

SBORNÍK

ČESKOSLOVENSKÉ SPOLEČNOSTI ZEMĚPISNÉ

ROČNÍK 1964 • ČÍSLO 3 • SVAZEK 69

ANTONÍN BEČVÁŘ

PŘÍSPĚVEK K LIMNOLOGII ŠTRBSKÉHO PLESA

Abstract: Štrbské pleso (The lake of Štrba) in the Tatra Mts. is a rare example of the mountain lake with interior drainage; it is without inward or outward drainage. Its existence is due to the long time lasting balance of precipitations and evaporation. The level of the lake produces periodic swings of seiches type, of which main period lasts 188 seconds with an amplitude reaching until 126 milimetres. The thermic balance of the lake water is typical for the stagnant water; the surface water is during the whole summer warmer than the average temperature of the air. Vertical gradient of the temperature shows that the metalimnion lies in the depth of 6—8 m. Registrations of the sensitive limnigraphs support the idea, that the coast and the bottom of the lake are waterproof and that there is no soaking of the water through the bed of the lake. The position of the lake on the extended terrace-like plain and the shape of the bottom of the lake with steep rocky slopes testifies, that there is no proof of the direct modeling of the lake bassin by the glacier.

I

Po sedm let — od jara 1937 do podzimu 1943 — bylo mi dopřáno věnovat soustavnou pozornost různým hydrologickým problémům, jejichž řešení nabízí Štrbské pleso jakožto bezpřítoková a bezodtoková nádrž vodní, která nemá v podobných rozměrech u nás obdoby. Z těchto problémů mne nejdříve a nejvíce zaujala hydrostatika jezerních vod.

Již první limnigraf, který jsem namontoval v kabině plovárny v jihovýchodním cípu jezera původně k tomu, abych zahájil registraci vodní bilance, mne okamžitě poučil, že vodní hladina není téměř nikdy v klidu. Limnigraf nereagoval na běžné vlnění vody ani na provoz na plovárně, neboť jeho plovák byl tlumen v komoře opatřené malým otvorem; a právě toto tlumení odhalilo existenci dlouhoperiodických kmitů, jimiž celá jezerní hmota kolísala kolem střední výšky. Vhodným rozměrem tlumicího otvoru bylo možno dosáhnout toho, aby dlouhoperiodické kmitání nebylo tlumením ovlivněno nebo zkresleno.

První limnigraf, který měl pomalou rotaci registračního bubnu pro zaznamenávání absolutní výšky hladiny, nebyl vhodný k tomu, aby jím bylo možno analyzovat povahu periodických kmitů. Namontoval jsem proto brzy druhý limnigraf, který měl nejen podstatně větší buben, aby zachytil velké amplitudy, ale i dosti rychlou rotaci, aby se jednotlivé kmity daly vzájemně odlišit a v komparátoru proměřit. Také jeho tlumení bylo vhodně přizpůsobeno rychlosti kmitů. Rychlost posuvu byla 522,6 mm za den čili 21,77 mm za hodinu, amplitudy se registrovaly ve skutečné velikosti přímým mechanickým převodem s plováku na registrační péro.

Registrace poskytly ihned zajímavé výsledky. Prvý z nich podle očekávání potvrdil, že perioda kmitů je izochronní, nezávislá na amplitudě, jak plyne z pohybu

harmonického. Hlavní perioda jezera je 19,8 kmitů za hodinu, tedy 182 sekund. Je to veličina neobvykle stálá. Když byla odvozena z 5 různých řad po 4 hodinách (tj. z 5 různých dní a různých amplitud), byla její průměrná hodnota 181,6 sec s rozptylem necelé jedno procento. Jde zřejmě o kmitání jednoduzlové, neboť odpovídá rozměrům a hloubce plesa. Za tři minuty a dvě vteřiny klesne celá polovina jezera s nejvyšší polohy na nejnižší a vrátí se na nejvyšší, zatím co druhá polovina současně vystoupí z minima k maximu a vrátí se k minimu, přičemž obě projdou dvakrát středním rovnovážným stavem.

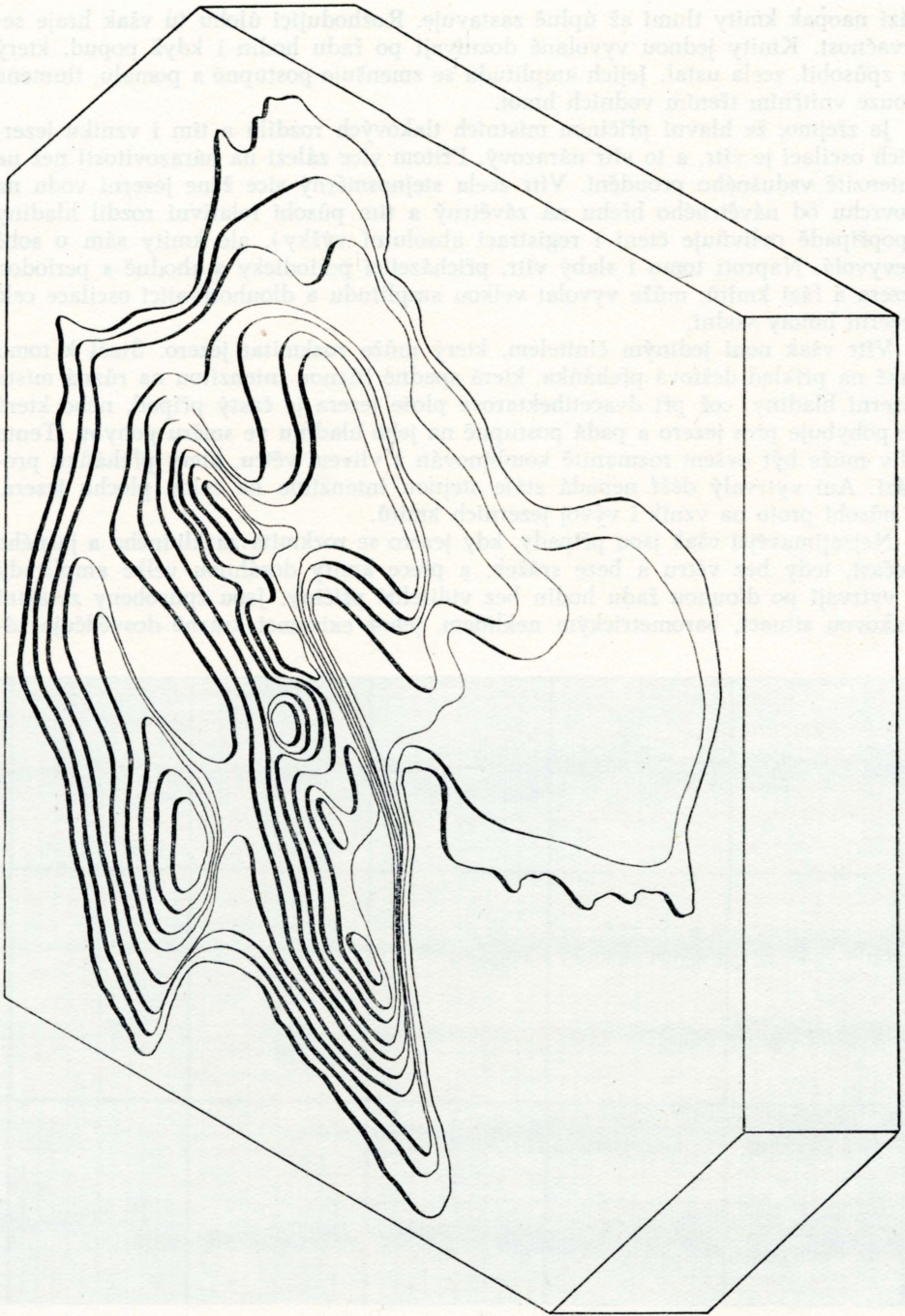
Jedině tento rovnovážný stav udává skutečnou absolutní výšku hladiny. Prosté odečítání výšky na vodočetné lati může být zcela falešné podle toho, v kterém okamžiku fáze bylo provedeno, a to až o celou poloviční amplitudu kmitů. Poněvadž pro zkoumání vodní bilance je třeba znát výšku hladiny nejen na centimetry, ale na milimetry přesně, je redukce vodočtu na nulovou fázi zcela nutná.

Uzlová přímka hlavních kmitů jezera probíhá velmi pravděpodobně osou hloubkové symetrie v azimutu 60° – 240° , aby potenciální energie obou kmitajících polovin byla v krajní fázi stejná. Avšak pohled na diagram, který byl sestaven podle hloubkových měření K. Sedlmayera, ukazuje, že dno Štrbského plesa je neobvykle rozmanité a členité, takže o nějakých osách symetrie možno mluvit jen zcela schematicky. Při pěti hloubkových centrech a strmém gradientu dna je jezerní pánev daleko od ideálního souměrného tvaru, pro který by mohl platit jednoduchý vzorec. Zvlášť kontrast mezi severozápadní hlubokou částí a jihovýchodní rozsáhlou mělkinou je velmi výrazný. Je proto jisto, že vodní hmoty se mohou rozkmitat i podle jiných uzlových přímek, a to hlavně podle toho, z kterého směru přichází popud pro vznik oscilací. To se také plně potvrzuje na registracích limnigrafu. Přes základní dlouhou periodu se překrývají četné další kmity, které se s ní sčítají a výsledný tvar kmitové křivky komplikují.

Tak druhou charakteristickou periodou plesa je frekvence 88,7 až 89,6 kmitů za hodinu, čili 40,2 až 40,6 sekund. Vyskytuje se shodně z různých dní a z průměrů několikahodinových registrací, takže o její realitě není pochyb. Její poměr k hlavní periodě je 4,5 : 1. Je význačná pro vichřice přicházející od severu. Poněvadž není harmonická s hlavní periodou, jsou to kmity podle jiné uzlové přímky, nikoliv víceuzlové kmity hlavní přímky. Vzorec pro jednoduzlové kmity nasvědčuje tomu, že to jsou samostatné kmity mělké jižní části jezera, na které je situována i plavárna s limnigrafem.

