po ukończeniu budowy. Po przeprowadzeniu robót uszczelniających zmalała do 1000 l/sek. Podobnie wyglądała sytuacja przy zaporze Zillerbach w NRF i El Bosque w Meksyku. W pierwszym przypadku ucieczka wody wokół przyczółka posadowionego na spękanych porfirach, wynosząca kilkaset litrów na sekundę zmniejszyła się do 0,1 l po przeprowadzeniu zabiegów uszczelniających. W drugim zmniejszenie ucieczki było bardzo znaczne — z kilkuset litrów do 10 l/sek. (8,9).

Dla rozpoznania warunków geologicznych koniecznych do zaprojektowania odpowiednich robót uszczelniających należy przeprowadzić różne prace badawcze. Do niedawna ograniczono się do tzw. robót klasycznych, jak: wiercenia, badania laboratoryjne dla oznaczenia cech fizycznych i mechanicznych skał oraz polowe sposoby oznaczania wytrzymałości podłoża,

próbnej wodochłonności, próbnej cementacji. Obecnie z coraz większym powodzeniem stosuje się metody pośrednie, jak badania geofizyczne, w tym także izotopowe.

Nie dysponując danymi ilustrującymi zakres wszystkich stosowanych robót dla rozpoznania warunków geologicznych pozwolę sobie przytoczyć kilka liczb, dotyczących wierceń i robót górniczych (1, 2) tab. I, II, III.

Zakres wierceń w celu wykonania zastrzyków uszczelniających bywa niekiedy wielokrotnie większy od wierceń badawczych, wykonanych w okresie prac projektowych (9).

L I T E R A T U R A

1. Desio Ardilio — *Geologia applicata alla ingegneria*. II wyd. Rzym 1959.
2. Gignoux M., Barbier J. — *Géologie des barrages et aménagements hydrauliques*. Paryż 1955.
3. Hammond R. — *Water Power Engineering*. Londyn 1958.
4. Min. de Agriculture. Commission d'enquete du barrage de Malpasset. 1960.
5. Post G., Londe P. — *Les barrages en terre compactée*. Paryż 1953.
6. Sawinskaja M. — Inż. geologiczneskoje swojstwa trapow kak osnowanija gidrotiechn. sooruzenij. *Gidr. Stroj.* 1953, nr 6.
7. Semenow M. P. (red) — *Gieologija osnowanij wysokich plotin*. Moskwa 1962.
8. Walters R. C. S. — *Dam geology*. Londyn 1962.
9. Walters R. C. S. — *Impacts of geology on dams and reservoirs*. Londyn 1964.