

## Vajont

### Geologische Betrachtungen zur Felsgleitung in den Stausee

Von ERNST H. WEISS (Klagenfurt)

Am 9. Oktober 1963 um 22.30 Uhr glitt vom Monte Toc eine Felsmasse von über 250 Mill. m<sup>3</sup>, bei einer Gesamtdurchbewegung des Fußes der Bergflanke von 600 bis 700 Mill. m<sup>3</sup>, in den Stausee von Vajont, verdrängte schätzungsweise 30 bis 45 Mill. m<sup>3</sup> Wasser, das sich durch die enge Vajontschlucht (Abb. 2) wälzte und die direkt im Strahl liegende Ortschaft Longarone auslöschte. Diese Felsgleitung, eine der größten in der Geschichte, löste eine Flutkatastrophe aus, welche vier Ortschaften zerstörte und 2000 Menschenleben forderte.

Damit brach über die Bevölkerung des Piavetales und über die italienischen Ingenieure eine nationale Tragödie herein, die in ihrer Auswirkung auf den gesamten Kraftwerksbau und auf die Beurteilung unserer „fast ewig“ stehenden Bergflanken nicht abzuschätzen ist. Die Felsgleitung vom Monte Toc erlangte so für die Projektierung und den Bau von Kraftwerken große Bedeutung. In diesem Sinn soll mein Bericht über die Katastrophe und über meine geologische Vorstellung verstanden werden, denn Bauingenieure und Geologen tragen eine hohe Verantwortung bei der Beurteilung von Stauräumen, über die uns oft nur unzureichende Aufschlüsse und Beobachtungsdaten zur Verfügung stehen. Das Eigenleben einer Talflanke bleibt daher oft eine große Unbekannte.

Es ist mir bewußt, diesen Bericht nur unvollständig geben zu können, da mir keine detaillierten Untersuchungsergebnisse der E. N. E. L. (S. A. D. E) zur Verfügung standen. Außerdem ist es nicht meine Absicht, der Darstellung durch italienische Ingenieure und Fachkollegen irgendwie vorzugreifen. Die technischen Daten, die geologischen Verhältnisse und die durch die Felsgleitung wichtig gewordenen Höhenmarken bringe ich zum besseren Verständnis des Lesers genau. Die beobachteten Punkte wurden vereinfacht in den Zeichenskizzen dargestellt.

Der Verfasser kannte die Anlage vor der Katastrophe und suchte unmittelbar darnach mit den Herren Dr. TSCHADA und Dr. OREL, denen er für manche technische Hinweise und für die

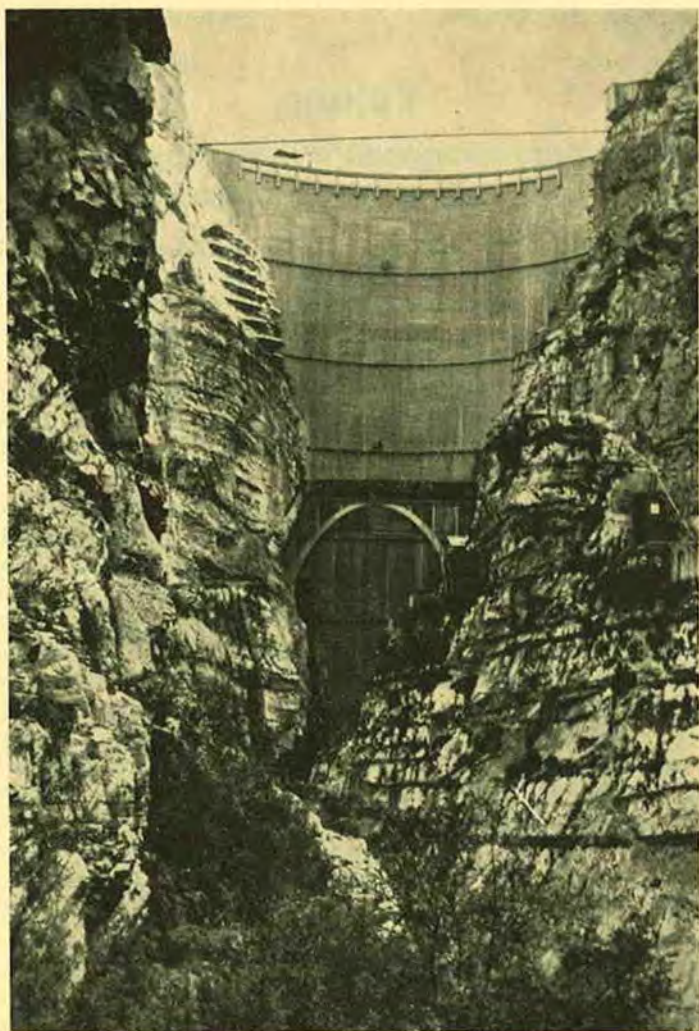


Abb. 1: Die Semenzamauer in der Vajontschlucht. Blick von der nun zerstörten Brücke nach Osten auf die 261 m hohe Kuppelmauer. Davor die Rohrbrücke der Triebwasserleitung Pieve di Cadore — Soverzene. In den oberen Widerlagerflanken werden die Felsankerungen durchgeführt. (Sept. 1962.)



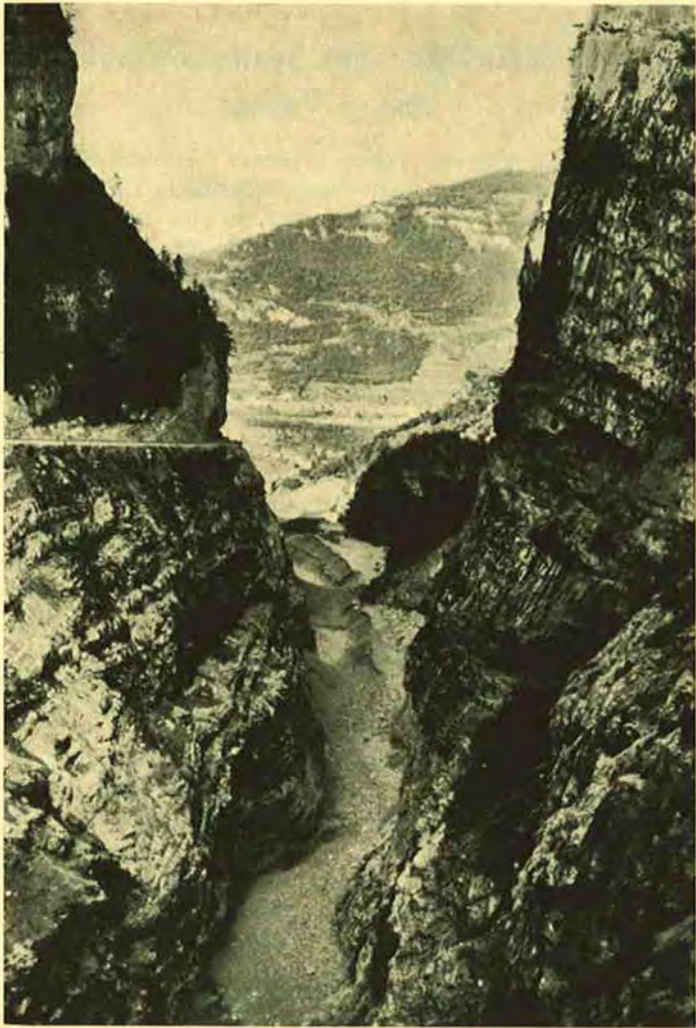


Abb. 2: Die Ausmündung der Vajontschlucht in das Piavetal. Durch diese Schlucht stürzten die Wassermassen und prallten wie aus einer Düse geschossen auf die Ortschaft Longarone, die man im Hintergrund erkennt. (Sept. 1962.)

Beistellung von Aufnahmen dankt, sowie später das Tal von Vajont. Dieser Bericht fußt auf einen Vortrag, den ich im April 1964 in Graz (Geol. Inst. Univ.) hielt.

## Die Kraftwerksanlagen des Systems Piave — Boite — Maè — Vajont

Der Stausee von *Vajont*, in einer östlichen Nebentalung der Piave gelegen, bildete als Großspeicher einen wesentlichen Bestandteil der Kraftwerkskette des Piavesystems, welche von der Elektrizitätsgesellschaft „Società Adriatica di Elettricità“ (S. A. D. E.\*) mit Sitz in Venedig zur Nutzung der Wasserkräfte im mittleren Piavetal und seiner Zubringer in den Jahren vor und besonders nach dem Zweiten Weltkrieg errichtet wurde.

Dieses System beginnt mit den alten Speichern Auronzo (*Val Anisei*) und Comelico (*Piave*), deren Wasser über die Kraftzentrale Pelos in den 9 km langen Stausee von Pieve di Cadore einmünden. Von diesem Stausee ( $I = 68,5$  Mill.  $m^3$ ) mit Stauziel 683,50 m Sh. führt durch die linke Talflanke der Piave ein 27 km langer Triebwasserstollen bis zur Kraftzentrale Soverzene, 390 m Sh. In diesen Stollen werden zusätzlich noch Wasser aus den westlichen Seitentälern vom *Valle Boite* mit den Speichern Vodo und Valle ( $I = 5$  Mill.  $m^3$ ), sowie vom *Valle Maè* aus dem Speicher Forno di Zoldo (vor dem Rutsch:  $I = 9,1$  Mill.  $m^3$ ) mittels zweier das Piavetal querender Dükerleitungen eingespeist.