Ještě další kmitočty a periody se dají vyčísřit podrobnou analýzou registrací. Je možno také sledovat doby, kdy k jednomu kmitočtu se přidá další vlivem jiného popudu, stejně jako postupné doznívání různých kmitočtů a přechod od složitých periody k jedoduší až monotonní. Při velké vichřici s 1. na 2. září 1941 byla hlavní frekvence kmitů 63,2 za hodinu (v průměru z 10hodinové registrace), z čehož plyne perioda 57 sekund. Její poměr k hlavní periodě jezera byl 3,186 : 1. Možno však říci, že čím bouřlivější je počasí, tím více kmitů se vyvine současně a tím komplikovanější je také záznam celkové výsledné oscilace jezerní hladiny.

Jediným důvodem ke vzniku periodických oscilací jezera je přechodný okamžitý rozdíl tlaku vzduchu na různé části vodního povrchu. Pod relativně větším tlakem hladina klesá, pod relativně menším tlakem hladina stoupá, přičemž odpovídající množství jezerní vody, potřebné ke kompenzaci výšek, proudí periodicky oběma směry kolmo na uzlovou přímku kmitů. Jestliže se perioda popudu shoduje s periodou vlastních kmitů jezera, amplituda kmitů rychle vzrůstá, pokud přichází v souhlasu s fází. Také přibližná shoda obou period zvětšuje amplitudu, pokud trvá alespoň přibližný souhlas popudu s fází. Nesouhlas jak period, tak



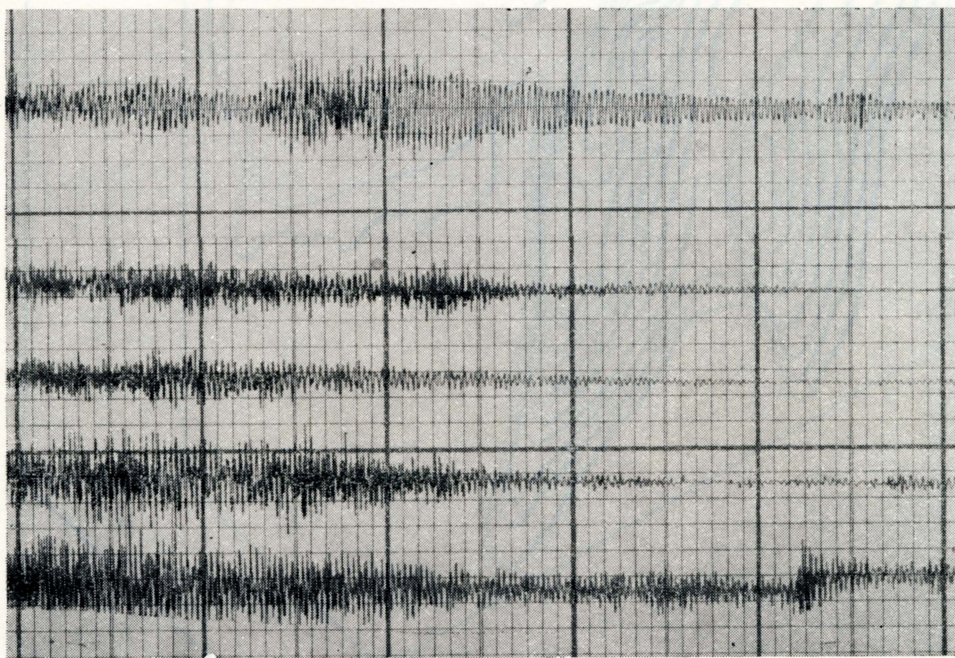
Obr. 1. Štrbské pleso, členitost jezerního dna. Sedlmayerovy isobathy po 2 m (o 50 % převýšeno).

fázi naopak kmity tlumí až úplně zastavuje. Rozhodující úlohu tu však hraje setrvačnost. Kmity jednou vyvolané dozívají po řadu hodin i když popud, který je způsobil, zcela ustal. Jejich amplituda se zmenšuje postupně a pomalu, tlumena pouze vnitřním třením vodních hmot.

Je zřejmo, že hlavní příčinou místních tlakových rozdílů a tím i vzniku jezerních oscilací je vítr, a to vítr nárazový. Přitom více záleží na nárazovitosti než na intenzitě vzdušného proudění. Vítr zcela stejnosměrný sice žene jezerní vodu na povrchu od návětrného břehu na závětrný a tím působí relativní rozdíl hladiny (popřípadě ovlivňuje čtení i registraci absolutní výšky), ale kmity sám o sobě nevyvolá. Naproti tomu i slabý vítr, přicházející periodicky a shodně s periodou jezera a fází kmitů, může vyvolat velkou amplitudu a dlouhotrvající oscilace celé jezerní hmoty vodní.

Vítr však není jediným činitelem, který může rozkmitat jezero. Stačí k tomu také na příklad dešťová přeháňka, která spadne různou intenzitou na různá místa jezerní hladiny, což při dvacetihektarové ploše jezera je častý případ, nebo která se pohybuje přes jezero a padá postupně na jeho hladinu ve směru pohybu. Tento vliv může být ovšem rozmanitě kombinován s vlivem větru, který přeháňku provází. Ani vytrvalý déšť nepadá stále stejnou intenzitou na celou plochu jezera, a působí proto na vznik i vývoj jezerních kmitů.

Nejzajímavější však jsou případy, kdy jezero se rozkmitá za klidného a jasného počasí, tedy bez větru a beze srážek, a přece kmity dosáhnou velké amplitudy a vytrvají po dlouhou řadu hodin bez viditelné příčiny. Jsou způsobeny zvláštní tlakovou situací, barometrickým neklidem, jehož existenci krásně dosvědčuje zá-

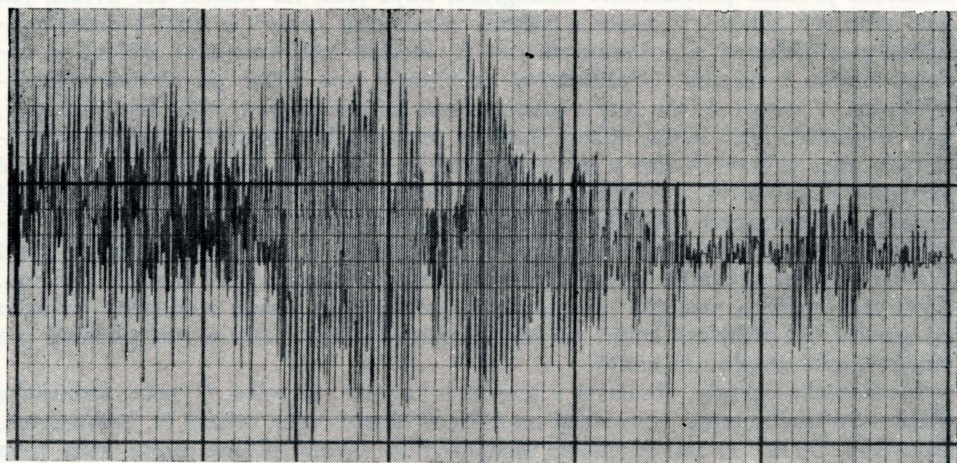


Obr. 2. Různé typy oscilací hladiny Štrbského plesa. Nahoře základní jednouzlová perioda. Uprostřed překládání dvou a několika různých period, setrvačné dozívání kmitů po utišení větru. Dole záznam dešťové přeháňky.

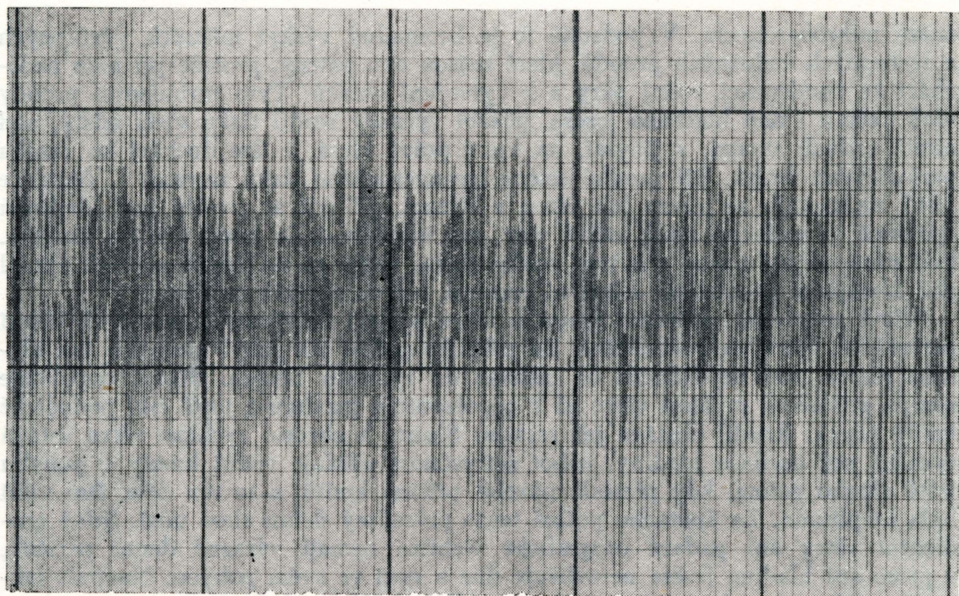
znam mikrobarografu. V podstatě to je hromadný výskyt místních výstupných a sestupných vzdušných proudů, které nejsou oku patrné, protože při nich nedochází ke kondenzaci vodní páry a k vytvoření oblaků. Tyto turbulentní proudy však existují i nad hladinou jezera, působí výrazný rozdíl tlaku mezi místy, nad nimiž vzduch stoupá, a jinými, na které právě klesá, a tím dochází ke vzniku periodických kmitů. Při prudké změně barometrického tlaku navečer 7. července 1943 rozkmitalo se jezero bez větru v situaci, při níž se tvořily nad hladinou opětovně ve vzduchu malé točivé víry, tak intenzivní, že braly vodu s hladiny. Pod nimi zřejmě nastal relativní pokles tlaku, zatím co na jiných místech vznikl pod klesajícím prouděním relativní vzestup, což dalo vznik oscilacím.

