

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 92 (1974)  
**Heft:** 32

**Artikel:** Extremabflüsse aus vierzig kleinen Einzugsgebieten der Schweiz  
**Autor:** Widmoser, P.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-72430>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 02.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Extremabflüsse aus vierzig kleinen Einzugsgebieten der Schweiz

Von P. Widmoser, Zürich<sup>1)</sup>

DK 551.482.215.3

### 1. Abgrenzung der Arbeit

Hoch- und Niederwasserereignisse aus 40 kleinen Einzugsgebieten der Schweiz wurden statistisch untersucht. Die Flächengröße dieser Einzugsgebiete beträgt im Durchschnitt 77,7 km<sup>2</sup>. Die Hoch- und Niederwasserwerte sind den hydrographischen Jahrbüchern des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft entnommen. Eine Einteilung von 527 Abflussmess-Stationen dieser Jahrbücher nach Grösse der Einzugsgebiete und nach deren Beobachtungsdauer zeigt eine deutliche Messlücke für Gebiete zwischen etwa 10 und 100 km<sup>2</sup> (Bild 1). Die Tabellen 1 und 2 geben Flächengröße, Meereshöhe, Angaben über die Geometrie, Vegetation, Vergletscherung, Beobachtungsdauer usw. der hier untersuchten Einzugsgebiete wieder. Bild 2 zeigt deren geographische Verteilung.

Ausgewertet wurden bei Hochwasser (HQ) die augenblicklichen Abfluss-Spitzen, bei Niederwasser (NQ) das minimale Tagesmittel. Alle Wassermengenangaben erfolgen in m<sup>3</sup>/s. Mögliche Messfehler und -ungenauigkeiten für diese Werte sind:

- bei HQ: Mangelhafte Eichkurve für die Beziehung Wasserstand–Wassermenge; ungenaues Erfassen der instationär ablaufenden Hochwasserwelle durch Trägheit im Mess-System; Versanden, Blockieren, Zerstören der Messeinrichtung.
- bei NQ: Vereisen der Messeinrichtung

Es ist zu vermuten, dass Hoch- und Niederwasser zu gewissen Gebietsmerkmalen, wie in Tabelle 2 angeführt, in Beziehung stehen. Heutiges Wissen erlaubt es nur sehr an nähernd, Art und Ausmass dieser Beziehungen anzugeben. Typisch für «kleine» Einzugsgebiete (die Hydrologie kennt

keine grössenmässige Einteilung nach Gebietsfläche) ist

- das Abflussverhalten, das vom einzelnen Regen- und/oder Schneeschmelzereignis geprägt wird,
- das grosse Verhältnis zwischen Abfluss-Spitze und Basisabfluss,
- die Fließdynamik, die stark vom gerinnelosen Oberflächenabfluss mitbestimmt wird, womit ein Einfluss des Reliefs zu erwarten ist,
- die Anlaufzeiten, die vom zeitlich entferntesten Punkt bis zur Beobachtungsstation innert von wenigen Stunden liegen.

Ziel dieser Arbeit ist eine Aussage über die Häufigkeitsverteilung von Hoch- oder Niederwassermengen in den untersuchten Einzugsgebieten. Weiter sollen einige Einflussgrössen ermittelt werden, welche Höhe und Häufigkeit eines Extremabflusses massgeblich beeinflussen. Die theoretischen Grund-

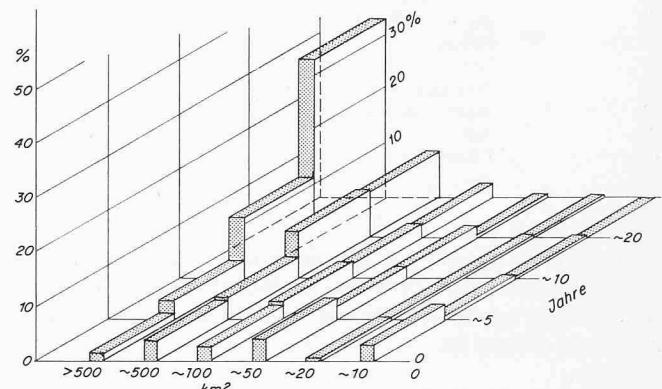


Bild 1. Aufteilung von 527 Abflussmess-Stationen der Schweiz nach Grösse des Einzugsgebietes und Beobachtungsdauer