Aus dem Osten schließen die Speicher *Vajont* (vorgesehener  $I = 175$  Mill.  $m^3$ ) und der südlich gelegene Speicher des *Val Gallina* ( $I = 6,2$  Mill.  $m^3$ ) an den Triebwasserstollen an.

Diese Triebwasserleitung von Pieve di Cadore nach Soverzene querte die Vajontschlucht knapp vor der Mauer mittels einer Rohrbrücke (Abb. 1), die jedoch durch die Flutkatastrophe weggefegt wurde. So riß die Verbindung zwischen dem Speicher Pieve di Cadore und der Kraftzentrale Soverzene ab, und mit einem Schlag war die wichtigste Krafterzeugungsquelle ausgeschaltet. Es sollte fast ein Jahr dauern, bis die neue Rohrbrücke unterhalb der unter Erddruck stehenden Vajontmauer neu gebaut werden konnte. In den vergangenen Monaten produzierten nur die den aufgezählten Speichern der Täler von *Boite*, *Maè*, *Gallina* und der Haupttriebwasserleitung zwischengeschalteten, kleineren Kraftzentralen.

---

\* Nach der Verstaatlichung im Jahre 1962 nennt sich die Gesellschaft E.N.E.L.-S.A.D.E.



In einer weiteren Ausbaustufe war eine Abarbeitung von Vajontwasser nach Osten in das *Valle Cellina* vorgesehen, eine Ausbaurichtung, die durch die Katastrophe zwingend wurde, weil der steigende Spiegel des Reststausees rasch abgesenkt werden mußte, was nur durch eine Stollenverbindung zwischen Stausee und *Valle Cellina* möglich war.

## Technische Daten von Vajont

Das Projekt der S. A. D. E. reicht bis zum Jahre 1920 zurück. Die Untersuchungen wurden vor dem Zweiten Weltkrieg begonnen und mit Unterbrechungen weitergeführt. Erst 1948 genehmigte das Ministerium für öffentliche Arbeiten das erste Projekt und 1952 das Projekt mit der Stauzielerhöhung für einen Inhalt von 150 Mill. m<sup>3</sup>.

Nach einer halbjährigen Prüfung der Verhältnisse, auch durch den Geologen G. DAL PIAZ, erhielt 1957 die Gesellschaft die Baugenehmigung für die Staumauer Vajont. Mit dem Aushub hat man 1956 begonnen, vollendet wurde die Mauer 1960.

Als ideale Sperrenstelle kam die in massigen Doggerkalken eingeschnittene, enge Vajontschlucht (*Valle del Diavolo*), 2 km Luftlinie östlich Longarone, in Betracht (Abb. 1).

Die Sperre ist eine schmale, leicht asymmetrische, doppelt gekrümmte Bogenmauer (= Kuppelmauer), von bestechender Eleganz, und wurde nach ihrem Erbauer Dr. Ing. Carlo SEMENZA benannt.

C. SEMENZA (1956) hat 17 Staumauern projektiert, gebaut und verfügte über hervorragende Erfahrungen, die er in unzähligen Publikationen zugänglich machte. Er starb zwei Jahre vor der Katastrophe, und es blieb diesem genialen Menschen und Ingenieur erspart, zu sehen, wie ein Teil seines letzten grandiosen Werkes vernichtet wurde. Seine Ingenieurkunst und die seiner Mitarbeiter dokumentiert aber die „Semenzamauer“, welche jener unvorstellbaren Naturkatastrophe widerstand.

Zur sicheren Verbindung der Mauer mit dem gesunden Felskern der Flanken wurden von vier Stollenniveaus (682, 618, 555 und 492 m Sh.) fächerartige Injektionsschirme bis 70 m in die Bergleibung und Sohlbereiche angelegt und seismisch überprüft. Zusätzlich wurde auf Grund der Untersuchungen von L. MÜLLER (1963) die Mauer mit dem Kern durch hunderte vorgespannte Ankerungen bis in 50 m Tiefe bei einer Zugbeanspruchung bis zu 100 t fest verbunden (siehe Abb. 1). Durch die Verstärkung der Widerlagerflanken konnte die Mauer den Belastungen der Katastrophe widerstehen.

Innerhalb der Mauer wurden an mehr als drei Dutzend Stellen

**Die wichtigsten Meßwerte über Mauer und Speicher**  
(S. A. D. E., 1960)

Kronenhöhe . . . . .	725,50 m Sh.
Vorgesehenes Stauziel, Maximum . . . . .	722,42 m Sh.
(I = 168,7 Mill. m <sup>3</sup> )	
(I = 150,0 Mill. m <sup>3</sup> vorgesehener Nutzinhalt)	
Erreichte Stauhöhe, gesteuert September, Oktober	
1963 . . . . .	710,00 m Sh.
(I = 138,0 Mill. m <sup>3</sup> )	
Durchschnittliche Höhe des Schluchtbodens . . . . .	500,00 m Sh.
Gründungssohle . . . . .	463,90 m Sh.
(Die letzten 40 m verjüngten sich von 60 m auf 30 m Schluchtbreite)	
Natürliches Einzugsgebiet . . . . .	62 km <sup>2</sup>
Stauseeoberfläche max. . . . .	2,7 km <sup>2</sup>
Stauseelänge ca. . . . .	6,5 km
Mauerhöhe . . . . .	261,60 m
(das ist fast zweimal die Höhe des Stephansdomes in Wien)	
Kronenlänge der Mauer . . . . .	190,15 m
Sehnenlänge des Bogens . . . . .	161,05 m
Sehnenlänge, inkl. „pulvino“* . . . . .	170,00 m
Scheitelstärke auf 470,00 m Sh. . . . .	22,11 m
Scheitelstärke auf 724,50 m Sh. . . . .	2,92 m
Aushubvolumen ca. . . . .	400.000 m <sup>3</sup>
(Mehrausbruch durch ungünstigen Verschnitt vertikaler Kluftscharen)	
Betonvolumen . . . . .	351.000 m <sup>3</sup>

hochempfindliche Geräte (Thermometer, Dehnungsmesser, Druckmesser, Pendelmeßgeräte usw.) eingebaut, um das Leben der Sperre, vor allem während der Füllung und Absenkung des Speichers, beobachten zu können. Sie wurden in der nunmehr weggefeigten Kommandokabine (= Sperrenwärterhaus) zentral zusammengefaßt. Die Meßergebnisse hätten vielleicht Werte über die Beanspruchung der Mauer während der Katastrophe geben können.

\* Die Kuppelmauer ruht auf einer Betonschwelle, „pulvino“ genannt, die eine Zentrierung des Kämpferdruckes ermöglicht und die Felspresung reduziert.



Zusätzlich diente der Mauerüberprüfung ein Triangulierungs- und Nivellierungsnetz, das ebenfalls ausgeschaltet wurde, weil die auf der Mauerkrone aufgereihten Meßpunkte mit der Flut in die Tiefe gerissen wurden.

## Geologie des Piave- und Vajontales

Das geologische Kartenblatt Belluno von G. DAL PIAZ (1941) zeigt einen Teil der venezianischen Einheit, die eine Sedimentabfolge von der unteren Trias bis zum Miozän aufweist. Der Hauptzug setzt sich aus norischen Dachsteindolomiten mit aufgelagerten Jura- und Kreidgesteinen zusammen, streicht aus dem Raume Feltre nach Nordosten, quert den engen Tallauf des Cordevole, biegt am Monte Pelf in die Ostwestrichtung um und baut die Berge beiderseits der Piave zwischen Longarone und Belluno auf. Entlang der Talfurchen von Maè und Vajont — das Piavetal senkrecht querend — häufen sich die verschiedenen jurassischen und kretazischen Sedimente, die großteils mächtige Gipfelstöcke und Bergflanken bilden.

Fassen wir übersichtlich die für Vajont so verhängnisvoll gewordene Stratigraphie zusammen, so folgen über den hellen, obertriadischen Dachsteindolomiten mit Übergängen zum Rhät vom Liegenden in das Hangende:

### **Jura** (Giuralias)

**Unterer Lias:** Feinkristalliner Dolomit mit bisweilen oolithischem Übergang aus den tiefsten Schichten.

**Lias:** Rötliche Ammoniten führende Mergelkalke sowie graue und gelbliche Kalke, die als dicke Bänke in oolithischen Zonen aufscheinen. Daneben leicht hornsteinführende, hellgraue Kalke und Dolomite mit dünnen Mergelschichten.

**Dogger:** In der Hauptsache oolithische, massige und gut gebankte Kalke, die nur stellenweise dichte Konsistenz aufweisen. Allgemein sind sie stark und regelmäßig geklüftet (vergl. Mauereinbindung!).

**Malm:** Weiße und rote, z. T. **ruschelige** bis plattige Kalke wechseln mit fleischfarbenen und hellen Plattenkalken, in denen Hornsteinlamellen bereits Anklänge an die Fazies des „Biancone“ zeigen. Sie sind im Raume Longarone (Vajont) sehr verbreitet.