Přímá souvislost jezerních kmitů a větru se jeví nejvýrazněji na jejich denní periodicitě, která jde rovnoběžně. Za pěkného počasí jak pohyb vzduchu, tak hladina jezera jsou neklidnější od půlnoci do východu Slunce. Během dopoledne stoupá průměrná rychlost větru až k odpolednímu maximu a totéž činí periodické kmity jezera. Rozdíl nastává při sestupu Slunce k obzoru: rychlost větru ustává rychleji než oscilace hladiny, neboť setrvačnost udržuje vodní hmoty v pohybu ještě dlouho potom, kdy přestala působit příčina kmitů, a to tím déle, čím větší byla amplituda. Za špatného počasí tento průměrný denní chod mizí. Silné gradientní větry ani padavé orografické víchřice nemají výrazné denní periody, a proto ani hladina jezera nerozlišuje dne a noci ve svém pohybu. Naopak, nejextrémnější podmínky se dostávají zpravidla v noci.

Okamžitou rychlost, celkovou dráhu i směr větru jsme registrovali nepřetržitě několika anemografy, a mohl jsem proto sledovat souvislost všech složek větru a jezerních kmitů do podrobností. Ukázalo se, že vítr má maximální účinnost na kmity tehdy, jestliže vane přibližně kolmo na uzlovou přímkou; je to samozřejmě z analogie rozhoupávání těžkého zvonu nebo kyvadla, působíme-li silou kolmo na jeho závěsnou osu. Větry různých směrů mají proto tendenci rozkmitat vody jezera podle různých uzlových přímk, tedy v různých frekvencích a periodách. Jako všechny vyšší horské polohy i Štrbské pleso je značně větrné, jak odpovídá jeho nadmořské výšce; v letních měsících je tu průměrná denní dráha větru přes



Obr. 3. Registrace kmitů Štrbského plesa za silného nárazovitého větru. Příklad náhlého utlumení kmitů při nesouhlasu nárazů s fází a opětovného rychlého zvětšení amplitudy při fázové shodě



Obr. 4. Oscilace Štrbského plesa při katastrofální vichřici v noci z 1. na 2. září 1941. Amplituda kmitů dosáhla 126 mm. Časové trvání záznamu 8 hod. 35 min.

300 km. Avšak i slabý vítr za krásného klidného dne, vane-li příznivým směrem a má-li vhodnou nárazovitost, dokáže znamenitě rozkmitat celou jezerní hmotu, aniž by znatelně zčeřil vlnkami její povrch. Naproti tomu ani silnější vítr nerozkmitá hladinu jezera podle uzlové přímky, s níž se shoduje jeho směr, vybere-li si ovšem uzlovou přímku jinou.

Amplituda jezerních kmitů je překvapující. Já sám jsem doslova užasl hned po sestavení prvního provizorního limnigrafu, když jsem na vlastní oči uviděl, jak jeho péro jde během tří minut o několik centimetrů nahoru a dolů s nepochopitelnou pravidelností a dokazuje mi tak, že všechna má dosavadní měření na vodočtu nejsou k ničemu. Centimetrové amplitudy jsou běžné po většinu průměrných dní. V menšině jsou dny s amplitudami milimetrovými, výjimkou jsou dny, kdy se hladina nerozkmitá vůbec. Bývá to pouze za bezvětřných, většinou zamračených nebo mlhavých dní a za stabilní situace tlakové. Amplitudy samozřejmě vzrůstají s rychlostmi a hlavně s nárazovitostí větrů. Za silných vichřic dosahují hodnot decimetrových. Absolutní rekord v amplitudě, který zachytily moje registrace, byl za mimořádné destruktivní vichřice 1.—2. září 1941, která v okolí Štrbského plesa vyvrátila statisíce stromů; tehdy amplituda kyvů dosáhla 126 mm. Směr této vichřice, padající přes tatranské hřebeny za vpádu studeného vzduchu od severu, byl přibližně kolmý na hlavní uzlovou čáru jezera a tím příznivý pro vznik vysoké amplitudy kmitů.

Mechanická energie, obsažená v jezerních kmitech, je velká. Výpočet kubického obsahu Štrbského plesa, provedený na základě hloubkových měření K. Sedlmayera, dává 954 350 m³. Avšak orientační tachymetrické měření plochy jezera, které jsem provedl na zamrzlé hladině v zimě 1938, mi ukázalo, že Sedlmayerovy rozměry jsou podceněny, a to nejméně o 4 % lineárně. Do jaké míry se toto podcenění týká isobath, nemohl jsem rozhodnouti, ale plyne z něho odhadem, že za průměrného

stavu hladiny jezero obsahuje na jeden milión tun vody. To nám vysvětluje velkou setrvačností, se kterou pomalu dozívají kmity jednou vyvolané, jakož i překvapující přesnost a jemnost, s kterou se odehrávají až po nejmenší amplitudy zlomku milimetru, pokud je citlivý limnigraf dovede sledovati.

Statisíce, milióny návštěvníků hor stanuly na břehu jezera, pozorovaly hru jeho vln a netušily, že toto není hlavní pohyb, který jeho vodám dává vanutí větrů; že pod vlnami i bez nich hladina pulzuje neviditelným, avšak mohutným rytmem, jímž po staletí jezero dýchá s neochvějnou pravidelností. Takto věčně oddychují všechna jezera Tater, všechna jezera světa, každé svým vlastním rytmem, a přece všechna stejně podle týchž neměnných zákonů, kterým teprve začínáme poněkud rozumět.

II

Tepelné poměry Štrbského plesa nejsou rušeny ani povrchovým přítokem, který by přiváděl studenou vodu z větších výšek a z tajícího sněhu, ani povrchovým odtokem, který by odváděl nejteplejší vodu z jezerní hladiny; v této obrovské nádrži klidné, stojaté (avšak ideálně čisté) vody odehrávají se před námi každoročně děje s dokonalou pravidelností v rovnováze kladných a záporných položek termické bilance, v souhře přírodních energií a sil. Jsou léta teplá i studená, jasná i zamračená, suchá i deštivá; tepelné hospodářství jezera se však opakuje stejným způsobem, léto za létem, rok za rokem.

Není pochyby o tom, že hlavním a téměř výhradním zdrojem tepla pro jezerní vody je záření sluneční. Energie v něm obsažená je obrovská, mnohem a mnohem větší, než se domnívá pouhý pozorovatel. Změřena aktinometrem na Štrbském plese, dosahuje v průměru 1,35 cal/min na čtvereční centimetr vystavený kolmo záření, ale 1. dubna 1939 v 11 h 40 m za mimořádně čistého vzduchu jsem naměřil 1,616 cal/min. I průměrné sluneční záření, soustředěné ve sluneční peci z 20 čtverečních metrů na jedno místo, roztaví za několik vteřin silnou železnou traverzu. Soustavné registrace pyranografem, který sečítá úhrn celkového záření na vodorovnou plochu za jasného i zamračeného počasí, zjistily pro průměrný červencový den na Štrbském plese sumu 589 cal na cm². Nejjasnější den dostal 886 cal, nejzamračenější 166 cal na každý čtvereční centimetr. Obdobná čísla pro leden byla: průměr 139, maximum 226, minimum 25 cal/cm² (rok 1939). Počet čtverečních centimetrů hladiny Štrbského plesa je zhruba 2 · 10⁹.

Voda jezera však nezíská toto tepelné záření všechno, neboť část se ho vždy odráží na lesklém povrchu hladiny. Koeficient je značně závislý na úhlu dopadu a množství odraženého záření rychle stoupá s klesajícím úhlem. Proto ranní a večerní, popřípadě podzemní sluneční záření málo přispívá k oteplování jezerní vody. Voda se ohřeje jen tím zářením, které prošlo hladinou a bylo pohlceno. Absorpční schopnost vody pro tepelné záření je velká, a proto záření proniká do malé hloubky; prakticky celá polovina záření se pohltí už v prvním decimetru vody, čtyři pětiny v prvním metru a pod 5 metrů už nepronikne téměř nic. Poněvadž tepelná vodivost vody je nízká, proniká teplo povrchových vrstev do hloubky jen velmi pomalu a kdyby nenastaly jiné, radikálnější vlivy, odehrávaly by se tepelné děje jen v několika málo metrech vody u povrchu.

Povrchovou teplotu vody jsme měřili soustavně každodenně ráno v 7 hodin pod kabinou plovárny, kde byly umístěny limnigrafy. Sedmihodinový termín byl výhodný proto, že nenastal dosud vliv intenzivního denního záření a teploty byly nejvyrovnanější. Byly současně nejnižší v denním chodu teploty, jehož minimum nastává přibližně v době východu Slunce. Pomůckou byl speciální teploměr o velké

Tabulka 1

Průměrná teplota vzduchu a povrchová teplota vody ve stupních Celsia na Štrbském plesu