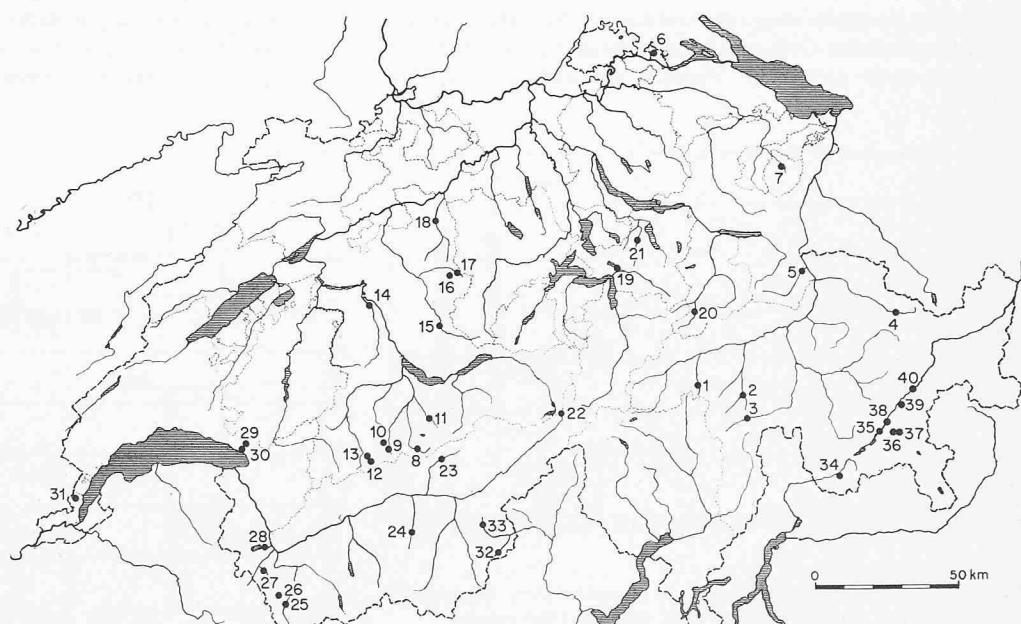


Bild 2. Geographische Verteilung der untersuchten Stationen

Tabelle 1.

| Stations-Nr. | Gewässer           | Station            | Beobachtungsdauer [Jahre] | Fläche [km <sup>2</sup> ] | Mittlere Meereshöhe [m] |
|--------------|--------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 1            | Somvixer Rhein     | Alp Sutglatscher   | 38                        | 22,6                      | 2420                    |
| 2            | Peilerbach         | Vals               | 10                        | 31,8                      | 2290                    |
| 3            | Hinterrhein        | Hinterrhein        | 25                        | 55,0                      | 2390                    |
| 4            | Landquart          | Klosters           | 36                        | 112,0                     | 2300                    |
| 5            | Tamina             | Bad Ragaz          | 38                        | 147,0                     | 1800                    |
| 6            | Biber              | Ramsen             | 34                        | 162,0                     | 570                     |
| 7            | Sitter             | Appenzell          | 45                        | 74,2                      | 1252                    |
| 8            | Kander             | Gasterntal         | 20                        | 40,7                      | 2600                    |
| 9            | Engstigenbach      | Engstigenalp       | 16                        | 14,4                      | 2300                    |
| 10           | Allenbach          | Adelboden          | 20                        | 28,9                      | 1850                    |
| 11           | Gornernbach        | Kienta             | 20                        | 25,6                      | 2270                    |
| 12           | Truebbach          | Rätzliberg         | 17                        | 19,5                      | 2610                    |
| 13           | Simme              | Oberwil            | 20                        | 35,7                      | 2370                    |
| 14           | Gürbe              | Belp               | 48                        | 124,0                     | 837                     |
| 15           | Emme               | Eggiwil            | 38                        | 102,0                     | 1330                    |
| 16           | Sperbelgraben      | Wasen              | 24                        | 0,54                      | 1063                    |
| 17           | Rappengraben       | Wasen              | 25                        | 0,59                      | 1141                    |
| 18           | Langeten           | Lotzwil            | 46                        | 115,0                     | 713                     |
| 19           | Seeweren           | Seewen             | 20                        | 72,1                      | 800                     |
| 20           | Linth              | Tierfehd           | 45                        | 75,5                      | 2330                    |
| 21           | Alp                | Trachslau          | 26                        | 31,1                      | 1200                    |
| 22           | Rhône              | Gletsch            | 14                        | 38,9                      | 2719                    |
| 23           | Lonza              | Blatten            | 14                        | 77,8                      | 2613                    |
| 24           | Turtmännna         | Inner Sennntum     | 10                        | 31,1                      | 3040                    |
| 25           | Drance de Ferret   | Brache d'en Haut   | 14                        | 66,8                      | 2340                    |
| 26           | Rense de Saleina   | Saleina d'Orsierse | 14                        | 24,0                      | 2750                    |
| 27           | Trient             | Trient             | 14                        | 29,1                      | 2370                    |
| 28           | Salanfe            | Mont. de Salanfe   | 21                        | 18,4                      | 2320                    |
| 29           | Baye de Montreux   | Les Avants         | 37                        | 6,9                       | 1410                    |
| 30           | Baye de Montreux   | Montreux           | 37                        | 13,8                      | 1220                    |
| 31           | Versoix            | La Batie           | 14                        | 75,9                      | 400                     |
| 32           | Krummbach          | Klusmatten         | 18                        | 19,8                      | 2276                    |
| 33           | Zwischenbergenbach | Im Fah             | 18                        | 17,3                      | 2531                    |
| 34           | Albigna            | Alp Albigna        | 29                        | 20,5                      | 2670                    |
| 35           | Inn                | St. Moritzbad      | 47                        | 155,0                     | 2400                    |
| 36           | Rosegbach          | Pontresina         | 16                        | 66,5                      | 2716                    |
| 37           | Berninabach        | Pontresina         | 16                        | 107,0                     | 2617                    |
| 38           | Inn                | Samaden            | 12                        | 382,9                     | 2400                    |
| 39           | Chamuera           | Campovasto         | 16                        | 73,8                      | 2550                    |
| 40           | Inn                | Zuoz               | 16                        | 593,0                     | 2485                    |