### **Kreide** (Cretaceo)

**Unterkreide = „Biancone“:** Schuppige, feinschichtige bis schieferige Kalke oder weiße Plattenkalke mit Hornsteineinschaltungen.

**Mittelkreide:** Die Rudisten führenden Riffkalke, die bituminösen Cenomankalke oder die grünlichen, mergeligen Kalke scheinen im betroffenen Gebiet nicht ausgeprägt vorzuliegen.

**Oberkreide = „Scaglia“:** Sie beherrscht auf großen Hangflächen durch ihre roten Mergel, Mergelschiefer und die rötlichen, plattigen und dünnbankigen Kalke mit feiner Zerhackungsstruktur das Bild. Zusätzlich kommen noch aschenfarbige und helle Mergel mit kalkigen Einschaltungen vor.



Oligozän und Eozän liegen tektonisch eingefaltet in der Vajontalung südlich Erto hauptsächlich in Flyschfazies vor. Die tonigen Kalke und Mergel führen Nummuliten und gehören stratigraphisch dem unteren Eozän an.

An pleistozänen und alluvialen Ablagerungen liegen im Steilgehänge nördlich und südlich der tief eingesägten Vajonttalung auf ausgeprägten eiszeitlichen Terrassenflächen bis -leisten dicke würmeiszeitliche Moränenablagerungen sowie jüngere Hangschuttfächer und Blockstürze — bei Casso ein Bergsturz — vor. Zwischen Casso und Erto wurden nach der Hangentblößung durch die Flutwelle einige vom Gletscher abgehobelte Rundhöcker freigelegt.

Wie wir später noch sehen, waren die ruscheligen und gleitbaren Mergel, Kalkmergel und mergeligen Kalkabfolgen von Oberjura bis Oberkreide für eine zusätzliche Wasseraufnahme geradezu prädestiniert und wirkten nach ihrer Übersättigung als Gleitteppiche.

In den Talflanken der Piave bei Longarone fällt besonders die bruchmechanische Verformung auf: Die kretazischen Gesteine sind gegenüber dem Dogger und Malm tiefer versetzt. An der Piavelinie, die einerseits dem heutigen Flußlauf, andererseits der alten Entwässerungslinie über den Lago di S. Croce folgt, traten große bruchmechanische Bewegungen im Laufe der Jungtertiärzeit auf. Dieser Linienzug ist sowohl mit NS bis NNE verlaufenden, regional durch die Südalpen durchziehenden Bruchstörungen (Judikarien-, Suganalinie u. a.) als auch mit der Senkung der Adria in Beziehung zu bringen. Ihre Auswirkungen äußern sich in Form von Erdbeben bis in die heutige Zeit. Epizentren finden sich so in Feltre, Belluno, am Alpensüdrand, am Nordrand der Südalpen in der Karnischen Kette und speziell um Tolmezzo. Es wird daher verständlich, wenn der betrachtete Raum des Piavetales stets Regungen der Erdkrustenbewegungen mitzumachen hatte und so viele Steilhänge erschüttert und schwachlabile Zustandsformen geschaffen wurden. Nicht nur die Unterschneidung von Eis, das Einwirken von Wasser, sondern auch obige Bewegungen müssen für erhöhte Block- und Hangschuttbildung, für Bergzerreibungen, für Zerlegungen mächtiger Bergplateaus in Einzeltürme, für Hangabschälungen und Talzuschiebe als zusätzliche Faktoren in die veränderbare Formgestaltung des Gebirges miteinbezogen werden. Die labile Anlage des Monte Toc-Nordhanges ist auch auf diese Erscheinungen zurückführbar, jedoch spielen geologische und vornehmlich hydrogeologische Einflüsse mit.

Betrachten wir nun die tektonischen Verhältnisse des Vajontales: Südlich des Monte Toc liegt über dem Dachsteindolomit in mächtiger Ausbildung der Lias, auf dem der Dogger folgt, welcher den Gipfel und die steile Nordflanke aufbaut. Die Doggerkalke fallen mit 30 bis 50° nach N ins Vajonttal ein, drehen im südlichen Bereich der Mauer gegen NS und bauen mit flachem E-Einfallen die über 300 m hohen und etwa 1,5 km langen Wände der vorderen Vajontschlucht auf. In derselben NS-Streichrichtung durchziehen die Schichten den Steilhang auf der linken Piaveflanke gegen Norden.



Auf den mächtigen Plattenschüssen des Doggers vom Monte Toc folgten vor der Gleitung die Schichten vom Malm bis zum Eozän. Gewaltige tektonische Verformungsakte legten diese Sedimentabfolge in Falten, ließen Teile davon abscheren oder versetzten sie blockartig. Im Zuge dieser nacheozänen Tektonik schob sich auf die kretazischen Gesteine, die aus dem Süden und Südosten kommen und das Tal schräg nach oben gegen Casso queren, eine mächtige Deckscholle jurassischer Sedimente des Monte Borga — die Kreide wird so von Jura unter- und überlagert.

Für den Monte Toc-Nordhang und das Vajonttal gab G. DAL PIAZ (1956) folgende Darstellung: Die vordere Schluchtstrecke wird von massigen Doggerkalken gebildet, wobei glücklicherweise keine Bewegungsspuren festzustellen sind. Allerdings brachte L. MÜLLER (1963 a) während des Baues der Mauer instruktive Beweise, daß natürliche Entspannungsvorgänge in der Schluchtkerbe vorliegen und nur durch tiefsitzende, vorgespannte Ankerungen eine Festigung der Mauerwiderlager zu erreichen sei. G. DAL PIAZ beurteilte die Felswände günstig zur Einbindung einer Mauer. Für die südliche Talflanke hatte er dagegen schwerwiegende Bedenken, schätzte aber die abgehenden Kubaturen für nicht so hoch, daß gegen die Errichtung eines Stausees Einwände erhoben werden müßten. Er verlangte 1957 Sicherungsmaßnahmen am Grunde des Stausees und in der südlichen Talflanke, die von der Bauherrschaft auch sorgfältig und in sehr großem Umfange ausgeführt wurden. DAL PIAZ's Urteil stützte sich auf das geologische Bild. Das tektonische Hauptmerkmal zeichnete sich durch eine Hangendserie von invers gelagerten, langgestreckten Kalken aus, die von horizontalen (ich beobachtete auch mittelsteil N-einfallende Flächen!) Gleitflächen begleitet sind. Durch diese Schertektonik wurden die Schichten des Malms, Biancone und der Scaglia gleitbrettartig gestört. Die ziegelrote Farbe der Scaglia sticht von jenen weiß bis grau gefärbten, sie begleitenden Juragesteinen (Malm) deutlich ab, und man kann so leicht die ausgeprägte Grenze der stattgefundenen Bewegungen erkennen. Zwei Kilometer östlich der Mauer stellte DAL PIAZ im mittleren Teil des hinteren Vajonttales noch die Existenz von flyschartigem Eozän mit Verquetschungen und Verfäلتelungen fest. Diese stratigraphisch höchste Schichte dürfte meiner Meinung nach im Zuge der Faltenmechanik mit Überkipfungsvorgängen eingewickelt und anschließend durch die Gleittektonik noch überfahren worden sein. G. DAL PIAZ spricht nur von einem Überfahren des Eozäns durch die Scaglia, wobei letztere auf dem Gegenhang sich abstützte und so ein wirkliches Fenster erzeugte.

Als Ablösungsflächen fixierte er richtig jene alten Bewegungs-



horizonte im Bereich der Scaglia und der mergeligen Gesteine, an denen er künftige Abschiebungen zu erwarten glaubte. Die Großmechanik des Jahres 1963 gab ihm recht.

Die Deutung der Flanke wurde dadurch erschwert, daß der größte Flächenanteil gegen die Steilhänge des Monte Toc von Moränen und Schuttmassen überdeckt war. Das Ausmaß dieser Lockermassenaufgabe kam erst anlässlich des ersten Rutsches im Spätherbst 1960 zutage (Abb. 3 und 9).



Abb. 3: *Blick auf die Monte Toc-Seite mit der glazial überprägten Ver-  
ebnung, auf der die Almen von Pian di Toc liegen. Diese For-  
mgebung wird auf einen alten Talzusub zurückgeführt.  
Die Aufnahme zeigt die Situation nach dem Rutsch von 1960.  
(Nach G. SCHNITZER 1964.)*



G. DAL PIAZ bekräftigte seine Aussage im abschließenden Bericht und verlangte für die zu erwartenden großflächigen Bewegungen in das Staubecken unbedingt die Freihaltung großer Kubaturen zur Auffangung der Massen. Dem wurde auch Rechnung getragen — die 700.000 m<sup>3</sup> des Rutsches 1960 wurden ohne Schaden aufgenommen. Gegen die Dimensionen vom Oktober 1963 war man aber machtlos: weder Geist, Intuition, noch Erfahrungen hätten dies vorher vermuten lassen!