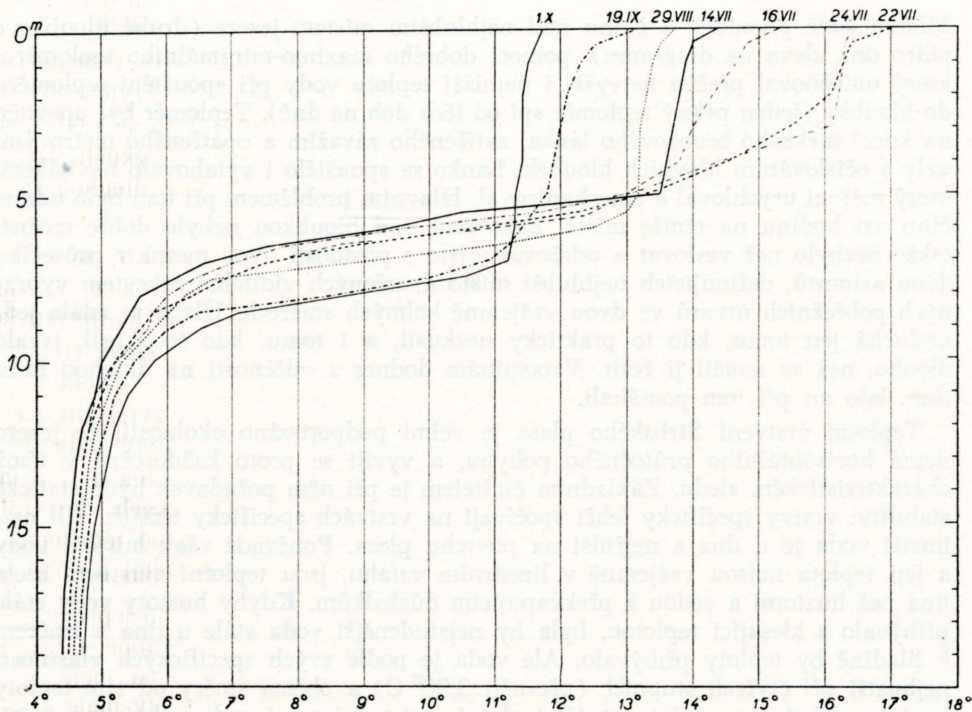
	Vzduch	Voda 7 h	Rozdíl	Vzduch		Ampl.	Voda		Ampl.	
				max.	min.		max.	min.		
1942	VI.	10,4	14,3	+3,9	15,8	6,5	9,3	16,4	11,1	5,3
	VII.	11,9	14,7	+2,8	17,7	7,3	10,4	17,8	11,0	6,8
	VIII.	13,3	14,0	+0,7	18,6	6,7	11,9	17,3	11,1	6,2
	IX.	12,3	15,1	+2,8	18,8	6,0	12,8	18,2	12,3	5,9
	X.	5,7	8,6	+2,9	14,5	-2,9	17,4	13,5	4,4	9,1
Průměr		10,7	13,3	+2,6	17,1	4,7	12,4	16,6	10,0	6,6
1943	VI.	8,8	11,2	+2,4	15,3	4,3	11,0	13,3	9,0	4,3
	VII.	12,0	14,2	+2,2	17,1	5,8	11,3	16,7	11,5	5,2
	VIII.	15,1	16,5	+1,4	24,3	8,4	15,9	18,7	14,3	4,4
	IX.	11,2	14,2	+3,0	19,1	6,3	12,8	15,8	12,2	3,6
	X.	8,1	8,9	+0,8	14,6	-1,0	15,6	12,6	5,2	7,4
Průměr		11,0	13,0	+2,0	18,1	4,8	13,3	15,4	10,4	5,0

termické kapacitě, který byl neustále ponořen ve vodě a vytahoval se jen ve chvíli měření. Svým umístěním byl chráněn před vlivem přímého záření, ale byl volně vystaven proudění jezerní vody, která mohla pod plovárnou cirkulovat.

Systematická měření ukázala překvapující skutečnost, že každoročně po celé léto je teplota vody Štrbského plesa vyšší než teplota vzduchu nad ním. Tato skutečnost je ještě výraznější, než ukazuje tabulka, neboť teplota vody je v ní ranní, minimální, kdežto teplota vzduchu je celodenní průměr, počítaný ze tří termínových pozorování v meteorologické budce. Rozdíl mezi ranní teplotou vody a minimální denní teplotou vzduchu je ještě o několik stupňů (o polovinu průměrné denní amplitudy teploty) větší. Proto právě ráno se zdá každému voda v jezeře překvapivě teplá a pozdě večer, kdy vzduch se už ochladil, koupání tak příjemné.

Vysvětlení tohoto zajímavého zjevu je prosté a je skryto ve vysokém specifickém teple vody, které je na příklad pětkrát vyšší než u kamenných břehů jezera. Voda spotřebuje hodně energie, aby se ohřála (a tu dostane), ale ohřátá má schopnost tuto energii dlouho udržet. Z toho plyne také tepelná setrvačnost vody Štrbského plesa; amplituda denního chodu teploty jezerní vody není v průměru ani poloviční ve srovnání s amplitudou teploty vzduchu; denní maximum teploty vody přichází až v posledních odpoledních hodinách nebo navečer, roční maximum se dostavuje až na podzim. Za všechna léta pozorování se nestalo ani v nejstudenějších letních měsících, že by teplota vody v jezeře byla nižší než průměrný stav teploty vzduchu. Ovšem usuzovat z toho, že by teplé jezero mělo vliv na průměrnou teplotu okolí, by bylo klamné, neboť vydatná ventilace a ustavičný transport vzdušných hmot větrem je činitel mnohem mocnější.

Pokud se týče ostatních činitelů, které mohou mít vliv na teplotu jezerní vody, je jejich účinnost ve srovnání se slunečním zářením nepatrná. Teplého přítoku jezero nemá, srážky padající na jeho hladinu jsou jen zcela výjimečně teplejší než



Obr. 5. Změna teploty vody s hloubkou na Štrbském plesu v létě 1937.

povrch jezera, zpravidla jsou naopak mnohem chladnější (i letní lijavce jsou studené, někdy i v kroupách zmrzlé). Teplejší vzduch může dotykem odevzdávat vodě své teplo jen kolem denního maxima teploty. Přímá kondenzace vodní páry na hladině může také nastat jen v řídkých výjimečných situacích, neboť voda je téměř stále teplejší než vzduch, a je-li tomu naopak, není vzduch nasycen vodou. Větší vliv může mít jen skupenské teplo tuhnutí, které může zpomalit zamrzání jezerní vody na počátku zimy.

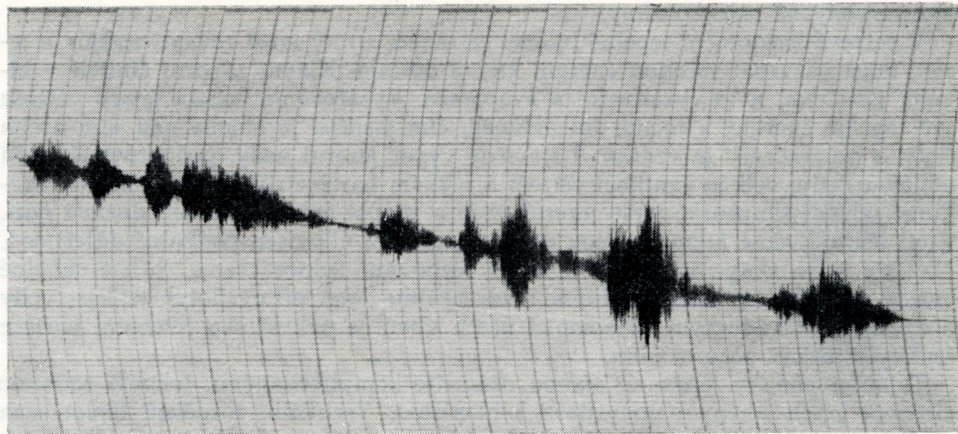
V celkové každoroční tepelné bilanci se ovšem ztráty musí rovnati ziskům a jezero musí odevzdat všechnu energii, kterou dostalo. Hlavní záporní činitel v bilanci jsou dva, a to vyzařování a evaporace. Vyzařováním ztrácí jezero většinu své tepelné energie, a to tím intenzivněji, čím jasnější je obloha nad ním a čím čistší a průzračnější je vzduch. Ustavičný výpar jezerní vody, podporovaný vyšší teplotou vody, velkou ventilací větrem a nízkým barometrickým tlakem, také mohutně odvádí skupenské teplo jezerní vodě a působí její zchlazování dnem i nocí. Proti těmto dvěma faktorům jsou ostatní negativní vlivy jen podřadné důležitosti. Na jaře je to skupenské teplo tání při rozmrzání ledové vrstvy, v létě chladné srážky, padající na hladinu jezera a po většinu doby přímý dotyk teplejší vody s chladnějším vzduchem. Výslednicí všech vlivů je pak křivka celoroční variace teploty, zjištěná pozorováním.

Teplotní poměry jezera se stanou okamžitě komplikovanými, jakmile začneme sledovat jejich změny v souvislosti s hloubkou. Vertikální rozdělení teplot jsem změřil mnohokrát ve všech ročních dobách a za nejrůznějších meteorologických situací, abych zjistil každoroční variace Štrbského plesa v tomto zajímavém směru

Měření jsme prováděli z člunu nad nejhlubším místem jezera (druhé hloubkové jádro dna zleva na diagramu) pomocí dobrého maximo-minimálního teploměru, který umožňoval přečíst nejvyšší i nejnižší teplotu vody při spuštění teploměru do hloubky (jeden pěkný teploměr spí od těch dob na dně). Teploměr byl upevněn na konci měkkého bronzového lanka, zatíženého závažím a opatřeného metrovými uzly s očíslováním hlavních hloubek. Lanko se spouštělo i vytahovalo navijákem, který měření urychloval a zmechanizoval. Hlavním problémem při tom bylo udržet člun asi hodinu na témže místě. Zakotvení nad hloubkou nebylo dobře možné, takže azimutů, definujících nejhlubší místo a určených viditelně zakrytím vybraných pobřežních útvarů ve dvou vzájemně kolmých směrech. Úloha se zdála jednoduchá jen tomu, kdo to prakticky nezkusil, a i tomu, kdo to zkusil, trvalo dlouho, než se naučil ji řešit. Vzpomínám dodnes s vděčností na dlouhou řadu těch, kdo mi při tom pomáhali.

Teplotní vrstvení Štrbského plesa je velmi podporováno okolností, že jezero nemá horizontálního průtočného pohybu, a vyvíjí se proto každoročně v téměř charakteristickém sledu. Základním činitelem je při něm požadavek hydrostatické stability: vrstvy specificky lehčí spočívají na vrstvách specificky těžších, čili nejhustší voda je u dna a nejdříve na povrchu plesa. Poněvadž však hustota vody a její teplota nejsou vzájemně v lineárním vztahu, jsou teplotní zvrstvení zcela jiná než hustotní a vedou k překvapujícím důsledkům. Kdyby hustoty vody stále přibývalo s klesající teplotou, byla by nejstudenější voda stále u dna a směrem k hladině by teploty přibývalo. Ale voda je podle svých specifických vlastností nejhustší při čtyřech stupních (přesněji $3,98^{\circ}\text{C}$) a oběma směry od této teploty hustoty ubývá. A právě to utváří teplotní vrstvení jezerní vody velmi rozmanitě.