lagen werden an Hand von Beispielen kurz erläutert. Vorweg genommen sei, dass wegen des beschränkten Datenmaterials eine nur sehr grobe Klassierung der massgeblichen Einflussfaktoren gelungen ist.

## 2. Statistische Methodik

### 2.1 Betrachtung der Hoch- und Niederwassermengen als statistisch unabhängige Zufallsereignisse.

Man ist einerseits wegen des «zufälligen» Verhaltens der abflussverursachenden Größen (Niederschlag, Schneeschmelze), anderseits auch wegen der Vielzahl der abflussbestimmen-

den Parameter (etwa bis zu 30) versucht, Abflussereignisse als Zufallsgrößen im Sinne der Statistik aufzufassen. Dies bietet den Vorteil, bekannte und erprobte Ansätze der Wahrscheinlichkeitsrechnung auf Abflussbeobachtungen anwenden zu können. Zugleich sind aber auch die Voraussetzungen, auf denen diese Ansätze beruhen, so weit wie möglich einzuhalten. Für unsere Untersuchung wurde u.a. folgendes vorausgesetzt:

a) Die einzelnen Beobachtungen sind voneinander statistisch unabhängig (Definition dafür siehe u.a. [14]). Dies wurde für die Messwerte einer Station dadurch erreicht, dass nur (kalender-) jährliche Extremwerte mit einem zeitlichen

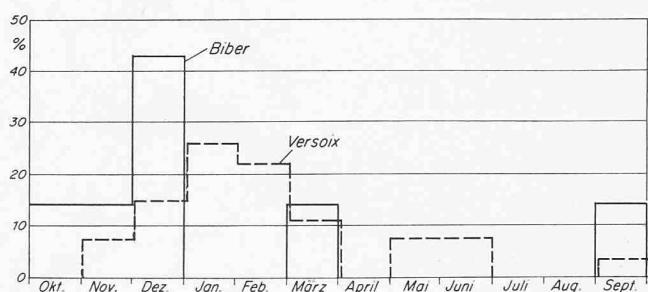
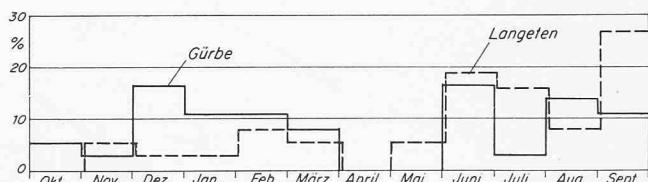
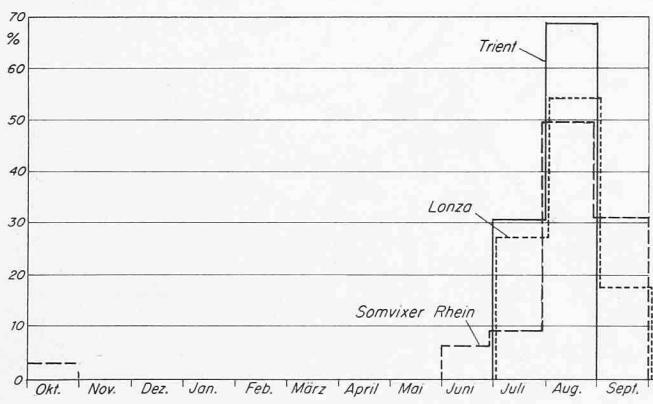