Vielleicht hat G. DAL PIAZ in seine Betrachtungen auch eine Bewegungsfläche miteinbezogen, welche ehemals parallel zum Monte Toc-Steilhang lag und an der eine große Blockabsetzung, die zur Ausbildung der Terrassenflur des Pian di Toc führte, stattfand. G. SCHNITZER und E. WEBER (1964) vermuten eine alte Sackungsmasse auf der linken Talflanke (siehe Abb. 3). Ich bin ganz sicher, daß talzuschiebende Kräfte am Werke waren und die gesamte ehemalige Flankenmasse des Monte Toc-Oberhanges in die ältere Talung einglitt und den Raum zwischen Vajontschlucht und Verbnungsniveau bildete.

Folgende Gedanken und Beobachtungen sprechen dafür:

1. Die heftig verformten, dem Dogger aufliegenden Schichten hatten eine stete Gleitbereitschaft, die durch geringste tektonische Bewegungen aktiviert werden konnte.
2. Im Zuge des früheren Schervorganges gegen das Taltiefste entstanden Rißzonen, in die Wasser in den Nacken der gleitwilligen Flanke eindrang.
3. Mitzuberücksichtigen ist die Beeinflussung durch soliflukative Veränderungen während der letzten Kälte-Wärme-Perioden des Pleistozäns.
4. Eine intensive Beeinflussung der Hangstabilität mochte ein zeitweilig auftretender Schmelzwassersee im letzten Interglazial geschaffen haben. Der rückziehende Piavegletscher könnte vorübergehend das damals noch nicht tief eingesägte Vajonttal verstopft und so einen See gebildet haben, der auf die Fußpartien des linken Hanges einwirkte und eine „Großsackung“ herbeiführte. Es könnten ähnliche Verhältnisse wie in der Zeit 1957 bis 1963 vorgelegen haben. Mit erhöhter Erosionstätigkeit wurde Material abgeführt, und erst dann fräste sich der Vajontbach tiefer.
5. Durch die fortschreitende Erosion wurden die labilen Fußpartien geschwächt und der Sackungsvorgang weitergetrieben (vergl. K. TERZAGHI, 1962).

6. Für die frühere Sackung spricht die Morphologie vor 1963. Unzählige Flanken mit diesen nachzuweisenden Erscheinungen könnten als Vergleich aus dem ostalpinen Raum aufgezählt werden. Ich will hier unter vielen nur J. STINI (1942) nennen.
7. Die Anrißlinie des Jahres 1960, an der 1963 die Gleitmassen sich abschälten, war kein Zufall. Die von der alten Sackung vorgegebene Schwächezone mußte sich als Ablösungsfläche wieder betätigen.

In G. SCHNITTERS Arbeit war eine Aufnahme über die Monte Toc-Nordseite mit der alten Sackungsmasse abgebildet, die ich hier als instruktiven Vergleich wiedergebe (Abb. 3).

## Die Katastrophe

Begonnen hat der Monte Toc-Hang im Jahre 1959 an geneigten Flächen des Biancone und der Scaglia-Felsteile mergeliges und erdiges Material auszuscheren. An den Steilabbrüchen lösten sich Pfeiler und Lockermaterial — im Zusammenhang mit der ersten größeren Füllung brachen im Herbst 1960 verschiedentlich aus den hohen Schluchtwandpartien (vergl. diese in Abb. 9) Felsteile nieder —, und es kam Bewegung in den Hang, die im Oktober/November eine Kubatur von 700.000 m<sup>3</sup> in den See eingleiten ließ und ihn 150 m hoch auffüllte (Abb. 3 und 9). Man entschloß sich, auf der nördlichen (rechten) Talseite einen Umleitungsstollen anzuschlagen, um bei einer totalen Absperrung des Sees durch einfahrende Lockermassen Stauwasser von rückwärts nach vorne leiten zu können. Der Geologe Prof. PENTA soll damals Vermutungen geäußert haben, daß der Rutsch in größerem Ausmaß weiter abrollen werde. Ein Jahr später beurteilte er nach Beruhigung des Hanges die Lage etwas günstiger. Außerdem verlief anscheinend der hydraulische Modellversuch — unter ungünstigen Annahmen prüfte man im Labor die Kriechbewegungen — positiv.

Von Herbst 1961 bis Anfang September 1963 verlangsamten sich die durch Geländepunkte kontrollierten Kriechbewegungen. Auch die an verschiedenen Punkten gemessenen Bergwasserstände zeigten keine aufregenden Tendenzen. So wurde mit behördlicher Genehmigung 709 m und etwa zehn Tage vor der Katastrophe der höchste Wasserstand von 710 m Sh. erreicht. In der Zwischenzeit wirkten während der zwei letzten Jahre reichhaltige Frühjahrs- und Herbstniederschläge ein. Mit dem hochgehobenen Stauspiegel begann der Hang plötzlich wieder zu kriechen und erreichte vor der Katastrophe Relativbewegungen von mehreren Zentimetern bis Dezimetern pro Tag. Im labileren Westteil waren die Bewegungen grö-





Abb. 4: Gesamtansicht der Felsgleitmasse des Monte Toc. 600 bis 700 Mill.  $m^3$  wurden bewegt, wovon 250 Mill.  $m^3$  den früheren Stauraum bedecken. Markiert sind die zwei Abrißschalen, die Gleitfläche über der Mauer (GF), der Nackensee (N), die Aufschiebungsfront (AF) mit dem „Schluchtturm“ (T) und der Reststausee (R). Im Vordergrund die beschädigte Semenzmauer, der kleine Restwassersee und die Einsturztrichter. Man beachte ferner den Verstellungsbetrag an der abgerissenen Straße (St).

ßer als östlich, und in jenem Abschnitt muß nach Lage des jetzigen Materials mit den Wulsterscheinungen in dem baumbestandenen Gleitteil auch rascher die Gleitung eingesetzt haben.

Auf diese fließende Bewegung hin wurde der See um einige Meter abgesenkt, die sich anbahnende Katastrophe war aber nicht mehr aufzuhalten. Die Bewegungsbeträge wurden im Laufe des 9. Oktober größer.

Am 9. Oktober 1963 um etwa 22.30 Uhr (weitere Angaben: G. SCHNITTER 22.39 Uhr, E. TRAPP 22.43 Uhr) brach das Inferno los. Millionen Kubikmeter flossen förmlich vom Monte Toc in das Tal und auf einer steilen Gleitbahn am Gegenhang hoch, verdrängten das Wasser gegen die Stauwurzel und Millionen Kubikmeter Wasser trafen tangential die Mauer, glitten über diese ins Piavetal und brachten dort Tod und Vernichtung.

Nach Aufhebung der inneren Reibung glitten die Massen mit überaus hoher Geschwindigkeit nach Norden. Einheimische gaben zwei bis vier Minuten, G. SCHNITTER führt fünf Minuten für die Dauer des Gleitvorganges an. E. TRAPP (1963 b) legt die Aufzeichnung des Wiener Seismographen (Luftlinie von Longarone 376 km) mit einer kurzen Schwingungsdauer von sechs bis acht Sekunden vor und stellt sie dem zerstörenden Erdbeben bei Belluno (18. Oktober 1936) mit ein bis zwei Sekunden gegenüber. Aus dem Seismogramm wird sofort klar, daß kein Beben, sondern die Felsgleitung plus Flutwelle registriert wurde. Obwohl eine Auswertung verschiedener seismographischer Stationen nicht vorliegt, ist ein überaus schneller Gleitvorgang zwischen ein und zwei Minuten anzusetzen. Hernach kamen noch Teilbewegungen und Steinlawinen.

Eindrucksvoll und schaurig war das Bild bei meiner ersten Begehung am 12. Oktober 1963 (siehe Abb. 4). Zwei riesige Abrißschalen am Monte Toc taten sich auf (Abb. 5). Die Gleitflächen im Doggerkalk waren wellig poliert, im Westteil lagen noch Lockermassen, die in der Zwischenzeit abrutschten, auf; ebenso hat sich auch die ehemalige Abrißkante höher verlegt. Die Gleitflächen haben eine Neigung zwischen 35 und 45°. Im Osten wurde eine über 100 m hohe steil W-fallende NS-Verwerferfläche sichtbar, die den Gleitabriß begrenzte und entlastete. Wäre sie nicht aktiviert worden, hätte die Gleitung vielleicht noch weiter nach Osten gegriffen. Im Mittelteil fielen die beiden Abrißschalen mit dem Bachlauf, der hoch oben am Monte Toc wurzelt, zusammen. Im Westen ging die mittelsteil N-fallende Fläche in eine flach ENE-fallende über. So ging die eigentliche Gleitung knapp hinter der Mauer vorbei. Der Zwischenraum füllte sich wohl mit erdigem, schlammigem Material und ließ einen Restsee von 25 bis 50 m Tiefe bei einer



Oberfläche von etwa  $200 \times 200$  m stehen. Die Mauer erhielt nur die sekundären Bewegungsäußerungen, deren Kräfte noch immer sehr hoch waren.