V nejhlubších místech jezera, kam žádné záření neproniká a vedení tepla působí jen nadmíru pomalu, mění se teplota vody během roku jen o půl stupně, s každoroční monotónní pravidelností. Nejstudenější je na počátku května, nejteplejší v listopadu. Ještě v deseti metrech hloubky jsou roční změny teploty malé a dosahují přibližně jen jednoho stupně. V menších hloubkách je však o změny bohatě postaráno, ale odehrávají se cyklicky, tj. rok za rokem obdobným způsobem.



Obr. 6. Registrace poklesu hladiny Štrbského plesa od 17. do 21. června 1941.

Jakmile se na jaře roztápí ledová vrstva, má nejvyšší povrchová voda teplotu 0° . Směrem dolů teploty přibývá, nejteplejší voda je na dně. Přesto je vrstvení vody stabilní, neboť od 0° do $3,98^{\circ}$ C hustota vody s teplotou roste (studenější led plave na teplejší vodě). Jakmile se povrchová voda začne ohřívat, stoupá tedy až do 4° její hustota a ohřátá voda se stává specificky těžší než chladnější voda, která je pod ní. To ale znamená labilní rovnováhu, a proto nastává cirkulace horních vrstev jezera: teplejší vrchní voda klesá až do té hloubky, kde nalezne stejnou hustotu (čili stejnou teplotu), jakou má sama, a na její místo vystupuje chladnější, avšak teplejší voda, která byla pod ní. Toto konvekční proudění vyrovnává rozdíly teplot v celé vrstvě a způsobuje, že jezero se neohřívá pouze na povrchu, ale ve vrstvách stále silnějších. Konečně, při kritické teplotě 4° , jsou konvekci zachváceny všechny vrstvy, nastává všeobecná jarní cirkulace veškeré jezerní vody a teploty se vyrovnají od povrchu až na dno. Celé jezero je stejně teplé nebo, lépe řečeno, stejně studené. Nastala jarní homotermie.

Tento stav, teoreticky zajisté pravdivý, se mi nepodařilo nikdy měřením zastihnout. Ve skutečnosti totiž není tak jednoduchý ani na tak ideálně klidném jezeře, jako je Štrbské pleso, a to z toho důvodu, že nemá dosti času na to, aby se odehrál podle teorie. Postupem jara, které na horách přichází velmi pozdě, zato však pokračuje velmi rychle, se povrchová voda ohřívá mnohem rychleji a hlavně nepravidelněji změnami počasí, než aby cirkulace mohla vyrovnávat teploty všech příslušných vrstev. Spíš by se proto hodilo hovořit o jarním chaosu než o homotermii. Ostatně i trvání tohoto teplotního chaosu je krátké. Teplota povrchových vrstev brzy stoupne nad kritické 4 stupně, teplejší povrchové vrstvy se stanou lehčími než chladnější vrstvy pod nimi, nastane stabilní rovnováha a konec jarní cirkulace. Situace se radiálně obrátí a dále upevňuje: nejteplejší, nejlehčí voda je na hladině, nejstudenejší, nejtěžší voda u dna, jak každý očekává.

Každoroční hra teplot však pokračuje dále. Co se odehrává ve velkém mezi zimou a létem, odehrává se v malém každodenně mezi dnem a nocí. Opakované intenzivní ohřívání nejvyšší vrstvy ve dne a ochlazování v noci vyvolává malou cirkulaci horních vrstev jezera, která stále vyrovnává teploty a promíchává teplejší vodu s chladnější. Působení větru, o který není nouze, dále mechanicky podporuje toto míchání, a tak voda jezera se ohřívá v celé vrstvě, silně několik metrů. Postupem léta se stále výrazněji vytváří pohyblivé, teplé epilimnion, spočívající na nehybném, studeném hypolimnionu: dvě jezera, studené a teplé, na sobě. Skočná vrstva mezi nimi (metalimnion) je neobyčejně výrazná; zatím co v epilimnionu i v hypolimnionu se mění teplota vody metr po metru jen v desetinách stupně, ve skočné vrstvě je změna až o několik stupňů na metr hloubky. Zjistil jsem případy, že na půl metru byl skok teploty o dva stupně, zcela reálný při opětovném měření.

Hloubka skočné vrstvy není v jezeře stálá. Začíná na jaře blízko hladiny a je málo výrazná, neboť každodenní malá cirkulace ji rozrušuje. Postupem léta klesá k větším hloubkám a zároveň nabývá na výraznosti. Tento pokles však není pravidelný. Náhlé povětrnostní zvraty a s nimi i náhlé ochlazení povrchu způsobuje její zastavení nebo i částečný návrat, silná vichřice také působí rušivě do značné hloubky nejen vlněním povrchu, ale i pohybem veškeré povrchové vody jezera od návětrného k závětrnému břehu a návratem vody právě v úrovni skočné vrstvy. Je-li počasí velmi proměnlivé a nepravidelné, vznikne i druhá a třetí skočná vrstva v menší hloubce; tyto podružné vrstvy jsou však jen přechodné a málo výrazné, kdežto hlavní metalimnion nezanikne během léta nikdy.

Ku konci léta je skočná vrstva nejhluběji a je také nejvýraznější. Změny počasí ani vichřice už na ni nemají znatelného vlivu. Na povrchu jezera se však už při-

Tabulka 2
 Tepelné zvrstvení Štrbského plesa v létě 1937

Den	14. VII.	16. VII.	22. VII.	24. VII.	29. VII.	12. VIII.	29. VIII.	19. IX.	1. X.
m									
0	14,4	15,3	17,0	16,4	16,1	16,5	13,7	13,1	11,7
0,5	14,0	14,8	16,4	16,3	16,1	16,0	13,5	12,5	11,6
1	13,9	14,7	16,3	16,3	16,1	15,8	13,4	12,3	11,5
2	13,8	14,3	16,1	16,2	16,1	15,5	13,3	12,1	11,4
3	13,7	14,0	15,5	16,1	16,1	15,3	13,2	12,0	11,4
4	13,6	13,8	14,6	14,6	16,0	15,1	13,2	11,9	11,4
5	13,5	13,0	13,4	13,0	13,2	14,5	13,2	11,8	11,3
5,5	10,5	12,4	12,3	11,7	12,0	14,0	13,0	11,6	11,3
6	9,3	10,7	10,7	9,6	10,3	11,0	12,5	11,4	11,3
6,5	7,5	8,6	8,9	7,8	8,8	9,7	11,0	11,2	11,2
7	6,6	7,5	7,5	7,0	7,6	8,0	9,0	10,9	11,2
7,5	6,2	6,7	6,9	6,4	6,9	7,1	6,7	10,0	10,4
8	5,6	6,4	6,4	6,0	6,0	6,3	6,3	8,5	8,8
8,5	5,4	5,7	5,8	5,8	5,9	6,0	6,0	6,5	7,1
9	5,3	5,4	5,6	5,7	5,7	5,8	5,8	6,0	6,5
10	5,0	5,1	5,2	5,2	5,2	5,3	5,3	5,5	5,8
11	4,9	5,0	5,0	4,9	4,9	5,1	5,1	5,2	5,4
12	4,8	4,9	4,9	4,8	4,8	5,0	5,0	5,1	5,2
13	4,7	4,8	4,8	4,7	4,7	4,8	4,8	5,0	5,1
14	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,8	4,9	5,0
15	4,5	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,7	4,8	4,9
16	4,4	4,5	4,5	4,5	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9
17	4,3	4,4	4,4	4,4	4,5	4,6	4,6	4,7	4,8
18	4,3	4,4	4,4	4,4	4,4	4,5	4,5	4,6	4,8
19	4,3	4,3	4,4	4,4	4,4	4,5	4,5	4,6	4,7

pravuje další hra. Teplota vzduchu systematicky klesá, s ní také teplota vody se snižuje a blíží se kritická chvíle, kdy povrchové vrstvy se ochlazením stanou specificky těžšími než teplejší vrstvy pod nimi. Podzimní cirkulace začíná a jarní hra se opakuje v obráceném pořádku. Stále mocnější vrstvy vody jsou promíchávány sestupnými a vzestupnými proudy, až při čtyřech stupních se dostaví všeobecná cirkulace a s ní podzimní homotermie veškeré jezerní vody. Před touto homotermií nemůže jezero zamrznout ani při nejsilnějším mrazu, který jen urychlí výměnu tepla. Teprve když se celé jezero ochladilo na čtyři stupně, může nastat obrácená stabilní stratifikace, povrchová voda se může dále ochladit k nule a zamrzání hladiny počíná.

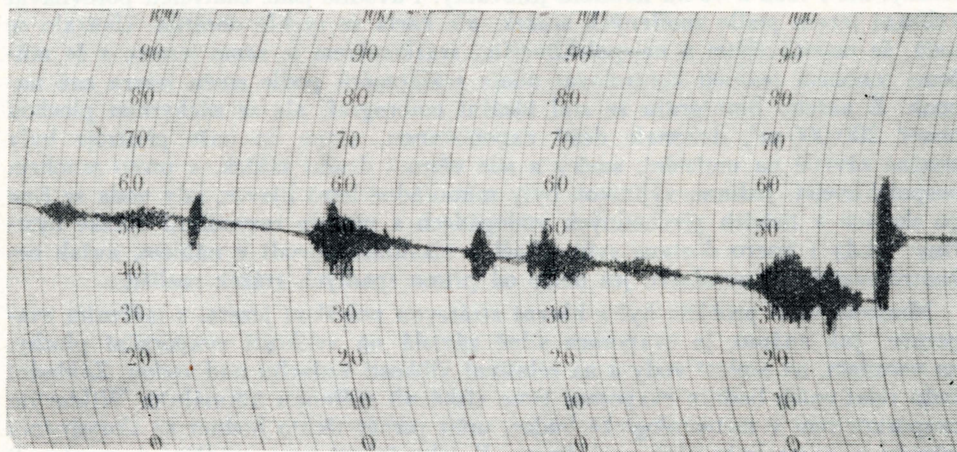
Měření ukázala, že podzimní konvekce je podstatně delší, rozmanitější a složitější než jarní, zvláště při proměnlivém nebo větrném počasí. Důvod je v tom, že všechna voda jezera se musí ochladit na největší hustotu, epilimnion z nejvyšších letních teplot až ke čtyřem stupňům, kdežto na jaře je rozmezí změn jen od nuly do čtyř stupňů. Proto také zamrzání jezera je podstatně pomalejší než rozmrzání,

které je někdy velmi rychle, téměř náhlé. Tak na příklad roku 1943 jezero začalo roztávat kolem břehů v neděli 25. dubna, ale už den na to, 26. dubna, bylo celé prakticky bez ledu, sotva jsme sestavili limnigraf. Naproti tomu nezamrzlé, teplem dýmající pleso uprostřed hluboce zasněženého lesa není nemožností, zvláště je-li dostatečně hluboké. Tomu, kdo je informován o neviditelných sestupných a vzestupných proudech uvnitř jezerních vod, nejsou tyto zdánlivě překvapující úkazy žádnou velkou záhadou.