Unter den Abrißwänden lag eine 2 km lange und 1 bis 1,5 km breite Fels- und Lockermasse fladenartig im Staubecken und am Gegenhang auf. Die Mächtigkeit der Masse dürfte im Mittel 350 m betragen. Die südliche Schluchtwand lag mindestens 140 m höher und 400 bis 500 m weiter gegen Norden verrückt. Die stark verfältelte Gesteinsfolge lag nach der Katastrophe in ihrem ursprünglichen Verband als 1,2 km lange Barriere, wohl mit Zerbrechungen an vorgezeichneten Klufscharen und Verwerfern, am Gegenhang. Ein kleines turmartiges Gebilde, der „Schluchtturm“, stand der Aufschiebungsfront als Wächter vor — er war früher an der Süd- wandung gestanden und deshalb gut zu identifizieren. Die italienische Gesellschaft hat sicher gute Vermessungsunterlagen, aus denen, wenn jemals veröffentlicht, die Verstellungswerte exakt zu ermitteln sein werden. Gegen die Mauer zu lockerte sich das Material bis auf schluffig-sandige Korngröße auf; dies war der Bereich der Rutschung vom Jahre 1960. Das Wasser sickerte dort in dem aufgelockerten Material rasch durch und hinterließ große Schlucktrichter. Südlich der Stirnfront wölbte sich der Felsrücken direkt im ehemaligen See bis auf 120 bis 150 m über die Mauerkrone, fiel dann steil wieder in Richtung der neuen Talmulde und zur tiefsten Stelle, ungefähr im Schnittpunkt zwischen der Bachfurche vom Monte Toc-Nordhang und den beiden Abrißflächen. Hier lag ein Nackensee eingebettet (Abb. 4), der in der Zwischenzeit bis auf einen kleinen Rest wieder verschwand. Östlich und westlich davon lagen breitflächige Gleitkeile zwischen Stirnfront und Gleitflächen, auf denen ein schräg stehender Waldbestand die Gleitrichtung anzeigte. Der Almboden war aufgerissen, gewellt und die ehemalige Straße um mehrere 100 m versetzt.

Der Wasserstoß glitt am Gegenhang fast 270 m hoch und schürfte Rasendecken, Verwitterungsschwarten und Felskubaturen, von unten aufbrechend, hinweg. Der ehemalige Buschwald wurde entwurzelt und unter der Wucht des Wasser platzten ganze Flanken. Die rückfließende Wasserfront saugte die großflächig aufgelockerten Partien in die neu entstandene Ausflußrinne zurück — so kam es zum Abschälen mehrerer 1000 m<sup>2</sup> großer Flächen. Stützmauerquadern bei Casso und tiefer wurden von unten aufgehoben und flogen an manchen Stellen auf die bäuerlich genutzten Terrassenflächen. An einigen Stellen hob das Wasser große Kalkpartien aus dem Verband, die beim Rückströmen umkippten; kompakte Felsrücken wurden zersägt und wie Holzstämmen in einem Wildbach

aufgerissen. Metertiefe Rinnen und zerfurchte Partien im früher gut bewachsenen Hang charakterisierten das Bild. In der Ausflußrinne versickerte ein Teil des Flutwassers und führte neben großen runden Schlucktrichtern zur Bildung von lehmigen und feinkörnigen Ablagerungsschichten, die in Abb. 8 rechts des Felsturmes als streifenartige Anlagerungen zu sehen sind. Ein Zeichen dafür, daß das Wasser von feinsten Felspartikeln und mergelig-lehmigen Substanzen übersättigt war.

Der direkte Schwall vor der Gleitfront erreichte noch Casso (Abb. 8 und 9), riß vor und nach Erto (besonders S. Martino) unzählige Häuser weg und tötete viele Menschen. Die Bewohner auf der Monte Toc-Seite wurden Tage zuvor evakuiert. Der auslaufende Schwall gegen die Stauwurzel riß die Uferböschungen auf, zerstörte noch Straßen und hob eine elegante Brücke im rückwärtigen Vajonttal aus ihren Fundamenten. Die Wassermassen aber, die über die Mauer in einem hufeisenförmigen Querschnitt fegten (Abb. 10),

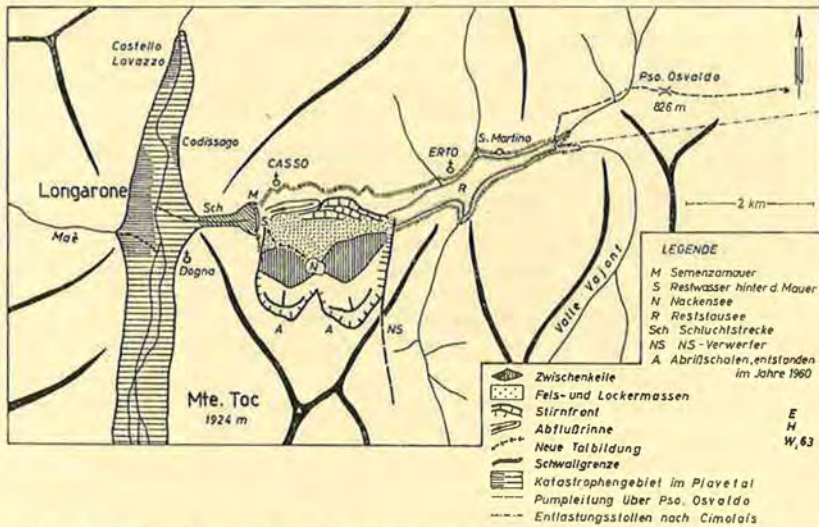


Abb. 5: Planskizze über die Felsgleitung in den Stausee von Vajont, 9. Oktober 1963.

wurden in der Vajontschlucht eingengt (Abb. 2) und prallten, wie aus einer Düse geschossen, ins Piavebett und auf den Gegenhang, wo sie Longarone wegrasierten. Quer zur Piave entstand ein „Loch“, dessen Aushubmaterial auf die Böschung gegen Longarone geworfen wurde (vergl. Längenschnitt in Abb. 6).

Unter der Annahme, daß zum Zeitpunkt der einsetzenden Glei-



tung noch 130 Mill. m<sup>3</sup> Wasser im Speicher waren und die Felsmassen ein Drittel der Speichervlänge verlegten, kann geschlossen werden, daß etwa ein Drittel bis ein Viertel des Speicherinhalts über die Mauer gehoben wurde. Dies entspräche einer Menge von 30 bis 45 Mill. m<sup>3</sup>.

Außer der Brücke über die Mauer wurde der oberste linke Teil der Mauer beschädigt und die luftseitigen Kontrollstege (vergl. Abb. 1) weggerissen. In dem untersten Drittel der Mauer ist der Beton durch fallendes Wasser mit Blockwerk aufgekratzt. Die Kommandckabine und sämtliche Anlagen auf der linken Seite wurden weggespült, die Schächte und Stollen sowie das Kavernenkrafthaus Colomber zerstört und verdrückt. Viele mit Injektionen betraute Arbeiter erlitten den Tod. Außer der Rohrbrücke zerstörte die Sturzflut eine große Brücke über die Piave und eine kleinere in der Vajontbachtmündung. Mit dem Fernglas war festzustellen, daß die Ankerplatten allgemein hielten, die Ankerbalken schwer beschädigt, die Verbindungsstege zwischen den Balken weggerissen wurden. Ferner schälten sich durch die Wucht des mit kompakten Bestandteilen vermischten Sturzwassers zahlreiche Felspartien ab und öffneten einige Kluftrisse.

Teile der Galerie, durch die die Straße Longarone—Erto führte, wurden mit felsigem Material verfüllt, Felsteile zerstört und die große Brücke direkt unterhalb der Mauer zerfetzt. Wie die Verwüstungen in Longarone, in Faè, talab und talauf aussahen, kann der Leser aus Zeitungsberichten erahnen — das Piavetal war eine einzige Schotter- und Schlammwüste.

Einige günstige Umstände waren katastrophenvmindernd, und zwar: Die Verbreiterung des Talbettes ab Longarone und das Nichtzerbersten der Mauer. Bei einem Bruche derselben wären einige Millionen Tonnen Erd- und Schlammmaterial, welches heute hinter der Sperre lagert, ausgebrochen, hätten sich quer zur Piave ergossen und diese während der Nacht aufgestaut. Unvorstellbar höher wäre die Tragödie nach dem Durchbruch der gestauten Piave gewesen. Trotzdem waren die im Piavetal geführten Wassermengen sehr gewaltig.

G. SCHNITTER gibt nach den Aufzeichnungen der Limnographenstationen folgende Spitzenwerte an:

In **Ponte nelle Alpi** (15 km südlich Longarone) 12,5 m Wasserstand über normal, ca. 4000 m<sup>3</sup>/sec Durchfluß, 7 bis 8 m/sec Geschwindigkeit der Welle.

In **Segnsino** (64 km talwärts Longarone) noch ca. 2200 m<sup>3</sup>/sec Durchfluß, 2 m/sec Geschwindigkeit.

### **Wichtige Höhenmarken im Bereich der Felsgleitung und der Flutwelle\***

---

Abrißkante am Monte Toc, östlicher Teil (Abb. 4 und 5)	1300 bis 1400 m Sh. ansteigend
--	--------------------------------

---

\* Die Werte basieren teilweise auf vergleichenden Aneroidkontrollen und Schätzungen von bekannten Fixpunkten aus.

Lage der pleistozänen Terrassen- flur auf der Monte Toc-Seite (Abb. 3) zwischen	780 und 820 m Sh.
Lage des Nackensees	750 bis 760 m Sh.