Zimní stagnace však ani pod zamrzlou hladinou jezera není úplná. Led je sice špatným vodičem tepla, ale záření jím proniká do jisté hloubky a má vliv na jeho teplotu během střídání zimního počasí. Tím je ovlivněna nejen rychlost jeho narůstání dospodu, ale i změna teploty vody, která je s ním v dotyku. Tato změna pak působí malou zimní cirkulaci pod ledem, která se snaží vyrovnat teplotu vody. Na Štrbském plesu narůstá led nepravidelně, ale stále po celou zimu a dosahuje největší síly v únoru nebo v březnu. Rozdíly v dosažené síle ledu jsou značné, podle charakteru a trvání zimy (podle součtu záporných teplot), a dosahují několika decimetrů, v maximum přes půl metru. Jeho praskání, šířící se rychle přes celou hladinu a vracející se hromovým rachotem až z nejbzdálenějšího místa, zapůsobí na každého pozorovatele mocným dojmem, zvláště v noci. Je znamením toho, že i pod ledem se něco děje, že jezero pouze spí a připravuje se na nové jaro, na další cyklus odvěkých změn.

III

Vodní hospodářství je pro Štrbské pleso otázkou základní důležitosti. Již každý prostý návštěvník, který stane na jeho břehu a nevidí žádný potok přitékající ani odtékající, musí se tázat, čemu vlastně jezero vděčí za svou existenci; zdali je to podivuhodně náhodná rovnováha mezi vodou, která do plesa spadne ze vzduchu, a vodou, která se z plesa vypaří, nebo existuje-li nějaký skrytý přírodní „mechanismus“, který tuto záhadnou rovnováhu udržuje po staletí. Neboť sebemenší přebytek by musel vésti k vytvoření nějakého alespoň občasného odtoku, sebemenší nedostatek by působil zmenšování jezera a jeho postupný zánik. Ani jedno, ani druhé nenastalo.



Obr. 7. Pohyb hladiny Štrbského plesa od 23. do 27. srpna 1943. Na konci záznam bouřky s lijavcem 15 mm.

Jisto je *a priori*, že až do příchodu člověka jezero mělo vodní bilanci kladnou, jinak by neexistovalo. Jeho příjmy, atmosférické srážky a přítok z vlastního povodí, převyšovaly jeho ztráty, výpar do atmosféry a prosakování dnem a břehy. Jestliže ve výjimečných letech příjmy mimořádně převládaly, jezero se naplnilo až po okraj a přebytek se přelil přes přirozenou hráz. V našem století se podobný případ odehrál jednou, a to koncem prvé světové války, kdy po jarním tání voda z jezera tekla přes koleje električky na zubačku (sdělení pamětníka Martina Lehotského). Jestliže ve velmi suchých letech převládly ztráty, hladina jezera klesla, ale soustavné přebytky následovných let ji ponenáhlu přivedly zase k normální výši. Jak je tomu přesně číselně v naší přítomnosti, pokusil jsem se alespoň částečně rozluštit.

Místo dlouhodobého shromažďování pozorovacích dat a porovnávání jejich průměrů volil jsem raději metodu analýzy okamžitých situací, která dávala ihned výsledky a šetřila časem. Pozorovací řady při tom i tak vznikaly automaticky a dávaly nakonec průměry. Všechny faktory mající účast na vodní bilanci jezera jsme měřili a registrovali pokud možno nejpřesněji a pokoušeli jsme se rozluštit jejich vzájemnou souhru a závislost. Od limnigrafie jsme přešli k jakési mikrolimnigrafii, od centimetrů k milimetrům a v průměrech k jejich zlomkům.

Základním a výchozím číslem byla samozřejmě absolutní výška hladiny plesa. Poněvadž čtení na vodočetné lati bylo prakticky bezcenné, neboť nebylo oproštěno od periodických kmitů jezera, instalovali jsme brzy tlumený limnigraf, který spolehlivě zaznamenával výšku hladiny na milimetr přesně dnem i nocí pro každou hodinu. Za přirozený „normál“ výšky hladiny jsem zvolil horní hranu betonového hranolu v jihozápadním cípu jezera, v němž byl umístěn přepadový odtok. Výšku hladiny jsme registrovali každoročně od rozmrznutí vody do zámruzu, to jest přibližně od počátku května do konce října, právě půl roku. Zamrznutá hladina a sněhová vrstva na ní zamezily jakékoliv záznamy v zimní polovině roku.

Hlavní aktivní položku jezerní bilance, atmosférické srážky, jsme pozorovali a registrovali normálním způsobem na meteorologické stanici srážkoměrem a ombrografem. Mimo ně jsem instaloval na pozorovací věži jakýsi mikroombrograf se zachytnou plochou 2500 cm², který byl tak citlivý, že zaznamenával nejen slabé srážky, ale i rosu a vodní hodnotu jinovatky. Původně jsme zamýšleli porovnávat kolísání jezera podle změřených srážek, ale karta se rychle obrátila. Ukázalo se totiž, že nejcitlivějším a nejspolehlivějším srážkoměrem je samo jezero, a že můžeme mnohem reálněji kontrolovat údaje srážkoměrů podle změn jezera než naopak. Z našeho limnigrafu se stal ideální ombrograf, ale se zachytnou plochou téměř 200 000 m², dokonale dešti exponovanou, zatím co naše přístroje byly značně závislé na umístění, směru a síle větru i druhu srážek, a proto mnohem nespolehlivější. Jedinou výjimkou byly mimořádné letní lijavce, kdy voda se řine po skalách v tisících přechodných vodopádech a přivály rozvodňují horské bystřiny; tehdy i jezero dostane svůj příděl z vlastního povodí v náhlém, avšak nekontrolovatelném množství, jež nelze od přímo spadlých srážek rozlišit.

Mnohem větší problém byl s hlavní ztrátovou položkou jezera, s měřením evaporace. Jak známo, je evaporace silně závislá na velikosti evaporační plochy, na ventilaci, na teplotě vody a na relativní vlhkosti vzduchu nad vodou. Základní řadu relativních hodnot evaporace jsme získávali měřením normálním Wildovým evaporimetrem v meteorologické budce; určit poměr těchto hodnot ke skutečnému výparu z jezera bylo však problémem. K jeho řešení jsme nejdříve namontovali dva volně exponované evaporimetry, nechráněné před sluncem, větrem a srážkami, z nichž jeden měl evaporační nádobu bílou, druhý černou. Jich porovnání s údaji

z budky dalo, tento výsledek: za 131 letních dní beze srážek od května do října 1942 se vypařilo celkem

z černé evaporační nádoby 752,6 mm,
z bílé evaporační nádoby 629,2 mm,
v budce v chráněném evaporimetru 250,0 mm.

Byl tedy poměr mezi volným černým evaporimetrem a budkou 3,01 : 1,
mezi volným bílým evaporimetrem a budkou 2,52 : 1,
mezi černým a bílým volným evaporimetrem 1,20 : 1,
mezi bílým a černým volným evaporimetrem 0,84 : 1.

Abychom se měřením co nejvíce přiblížili faktickým poměrům na jezeře, instalovali jsme ještě plovoucí evaporimetr přímo na hladině, takže voda v jeho nádobě měla stejnou teplotu, expozici i ventilaci jako voda plesa. Byl umístěn na mohutném voru a zakotven přibližně uprostřed jezera po celé léto. Bohužel tento přístroj, ve který jsme vkládali nejvíce nadějí, jich splnil nejméně. Jednak jsme neměli zabránit tomu, aby do nádoby nestříkalo vlnobití při silném větru, jednak se o evaporimetr příliš zajímali turisté na lodkách, kteří stejně nekontrolovatelným způsobem měnili jeho vodní obsah, aby se obveselili. Výsledky byly proto spíš sporadické než systematické, ale nasvědčovaly tomu, že výpar z jezera je asi 2,5násobek výparu v budce, čili blízko volnému evaporimetru bílému.

Výpar bylo možno pro jednotlivé případy určit také výpočtem, neboť teplotu vody, relativní vlhkost vzduchu a rychlost větru jsme měli k dispozici z pozorování. Praxe však ukázala, že měření je podstatně spolehlivější než výpočet. Co platilo o měření a registraci srážek, platilo také o registraci výparu, neboť limnigraf poskytoval křivku klesající hladiny jezera s dokonalou spolehlivostí. V záznamu poklesu jezerní hladiny jsou ovšem mimo výpar obsaženy i ostatní eventuální záporné položky vodní bilance, hlavně hypotetický průsak břehy a dnem jezera, který nutno od výparu oddělit, což bylo vlastně jádrem celého problému. I k jeho řešení nám daly klíč registrace limnigrafu.

Jaké konkrétní výsledky daly registrace? Jako příklad uvádím rok 1942. V tabulce jsou sestaveny měsíční součty evaporace v budce a v obou volných evaporimetrech z 93 letních dní beze srážek, takže vliv srážek na měření je odstraněn. Současně je uveden celkový pokles vodní hladiny z těchto dní.

Měsíc	Počet dní	Pokles hladiny	Výpar v budce	Volný výpar	
				černý	bílý
květen	4	−18 mm	8,3 mm	26,1 mm	22,0 mm
červen	17	−104 mm	33,0 mm	121,3 mm	99,5 mm
červenec	19	−111 mm	43,2 mm	150,1 mm	124,9 mm
srpen	22	−94 mm	51,3 mm	150,6 mm	126,7 mm
září	18	−82 mm	35,4 mm	83,6 mm	71,9 mm
říjen	13	−57 mm	24,7 mm	62,9 mm	53,3 mm
Součet	93	−466 mm	195,9 mm	594,6 mm	498,3 mm
Průměr	1	−5,01 mm	2,10 mm	6,39 mm	5,35 mm

Registrace jasně ukazují, že celkový pokles jezerní hladiny je více než kompenzován výparem z volného evaporimetru, čili že prakticky neexistuje žádný průsak vody z jezera. Je-li jaký průsak vůbec, je tak malý, že se ani na milimetry citlivou registrací nedá dokázat. Tento překvapující výsledek je potvrzen ještě jinou cestou, a to rozborem jednotlivých dní. Rychlost poklesu hladiny o 5,01 mm denně je hodnota průměrná za celé léto; v jednotlivých dnech má pokles všechny hodnoty mezi nulou a maximálním pozorovaným poklesem 10 mm za den. Jsou to právě všechny hodnoty výparu, závislé na povětrnostní situaci příslušných dní. Pro rozhodnutí o existenci či neexistenci průsaku jsou nejcennější dny o minimálním poklesu čili o minimální evaporační. Dá se předpokládat, že průsak jezerní vody morénou bude pravidelný, nezávislý na výparu i na povětrnosti. Ve výjimečných dnech, kdy vzduch je v trvalé mlze zcela nasycen vodní parou a výpar je nulový, ukáže registrace poklesu čistý průsak, bez evaporace. Zkoumání registrací opravdu ukazuje, že není dne, kdy by jezero vůbec nekleslo, a že minimální pokles se pohybuje kolem jednoho milimetru za 24 hodin. To by zdánlivě nasvědčovalo trvalému průsaku asi 2 l/sec. Já osobně však v tom vidím důkaz, že není dne, kdy by nebylo vůbec žádného výparu z hladiny. I za trvale mlhavých dní, kdy v budce se nic nevypaří, je nad vodou vrstvička nenasyčeného vzduchu, neboť voda je vždy teplejší než průměrná teplota vzduchu a rozdíl je tím větší, čím je vzduch chladnější. A do této nenasyčené vrstvy se vypaří onen jediný milimetr, který jsme považovali za průsak.

Ještě o jedné okolnosti musíme v této souvislosti uvažovati. I když Štrbské pleso má vlivem své polohy jen zcela nepatrné povodíčko — ani ne dvojnásobek své vlastní plochy — přece jen musí mít teoreticky z tohoto povodí skrytý příjem vody podle specifického odtoku. O jeho velikosti je velmi těžko se rozhodnouti. Kdyby však tento skrytý přítok vody se kompenzoval s průsakem, neprojevil by se ani přítok, ani průsak v našich registracích sebe přesnějších. Pozorování mě přesvědčilo o tom, že pleso dostává přítok jen v případech mimořádných přívalů, kdy voda teče po povrchu, jak jsem už uvedl. Na skrytý podzemní přítok tak velký, aby hrál úlohu ve vodní bilanci plesa, nevěřím. Vyvěrání jezerní vody na svahu pod plesem jsem mimo kanalizaci také nikde nenašel. Domnívám se, že kdyby voda opravdu prosakovala morénou, bylo by to smrtelné nebezpečí pro celé pleso. Jak jsme viděli na osudu Skalnatého plesa, i malý proud si postupně rozšíří cestu mezi kameny a brzy není v lidských silách, aby zabránilo zániku plesa.

Registrace limnigrafu mi však odhalily ještě jednoho negativního činitele, o kterém se dosud neuvažovalo, který je však tak mocný, že dovede i mimořádně velké příděly vody kompenzovat. Je to transport vody větrem. Za rychlostí větru nad 20 m/sec vítr odtrhává zpěněné hřebeny vln a odnáší je z jezera. Tento efekt rychle stoupá s rychlostí větru, takže za mimořádných vichřic odnese nejen všechnu vodu spadlou do jezera srážkami, ale ještě vodu jezerní, takže jezero, místo aby silným deštěm stouplo, naopak silným větrem klesne. Krásným příkladem takové situace byla mimořádná kalamita z 2. září 1941, kdy silné srážky zcela rozmočily půdu a vítr v důsledku toho způsobil katastrofální vývrat v okolí plesa, a přece po vichřici bylo v jezeře o 100 vagonů vody méně než před ní. Byl jsem se o půlnoci přesvědčit o tom, zda naše limnigrafy správně píší při tak eminentní události a viděl jsem celé záclony jezerní vody urvané s hladiny, jak se řítily v periodických nárazech vichřice, usnášeny vzhůru. Limnigrafy sice psaly, ale rozdíl hladin před kalamitou a po ní byl jediným reálným číslem, které nám ze všech měření zbylo, neboť srážky, přítok, výpar a transport byly vzájemně zauzleny nerozluštitelným způsobem.

V každoročním průběhu svého vodního hospodářství začíná jezero nový cyklus rozmrznutím ledové pokrývky a zcela novým stavem své hladiny, závislým jednak na konečném stavu, jímž končilo na podzim, jednak na průběhu zimy a množství sněhu na ledové hladině. Objevou pravidelně hladina stoupne, často na nejvyšší stav celého roku. Hned nato nastane pravidelný, trvalý pokles hladiny, přerušovaný nepravidelnými srážkami. Na poměru srážek a výparu závisí v každém okamžiku absolutní výška hladiny. Za průměrný letní den beze srážek ubývá jezeru 11,4 l/sec, což znamená množství asi 1000 tun vody denně. Za nejteplejších suchých a větrných dní může však úbytek dosáhnout 25 sekundových litrů čili 2160 m³ za den. Vlhké, deštivé, chladné léto zvyšuje stav jezerní hladiny a současně zmenšuje výpar, mimořádné lijavce mohou také náhlým skokem hladinu zvednouti. Teplý a suchý podzim naopak vytrvale snižuje stav a jezero zpravidla končí před zámrazem nejnižším stavem celého roku. Novým zamrznutím se pohyb hladiny zastaví a roční cyklus se uzavírá.

Jaké byly osudy Štrbského plesa v naší přítomnosti? První lidský zásah do jeho přírodních podmínek byl regulační, jakási pojistka proti příliš vysokým stavům vodním. Byl to přepadový odtok na nejmělkším místě plesa, zabetonovaný kolmo do jezerního dna. Měl čtvercový otvor krytý železnou litinovou mříží. Na jaře býval pravidelně pod vodou a sál mohutným proudem jezerní vodu do hloubky, aby snížil stav hladiny na „normál“ a zabránil tak eventuálnímu vystoupení jezera z břehů. Jeho hltnost mě velmi zajímala, neboť hrála stěžejní úlohu v jarní bilanci jezera, ale určití ji nebylo úlohou právě jednoduchou. Při známém průřezu nebylo snadno určit průtokovou rychlost vody, která se mimo to ještě měnila s výškou hladiny. Nejschůdnější se ukázala cesta empirická, střídavé zakrývání a odkrývání odtoku, a sledování jeho účinnosti na limnigrafu. Za nejvyššího stavu hladiny se hltnost ukázala intenzitou 14 l/sec, což znamenalo pokles hladiny o 6 mm za den. Odtok tedy odváděl jezeru 1200 m³ vody za den, což bylo důkladné pouštění žilou. Jakmile ovšem hladina klesla na normál, odtok se ocitl na suchu a jeho účinek přestal. Bylo na něm vidět na prvý pohled, o kolik je hladina plesa nad normálem nebo pod ním. Zajímavá byla také vytrvalá vodní tromba, která se s intenzivním hvizdem tvořila v jeho hrdle.

Druhý lidský zásah do přírodních poměrů plesa byl mnohem osudnější. Odehrál se v létě a na podzim roku 1941 a zasloužili se o něj zaměstnanci firmy, která prováděla rekonstrukci kanalizace na jeho březích. Bez dlouhého rozmýšlení zahájili výkop pomocí dynamitu v jihozápadním cípu plesa a dostali se pod úroveň vodní hladiny, načež jezerní voda počala prosakovat do výkopu. Netrvalo dlouho, voda si vymlela cestu a z průsaku se stal proud stále mohutnější, který po řadu týdnů tekł dnem i nocí mezi pobřežní kameny. Nebezpečí zprvu podceňované a zanedbané se stalo hrozivým, protože všechny pokusy zastavit unikající proud vody končily nezdarem a ani kanalizaci nebylo možno dokončit. Teprve nasazení mocných čerpadel, které zvládly proud, umožnilo ucpání odtoku a zabetonování výkopu, v poslední chvíli. Nechybělo mnoho a následky mohly být pro pleso osudné. Ačkoliv léto 1941 bylo na srážky velmi bohaté (červen — srpen 440 mm), nešťastný výkop pohltit nejen všechnu spadlou vodu, ale ještě 200 mm z vlastní zásoby plesa, takže jezero celkem ztratilo na 100 000 m³, čili zhruba celou desetinu svého obsahu. Místo přebytku z bohatých dešťů skončilo hluboko pod normálem. Následující rok byl na srážky velmi chudý, takže jezero, které začínalo na jaře velmi nízkým stavem hladiny, dále nezadržitelně klesalo. Kameny se jeden po druhém vynořovaly z vody, celé části dna na mělkých místech jezera se obnažovaly. Po celé léto a hlavně na podzim 1942 skýtalo jezero smutný pohled. Bylo zřejmo, že

příroda sama nemůže nahradit ztráty, způsobené hrubým zákrokem člověka do vodního hospodářství plesa a že jezero zůstane trvale pod normálem, jestliže nepřijdou roky mimořádně bohaté srážkami.