**Am Gleitnacken entstand eine  
Depression von — 40 bis — 50 m**

---

Ursprüngliche Schluchtschle	500 m Sh.
Höchste Erhebung der Gleitmasse im Bereich der früheren Schlucht	860 m Sh. = 135 m über Mauerkrone

**Der ehemalige Stauraum ist im  
Mittel mit einer 360 m hohen  
Masse von Fels, Trümmern, Sand,  
Lehm und Bergwasser verfüllt**

---

Frühere Lage der Spitze des „Schluchtturmes“ an der süd- lichen Schluchtwand	690 m Sh.
Heutige Lage des „Schluchttur- mes“ (Abb. 8 und 10)	830 m Sh.

**Dieser identifizierbare Punkt hat  
sich um etwa 140 m gehoben und  
von seinem Ausgangspunkt 400  
bis 500 m nach Norden entfernt**

---

Schwallhöchstgrenze	990 m Sh. = 265 m höher als Mauerkrone
---------------------	---

Schwallhöhe am Gegenhang bei Casso (Abb. 8)	972 m Sh. = 247 m höher als Mauerkrone
--	---

Grenze der Zerstörung am linken Rücken über Mauerkrone (Abb. 10)	845 m Sh. = 120 m höher als Mauerkrone
---	---

Höchster, vermuteter Überlauf in 200 bis 300 m Breite über Mauer (Abb. 10)	800 m Sh. = 75 m über Mauerkrone
--	-------------------------------------

<b>Mauerkronenhöhe</b>	725,50 m Sh.
------------------------	--------------

Einmündung des Vajontbaches in die Talsohle der Piave (Abb. 2)	430 m Sh.
---	-----------



Tiefe des „Loches“ auf halber  
Breite des Talbodens = — 10 m  
Bahnhof von Longarone

474 m Sh.

Höhe der aufprallenden Flutwelle  
in Longarone

490 m Sh.

(G. SCHNITZER schätzt 520 m Sh.)

Das Wasser stürzte mindestens 370 m tief auf den Piaveboden.  
Die Distanz zwischen Mauer und Longarone beträgt 2 km Luft-  
linie.

Der Niveauunterschied zwischen höchster Abrißkante (1400 m

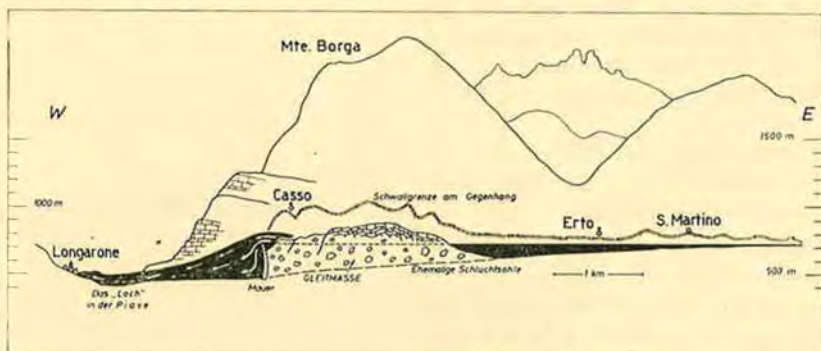


Abb. 6: Längenschnitt durch das Katastrophental von Vajont.

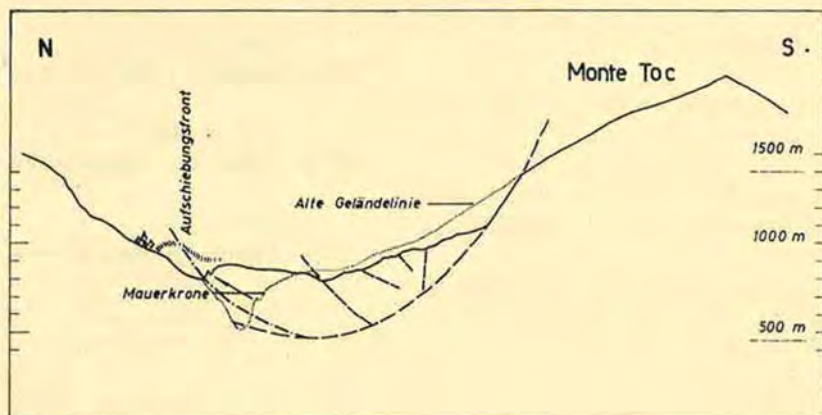


Abb. 7: Querschnitt durch die Felsgleitung. (Versuch einer Darstellung der Gleitflächen.)

Seehöhe) und der ehemaligen Schluchtsohle (500 m Sh.) beträgt **900 m**. Die Abgleithöhe von der Abrißkante bis zum Bereich des Nackensees (750 m Sh.) macht max. 650 m aus, das Mittel kann mit 600 m angenommen werden.

Die Aufgleithöhe an der Stirnfront ist mit 140 m sicher anzugeben, die Verschiebung von Süd nach Nord liegt zwischen 400 und 500 m. Als tiefsten Punkt des Gleitkreises nehme ich die Marke von 450 m Sh. an, über die sich eine Kubatur von 600 bis 700 Mill. Kubikmeter bewegt hat.

## Zur Mechanik der Felsgleitung

Ausgehend von der alten Anlage der Flanke durch die Falten- und Schertektonik und von den jüngeren talzuschiebenden Kräften auf der Monte Toc-Nordseite muß der Hang seit damals im Verformungszustand, der zu einer völligen Auflockerung seines Internbaues führte, gestanden haben. Miteinzuschließen sind die neuen Erkenntnisse über Vorgänge des Talzuschubes. L. MÜLLER (1963 b) erklärt diese aus Geländeindizien gewonnenen Erscheinungen mit einer dreistufigen Gleitungsphase in einem Fels mit flach hangauswärts fallenden Gefügestrukturen und steil bergwärts fallenden Kluftscharen — affine Gefügeelemente wie am Monte Toc! Das Öffnen der Zugrisse, den progressiven Bruch mit dem Ausgleiten des Böschungsfußes können wir in Verbindung mit den früher angeführten Faktoren für die Zeit von der spätglazialen Sackung bis zum Staubeginn annehmen. Daneben aber haben sich vermutlich die ersten Ansätze von Gleitflächen in den halbplastischen Mergelschichten des Jura und der Kreide abgezeichnet. Die Hauptfaktoren in der Zeit zwischen 1958 und 1963 sind neben Erdbebenäußerungen (E. TRAPP, 1963 a) in erster Linie im Auftrieb, in den hydrostatischen Drücken und in der starken Niederschlagstätigkeit der letzten Jahre zu suchen. Der steigende und sinkende Stauspiegel beeinflusste den Wasserhaushalt der Fußpartien fortlaufend so, daß Teile abwechselnd durchfeuchtet und wieder trockengelegt worden sind. In Anlehnung an das Dreiphasensystem L. MÜLLERS (1963 b) wurden die Verhältnisse des Porenwassers, Porenkluftwassers und vorwiegend des Bergwassers ständig geändert. Der Kluftwasserspiegel mußte dabei zwischen den verschiedenen Fels- und Lockermassenbereichen zu Kluftwasserdrücken führen und bei einem neuerlichen Seespiegelrückgang sehr hohe Werte liefern. Weil in dem immer mehr sich auflockernden Material der Bergwasserspiegel mit der vorletzten Absenkung schon nicht mehr korrespondiert haben dürfte, vermute ich eine Änderung des Bergwasserspiegels in rückläufiger Richtung



während der Stauerhöhung. Die aus diesem Phänomen resultierenden Kluftwasserdrücke überwandern aber noch nicht die innere Reibung. Dieser Zustand muß erst mit der letzten Stau- und Absenkungsperiode erlangt worden sein, wo im Zusammenwirken mit dem seit der Einstauung schon immer einwirkenden Auftrieb die Scherkräfte so hoch anstiegen, daß die lange und hohe Fußfront der Böschung herausplatzte und der gesamte Gleitvorgang nach einer in Abb. 7 im Schnitt dargestellten Kreisbahn ablief. G. SCHNITZER kommt ebenfalls zu einem tief liegenden Gleitkreis, L. MÜLLER (nach mündlicher Mitteilung) denkt an eine flach N-fallende Ausleitfläche.

Die ersten eiszeitlichen Talzuschübe sind noch auf die geschilderten felsmechanischen Vorgänge zurückführbar. — Als aber die Flanke zusätzlich durch den Stau in ein „Lockermassen“-ähnliches Diskontinuum mit fast vollständiger Aufweichung mergeliger Schichtpakete umgewandelt war, kann der Endvorgang nur in Form eines bodenmechanischen, spiralförmig ablaufenden Gleitprozesses, der bis in eine Tiefe von 450 m Sh. reichen kann, vor sich gegangen sein und entspricht einem hydraulischen Grundbruch.

Ich stütze mich auch auf eine seherische Äußerung K. TERZAGHI (1962) über tief sitzende Felsgleitungen, in der er folgende Gedanken skizziert: „Wenn eine Schlucht in ein gewelltes Gelände eingeschnitten ist, bleiben die Scherkräfte mit Ausnahme des Bereiches nahe der Schluchtwand in geringen Grenzen. Hingegen können die Scherkräfte in Schluchten, die im Tiefpunkt von größeren Talungen liegen, bis in größere Tiefen hohe Werte erreichen. Bei zunehmender Vertiefung dieser Schlucht kann ein Zustand erreicht werden, bei dem eine tiefreichende Gleitfläche entsteht.“ K. TERZAGHI gibt in seiner Abbildung eine Höhe von 4000 Fuß (1300 m) Relativabstand für einen möglichen Gleitkreis an. Diese Vorstellung läßt sich auf Vajont, mit 900 m Relativabstand fast direkt übertragen. Es bestehen für TERZAGHI genügend geologische Beweise für Felsgleitungen dieser Art, und er führt auch O. AMPFERER (1940), J. STINI (1941, 1942) an. Weiters schreibt er, „daß an mehreren Sperrstellen in außergewöhnlich tief eingeschnittenen Schluchten innerhalb der österreichischen Alpen erkannt wurde, daß der Fels von sich bewegenden Talflanken verhältnismäßig intakt blieb.“ G. DAL PIAZS Vorstellung der Monte Toc-Flanke deckt sich mit diesem Bild völlig. K. TERZAGHI führt nun Beispiele an, über die J. STINI (1952, 1956) berichtete. Analog wäre anzufügen, daß O. AMPFERER merkwürdige Schollenverschiebungen im Baugrubenaufschluß der Silvrettasperre (Vorarlberg) zwischen Kleinem und Großem Ochsenkopf beobachtete, die ebenfalls ähnliche Bewegungsvorgänge vermuten lassen (siehe J. STINI, 1955). „Praktisch weiß man bezüglich der Mechanik solcher tiefgreifender, großräumiger Felsgleitungen nichts. Es ist auch unbekannt, ob diese Gleitungen rasch oder langsam vor sich gehen und ob ihnen eine bedeutsame Kriechverformung vorangeht. Man weiß, daß der über der Gleitfläche befindliche Fels geringfügig defor-



Abb. 8: Die Stirnfront der Gleitmassen. Die Aufgleitung auf den Gegenhang vollzog sich in der Linie der mit Schlucklöchern erfüllten Ausflußrinne. An der Aufschiebungsfront steht der „Schluchtturm“, rechts dahinter gegen Casso ist die Schwallgrenze, auf der linken Bildseite die Abrisflinie des westlichen Abschnittes angedeutet.



Abb. 9: Als Vergleich zu Abb. 8 — der Monte Toc-Nordhang vor der Gleitung. Standpunkt 1 km östlich der Sperre bei Stauhöhe ca. 695 m. Im Hintergrund ist die westliche Abrisflinie skizziert. Man vergleiche die linke Schulter südlich der Sperre in Abb. 10. Die linke Felsbarriere zeigt Ablösungen von Felspfeilern, anschließend der Rutsch des Jahres 1960.



miert wurde.“ K. TERZAGHI führt noch an, daß bestehende Klüfte sich öffnen, neue entstehen; die Zusammendrückbarkeit und die sekundäre Durchlässigkeit des Felsens werde erhöht und dieser in unmittelbarer Nähe der Gleitfläche völlig zerbrochen und zerkleinert.

Die Stirnfront der Gleitmasse „schwamm“ auf einer Gleitfläche innerhalb völlig aufgearbeiteter, schmieriger Mergelschichten durch eine gewaltige Kraftauslösung vom Monte Toc hergedrückt auf den Gegenhang. Die zwei Gleitkeile setzten sich mit ihrem Gewicht noch nach und dokumentieren so richtig den früher angeführten Gleitprozeß. Dem Gleitvorgang setzte die nördliche Schluchtflanke einen derartigen Widerstand entgegen, daß aus dem aufsteigenden Gleitkreis eine neue, steilere Fläche betätigt wurde, an der die gesamten Lockermassen (hinter der Mauer) und die etwa 1,2 km lange südliche Schluchtwand en bloc als Stirnfront mindestens 140 m hochgehoben und zwischen 400 und 500 m nach Norden geschoben wurden. Damit ist der Beweis einer rezenten Großaufschiebung erbracht worden.

## Nach der Katastrophe

Außer den Bergungs- und Aufräumarbeiten sowie der Errichtung von Brücken und Instandsetzungen an der Fahrstraße zwischen Longarone und Erto wurden einige Arbeiten im Vajonttal sehr vordringlich.

Die Rohrbrücke vor der unter Erddruck stehenden Semenzamauer wurde trotz psychologischer Momente im Sommer 1964 wiederhergestellt. Piavewasser kann wieder genützt werden!

Eine gefährliche Situation entstand für die Bewohner und Hänge im Vajonttal durch den steigenden Spiegel des Reststausees. Die Gleitmasse bildete eine neue und viel höhere Sperre, als die „Semenzamauer“. In beispielloser Geschwindigkeit installierte man am See-Ende östlich S. Martino eine vielrohrige Pumpstation und ein viele Kilometer langes Holzgerinne über den Passo Osvaldo nach Osten gegen Cimolais. So konnten die Frühjahrshochwässer abgepumpt und der Seespiegel auf einer Regelhöhe gehalten werden. Gleichzeitig trieb die Gesellschaft von einem Steilhang westlich Cimolais einen Stollen, der noch in diesem Jahr fertiggestellt werden könnte, zum Vajontsee vor. Damit würde später das Wasser des Vajontsees energiewirtschaftlich in Richtung der Kraftwerke des *Valle Cellina* abgearbeitet. Die „Semenzamauer“ hält nur mehr Erdmassen, für eine echte Kraftnützung ist sie nie mehr einsatzfähig.

Am rechtsseitigen Umlaufstollen, der gleichzeitig die Funktion eines mittleren Grundablasses hatte, nahm man ebenfalls die Arbei-



Abb. 10: Die Felsmassen im Stausee. Hinter der Mauer türmt sich felsiges, schuttiges und erdiges Material. Im Vordergrund die Stirnfront mit dem „Schluchtturm“ und die Aufschiebungsfront, die ident mit der Abflußrinne ist. Links der Mauer die 120 m hoch hinaufreichende Schwallgrenze und tiefer die hufeisenförmige Überlauflinie.

ten auf, um wenigstens das Wasser innerhalb der Felsgleitmassen abzuleiten. In der nunmehr verfüllten Schlucht befindet sich altes Reststauwasser und Bergwasser, welche nunmehr als „Grundwasser“ vorliegen und einen Staudruck auf die Mauer ausüben. Wie weit diese Arbeiten gediehen sind, entzieht sich meiner Beobachtung.

Interessant werden die Ergebnisse der Sondierbohrungen, die man im Bereich der Gleitmasse abteuft. Ohne Zweifel liegt die Schwierigkeit beim wirklichen Erkennen der Gleitflächen im Untergrund. Aber aus den Resultaten der Bohrungen kann Klarheit über den geologischen Aufbau und über die Zustandsformen im Untergrund geschaffen werden. Vermutlich liegen die Doggerkalke sehr tief und im Hangenden plastische Schichten, durch die die Gleitfläche durchstreicht. Die ehemalige Schluchtstrecke muß zur Gänze von oberjurassischen bis oberkretazischen Gesteinen mit völlig zerrüttetem Gefüge angefüllt sein; zwischen diesen Massen müssen, bohrtechnisch schwierig erfaßbar, sekundäre Gleitbahnen durchstreichen.



## Vergleichbare Formänderungen

Einen direkten Vergleich der Vajontkatastrophe mit einem anderen Fall gibt es nicht — er war unvorstellbar und ist auf technisch-naturwissenschaftlichem Sektor erstmalig! Trotzdem kann die Kubatur bei diesem Vorgang der Formänderung einer Flanke verschiedenen Bergstürzen des alpinen Raumes gegenübergestellt werden. Einer davon war der des Dobratsch's im Jahre 1348. Seine Flanken waren „trocken“, das Gestein aber völlig zerlegt und ein größeres Erdbeben genügte, um die Massen abfallen zu lassen. Bei den zwei bis drei nachweisbaren prähistorischen Bergstürzen dieses Berges dürfte neben der Unterschneidung durch das Eis und der gleitbaren Unterlage (Werfener-Schichten), vielleicht zu gewissen Zeiten die Einwirkung von Schmelzwassertümpeln oder eines gestreckten Sees entlang der Fußzone, eine nicht unbedeutende Rolle gespielt haben. Schließen wir die vielen Ablösungskubaturen durch Bergzerreißen (O. AMPFERER, 1940) und Talzuschübe (J. STINI, 1941, 1942) aus unseren Betrachtungen aus, so können wir dennoch einige Beispiele in Verbindung mit einer hohen Wasserbeeinflussung und Seebildung an den Fußzonen eines Bergleibes anführen.

Ein Bergsturz aus grobblockigem Hangschutt, der durch Spiegelschwankungen und Auftriebstendenzen, bei völliger Durchfeuchtung der Fußpartien, beeinflusst wurde, ging zu Pfingsten 1959 vom linken Steilhang in den Stausee von Forno di Zoldo (Sperrse Pontesei) in einer Größenordnung von 1,4 Mill. m<sup>3</sup> zum Großteil unter Wasser nieder. Auch hier lag ein tiefer Gleitkreis vor. Der Nutzinhalt wurde durch die Abschnürung des Speichersees von 9 Mill. auf 5,5 Mill. m<sup>3</sup> vermindert.