Ve snaze napravit osudnou chybu pokusili jsme se koncem roku 1942 a v první polovině roku 1943 nahradit jezeru ztracenou vodu umělým přítokem. Voda pocházela z Mlynice, za vedení bylo použito gravitačního vodovodu, který zásoboval hotely a ostatní budovy. Kapacita vodovodu byla k tomuto cíli zvýšena dodatečným sběrným potrubím do vodojemu v Mlynické dolině. Od začátku ledna až do léta 1943 chrлил vodovod nepřetržitě dnem i nocí do jezera proud vody, pokud kapacita potrubí stačila. Ukázalo se, že lidská snaha je slabá proti silám přírodním a že by bylo třeba radikálnějšího (a nákladnějšího) zákroku, aby vodní zásoba jezera byla vrácena k původnímu stavu. Výkon umělého přítoku byl 4,6 l/sec, což znamená 400 tun vody za den, ale toto množství znamená jen 2,3 mm výšky hladiny, což nemohlo jezero naplnit. O 2,3 mm byl pouze zpomalen další pokles hladiny v roce 1943, což byl také rok srážkově podnormální. V letní sezóně, když nastala zvýšená spotřeba vody v hotelích, byla i tato výpomoc jezeru zastavena a pleso ponecháno svému osudu. Na podzim 1943 jsem se s plesem rozloučil a od té doby jsem jeho historii podrobně nesledoval. Avšak při občasných návštěvách v pozdějších letech jsem od té doby nikdy hladinu Štrbského plesa na normále a tím méně nad normálem neviděl, třebaže mezi nimi byla i léta na srážky velmi bohatá; a nevím, zdali pleso ještě někdy plné uvidím. Přepadový odtok byl také už dávno zrušen jako bezvýznamný pamětník zašlých, na vodu bohatých let.

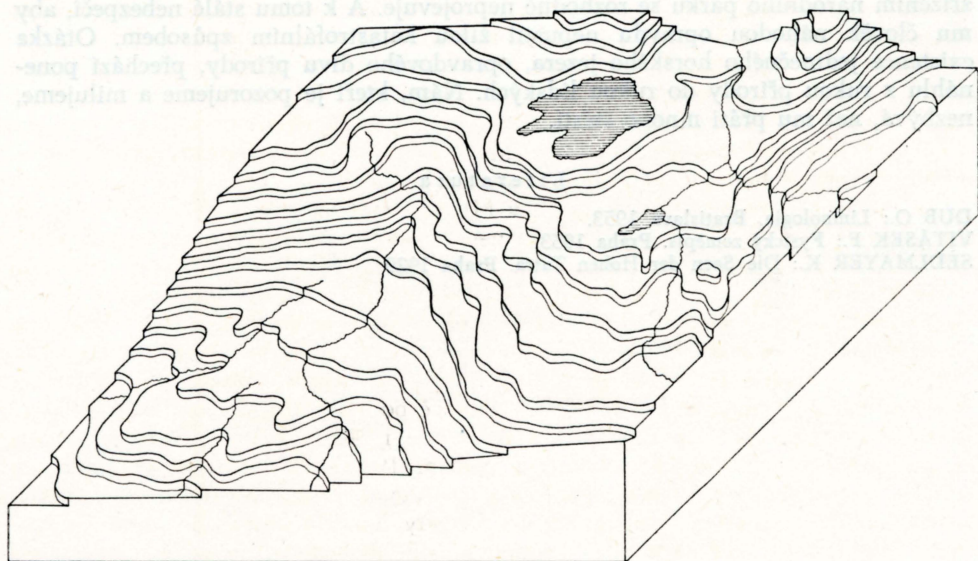
Nebezpečí právě vylíčené není pro Štrbské pleso nikterak trvale zažehnáno. Jeho vysunutá poloha, obklopená ze tří stran spádem terénu, předpokládá dokonalou, po staletí utvářenou nepropustnost jeho břehů a každé porušení této nepropustnosti může mít pro pleso katastrofální důsledky. Všichni, kdož provádějí jakékoliv zemní práce pod úrovní jezerní hladiny a v nedostatečné vzdálenosti od ní, měli by si být dobře vědomi tohoto nebezpečí, a každé sebemenší pronikání jezerní vody do výkopu okamžitě zamezit, než bude pozdě. Rádi se obdivujeme Štrbskému plesu jako přírodnímu skvostu a rádi se chlubíme jeho krásou před jinými; měli bychom proto mít alespoň minimální respekt před přírodními zákony, které pleso utvářely a jeho existenci udržují, a nenarušovat jejich odvěkou souhru hrubým, bezmyšlenkovitým zásahem.

IV

Necítím se povoláním a nemám ani odvahu k tomu, abych vyslovil k otázce o původu a vzniku Štrbského plesa nějakou teorii, takovou, abych jí sám věřil. Netajím se ani obdivem k těm, kteří podobnou odvahu mají. Nemohu však odolat abych neprohlásil alespoň to, že mne osobně dosavadní teorie o vzniku plesa o své pravdivosti ani o své pravděpodobnosti nepřesvědčily.

Podle běžně opakovaného názoru vděčí Štrbské pleso za svoji existenci někdejšímu ledovci, který svou činností nakupil morénové břehy a nakonec ustoupil z glaciální pánve. Během dlouhých dob skalní drť, nános a humus utěsnily mezery mezi kameny a vytvořily podmínky pro nadržení jezerní vody, jak je vidíme podnes.

Pohlédneme-li však na vrstevnicovou mapu okolí plesa nebo ještě lépe na blokdiagram jeho situace, zjistíme na první pohled, že jeho poloha je pravý opak podmínek pro vznik ledovce. Ledovec, jak známo, se vždy plazí podélnou osou doliny a svými čelnými morény přehrazuje právě tuto dolinu, kdežto Štrbské pleso



Obr. 8. Poloha Štrbského plesa. Vrstevnice po 25 m (o polovinu převýšeno).

není vůbec v dolině. Je vysunuto na skalní terase daleko od centrálních hor a spíš než v dolině leží na vyvýšenině terénu, dokonce právě na vodním předělu. Těžko si zde proto představit vznik ledovce, který by se musil plazit po hřebenu Soliska, místo aby tekł buď Mlynickou nebo Furkotskou dolinou. A jestliže ledovec doby ledové pokrýval horstvo celé s dolinami i hřebeny, potom by podobných útvarů musilo vzniknout více i na ostatních předhorských analogických vyvýšeninách; ale nepozorujeme nic podobného, Štrbské pleso je zcela unikátním případem.

Také pohled na diagram jezerního dna svědčí neklamně o tom, že běží soiva o bývalou ledovcovou pánev. Sotva můžeme považovat za morénu prudký, téměř dvacetimetrový svah, který ohraničuje z jižní strany hlubkové jádro plesa a podobá se spíše skalní rokli než ledovcovému údolí. Jezero je výrazně rozděleno kompaktní skálou v severní hlubokou a jižní mělkou část, a je málo pravděpodobné, že přes tuto překážku by se mohla navršit obrovská moréna o 200 metrů dále, na níž stojí hotely a která přechází v prudký svah pod plesem.

Domnívám se proto, že pleso můžeme mnohem pravděpodobněji pokládat za výsledek celkové horotvorné činnosti, která formovala hřebeny a doliny Tater a s nimi i hlubokou pánev Štrbského plesa na zcela nepravděpodobném místě. Nepopírám nikterak vliv ledových dob na její vývoj a změny, stejně jako byl vliv zalednění na celé horstvo; ale podmínku vzniku plesa v ledovci nevidím.

Geologická minulost plesa je zajiště velmi dlouhá a jezero existovalo po tisíce a možná i statisíce let bez podstatnějších proměn. Blízkých, drobných svahů, které by ho zasypávaly úšustem, nemá, právě tak nemá horizontálního transportu a výměny jezerní vody, takže erozivní činnost v něm je prakticky nulová. Stejně dlouhá by mohla být i jeho geologická budoucnost, neboť přírodní podmínky se mění sekulárně jen nesmírně pomalu. Přece však prognóza jeho budoucnosti je nadmíru nejistá, a to vlivem činnosti lidské. Za jediné století stala se z horského jezera nejrůznějšími stavbami jakási dědina a z jeho lesnatých břehů parková promenáda, a jak vývoj ukazuje, bude z něho v dohledné době jakási město. Návrat k přírodě

zřízením národního parku se rozhodně neprojevuje. A k tomu stále nebezpečí, aby mu člověk náhodou opravdu nepustil žilou katastrofálním způsobem. Otázka existence jedinečného horského jezera, opravdového divu přírody, přechází ponenáhlu z rukou přírody do rukou lidských. Nám, kteří je pozorujeme a milujeme, nezbývá, než mu přát mnoho štěstí.

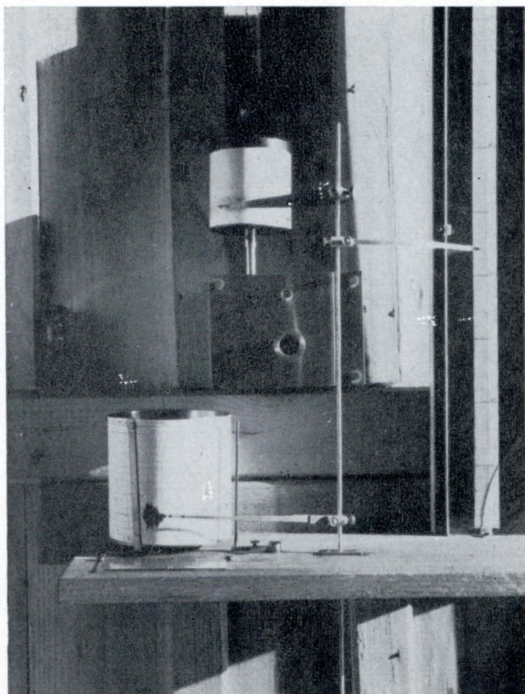
Literatura

DUB O.: Limnologia. Bratislava 1953.

VITÁSEK F.: Fysický zeměpis. Praha 1953.

SEDLMAYER K.: Die Seen der Hohen Tatra. Praha 1929

Obr. 1. Limnigrafy pro přesnou registraci absolutní výšky hladiny Štrbského plesa a periodických kmitů. (Foto A. Bečvář.)



Obr. 2. Bývalý přepadový odtok pro odvod nadnormální vody v jihozápadním cípu Štrbského plesa. Stálá rotující vodní tromba v jeho hrdle. (Foto A. Bečvář.)



Obr. 3. Typické zamrzání hladiny Štrbského plesa od břehů ke středu při doznívání podzimní konvekce nad hlubokými místy dna. (Foto A. Bečvář.)



Obr. 4. Zimní stagnace Štrbského plesa pod ledovou vrstvou. Patrný jsou hlavní zlomové čáry, podle nichž led praská a voda prosakuje trhlinami. (Foto A. Bečvář.)