Der Bergsturz von Alleghe in seiner zweiten Phase wurde vermutlich im Zusammenhang mit dem durch den ersten Bergsturz entstandenen See verursacht. B. HACQUET (1785) berichtete, daß an tuffitischen Gesteinen im Feber 1772 Kalkmassen ins Tal des *Cordevole* glitten und durch drei Monaten den Fluß aufstauten. Im Mai desselben Jahres lösten sich die Fußpartien, stürzten in den See und trieben das Wasser aus dem Becken. Dörfer wurden zerstört, und der Wasserschwall wirkte sich noch bis Agordo aus. Also eine ähnliche Beeinflussung, nur in geringerem Umfange wie in Pontesei und Vajont.

Ähnlich gelagert sind uns Fälle vom Millstätter See (Kärnten) bekannt, dessen Uferpartien an einigen Strecken sehr anfällig gegen Gleitungen sind. In längeren Zeitintervallen sacken Blockschutt-, Moränenkörper und auch Felsteile an der steilen Böschung gegen den See ab. Auch hier wirkt sich die Beeinflussung durch den See



im Zusammenwirken mit dem oft steil in den See einfallenden Bergwasserspiegel aus. In durch Klüfte vorgezeichneten Partien hebt sich die innere Reibung langsam durch den Auftrieb und durch niederschlagsbedingte Kluftwasserdrücke auf, und die anfälligen Zonen kriechen oder sacken ab. Während des Vorganges spiegeln sich die Wasserstände ein und erreichen anscheinend wieder den Ruhezustand. Diese Erscheinungen sind häufig, erreichen nie nennenswerte Kubaturen, sind aber gut im Sinne K. TERZAGHIS zu interpretieren.

Ich selbst lernte Felsabsetzungen aus steilen Granitwänden im Tysfjord bei Hellemobotn und im Sognefjord kennen, wo im Zusammenhang mit der Auffüllung der Klüfte durch Seewasser und Bergwasser dementsprechende Druckvorgänge erzeugt wurden. Bei langsamen Anfangsgeschwindigkeiten setzten sich mehrere Millionen Kubikmeter große Blöcke ab.

Man könnte unzählige Beispiele von stattgefundenen Sackungen und Gleitungen, die durch die Beeinflussung der Schwerkraft und der druckhaften Wasser in Bereichen eines Sees oder Fjords entstanden sind, anführen. Die aufgezählten Beispiele sollen uns nur erinnern, daß Steilhangpartien auf der ganzen Welt in Bewegung geraten können, wenn genügend starke Kräfte auf sie einwirken. Das Wasser stellt dabei die wesentliche Komponente dar.

## Schlußwort

Die Vajont-Katastrophe bewies die Schwächen des menschlichen Geistes und die Stärke der Natur — die erkannte Gleitung konnte technisch nicht beherrscht, die in Bewegung geratenen Millionen-Kubaturen nicht einmal erahnt werden. Es mögen menschliche Unzulänglichkeiten, wie H. GRENGG (1964) es ausdrückt, vorgelegen haben, trotzdem nimmt auch er eine höhere Gewalt an, nicht ohne auf die Bedeutung der so wichtigen Stauraumbeobachtung hinzuweisen.

Auch die Beruhigung unserer Bevölkerung, die geologischen Verhältnisse in Österreich seien anders gelagert — direkt im Anschluß an die Katastrophe gesprochen —, kann Wasserbauer und Geologen über manche Hanglabilität sowie Gleitendenz in Talbecken und Speicherräumen nicht hinwegtäuschen. Die Steilhänge von gut durchlässigen Beckenumrandungen trügen viel weniger als kompakt aussehende Felsflanken, die oft durch intensive Einflüsse der Verwitterung, der Spannungsumlagerung, unbekannter Kriechvorgänge u. a. m. eine „scheinbare“ Stabilität vortäuschen.

Der Wasserhaushalt einer Bergflanke läßt sich weder mathe-



matisch, noch durch Laborversuche und Beobachtungen ganz erfassen. Die Verhältnisse und die Ursachen werden erst nach Vollzug eines hydrostatischen Ausgleiches klar und rekonstruierbar.

Uns bleibt nur das Vermächtnis vom Monte Toc-Hang: Untersuchen — Beobachten — Prüfen — Wagen — und wieder Beobachten!

## LITERATURNACHWEIS

- AMPFERER, O.: Zum weiteren Ausbau der Lehre von den Bergzerreibungen. Sitzber. Akad. Wiss. Wien, mn. Kl., I, 149, 51—70, Wien 1940.
- DAL PIAZ, G.: Carta geologica delle Tre Venezie, Belluno. Foglio 23 della Carta d' Italia al 100.000 dell' Istituto Geografico Militare, Firenze 1941.
- DAL PIAZ, G.: Descrizione geologica del bacino del Piave in relazione agli impianti idroelettrici della Società Adriatica di Elettricità. In: Impianto idroelettrico Piave-Boite-Maè-Vajont, pag. 15—38 (cum lit.), Venezia 1956.
- GRENGG, H.: Malpasset, Vajont und die Folgen. Österr. Ing. Ztschr. 109, 2, 58—59, Wien 1964.
- HACQUET, B.: Physikalisch-Politische Reise aus den Dinarischen durch die Julischen, Carnischen, Rhaetischen in die Norischen Alpen, im Jahre 1781 und 1783 unternommen. 1. Teil, Leipzig, verlegt Adam Friedrich Boehme 1785. (Beschreibung des Bergsturzes von Alleghe des Jahres 1772 auf pag. 116—121.)
- MÜLLER, L.: Der Felsbau. 1. Bd.: Theoretischer Teil und Felsbau über Tag, 1. Teil. 624 Seiten, 327 Abb. u. 22 Tafeln. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1963 a.
- MÜLLER, L.: Die Standfestigkeit von Felsböschungen als spezifisch geomechanische Aufgabe. Felsmechanik und Ingenieurgeologie (Geologie und Bauwesen), 28, 50—71, Wien 1963 b.
- S. A. D. E.: Diga del Vajont. Ausführlicher, technischer Prospekt der Società Adriatica di Elettricità, Venezia 1960.
- SCHNITZER, G.: Die Katastrophe von Vajont in Oberitalien. Mit einem geolog. Anhang von E. WEBER. Schweiz. Wasser- und Energiewirtschaft, 56, Zürich, 1964.
- SEMENZA, C.: Dighe ad arco e a cupola. Sonderheft „Talsperren — Barrages — Dighe“ der Schweiz. Wasser- und Energiewirtschaft, 44, Zürich 1956.
- STINI, J.: Unsere Täler wachsen zu. Geol. u. Bauw., 13, 71—79, Wien 1941.
- STINI, J.: Nochmal der „Talzuschub“. Geol. u. Bauw., 14, 10—12, Wien 1942.
- STINI, J.: Neuere Ansichten über Bodenbewegungen und ihre Beherrschung durch den Ingenieur. Geol. u. Bauw., 19, 31—54, Wien 1952.
- STINI, J.: Die baugelologischen Verhältnisse der Österreichischen Talsperren, Heft 5 der Reihe „Die Talsperren Österreichs“, Wien 1955.
- STINI, J.: Wassersprengungen und Sprengwasser. Geol. u. Bauw., 22, 141—169, Wien 1956.
- TERZAGHI, K.: Stability of steep slopes on hard unweathered rock. Daraus das Kapitel „Deep-seated rock slides“ Géotechnique. The international journal of soil mechanics. Vol XII, 4, 251—270, London 1962.

TRAPP, E.: Erdbeben­­tätigkeiten. Universum (Natur und Technik), 18, 10, Wien 1963 a.

TRAPP, E.: Der Bergsturz von Longarone — von Seismographen registriert, Universum (Natur und Technik), 18, 11, Wien 1963 b.

Der technisch interessierte Leser möge sich in zwei wichtigen technischen Zeitschriften, der „L'Energia Elettrica“ und der „Schweiz. Wasser- und Energiewirtschaft“ über die dort laufend gebrachten Untersuchungsergebnisse und Berichte des Kraftwerksbaues in der Piave-region und über Vajont informieren.

★

Während der Drucklegung hielt Herr Dr. L. MÜLLER beim XV. Kolloquium der Internationalen Gesellschaft für Felsmechanik in Salzburg über die Rutschung von Vajont einen Vortrag, der in der Zeitschrift „Felsmechanik und Ingenieurgeologie (Geologie und Bauwesen)“, 29, 1964, erscheint. Auf diese Arbeit ist besonders hinzuweisen, weil er für die Rutschung im unteren Teil eine sehr flache Neigung und eine Art Masenthixotropie mit einer überaus hohen Gleitgeschwindigkeit annimmt.

Die Abbildungen 4, 8 und 10 stellte mir dankenswerterweise Herr Dipl.-Ing. Dr. ALFRED OREL, Klagenfurt, zur Verfügung. Alle übrigen Abbildungen stammen vom Verfasser.

Anschrift des Verfassers:

Dr. ERNST H. WEISS, Klagenfurt, Villacherstraße 25/1/I.