Bild 3. Jahreszeitliche Verteilung von zweijährlichen Hochwassereignissen für je einen Abflusstyp nach den drei Diagrammen

Tabelle 2.

| Stations-Nummer | Geometrie |                    | Topographie |       | Klima                       |       | Regen    |       | Vegetation             |       | Geologie |                               |       |                       |    |                                       |    |    |                             |    |    |
|-----------------|-----------|--------------------|-------------|-------|-----------------------------|-------|----------|-------|------------------------|-------|----------|-------------------------------|-------|-----------------------|----|---------------------------------------|----|----|-----------------------------|----|----|
|                 | Fläche    | km <sup>2</sup> FL | Umfang      | km UM | Abstand Station-Schwerpunkt | km SP | Tallänge | km GL | Mittlere Hangneigung % | MH    | MF       | Orientation der Talhauptachse | o OR  | Mittlere Meereshöhe m | MM | Nicht vergletscherter Flächenanteil % | NG | R1 | Regenfaktor nach [5] mm min | R2 | NW |
| 1               | 22,6      | 24,0               | 4,0         | 7,0   | 16,4                        | 52    | 0,8      | 90    | 2420                   | 93,4  | 0,06     | 0,93                          | 99,0  | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 2               | 31,8      | 27,5               | 5,5         | 8,0   | 18,3                        | 51    | 9,7      | 100   | 2290                   | 90,6  | 0,06     | 0,93                          | 95,0  | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 3               | 55,0      | 37,0               | 5,5         | 7,8   | 39,3                        | 46    | 4,7      | 150   | 2390                   | 78,4  | 0,08     | 0,93                          | 98,0  | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 4               | 112,0     | 50,0               | 8,0         | 10,7  | 75,0                        | 52    | 7,6      | 60    | 2300                   | 91,9  | 0,02     | 0,93                          | 96,0  | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 5               | 147,0     | 55,5               | 13,0        | 23,0  | 114,7                       | 62    | 4,5      | 130   | 1800                   | 97,9  | 0,08     | 1,06                          | 80,0  | 2                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 6               | 162,0     | 66,0               | 14,0        | 25,0  | 110,0                       | 9     | 1,1      | 140   | 570                    | 100,0 | 0,06     | 1,08                          | 80,0  | 1                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 7               | 74,2      | 40,0               | 7,0         | 15,5  | 98,5                        | 52    | 3,6      | 150   | 1252                   | 99,9  | 0,08     | 1,06                          | 75,0  | 2                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 8               | 40,7      | 30,0               | 4,5         | 4,5   | 9,9                         | 64    | 11,0     | 40    | 2600                   | 56,5  | 0,09     | 0,96                          | 97,0  | 2                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 9               | 14,4      | 15,0               | 1,5         | 2,8   | 12,4                        | 57    | 23,0     | 90    | 2300                   | 89,0  | 0,09     | 0,96                          | 100,0 | 2                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 10              | 28,9      | 21,0               | 2,5         | 4,2   | 24,9                        | 48    | 8,5      | 120   | 1850                   | 99,9  | 0,09     | 0,96                          | 83,0  | 2                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 11              | 25,6      | 20,0               | 3,0         | 4,8   | 20,0                        | 72    | 12,0     | 50    | 2270                   | 82,7  | 0,09     | 0,96                          | 96,0  | 1                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 12              | 19,5      | 21,5               | 3,0         | 3,0   | 7,2                         | 39    | 33,0     | 60    | 2610                   | 41,5  | 0,09     | 0,96                          | 98,0  | 2                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 13              | -         | -                  | -           | -     | -                           | -     | -        | -     | -                      | -     | -        | -                             | -     | -                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 14              | 124,0     | 70,0               | 14,0        | 17,0  | 107,9                       | 22    | 0,8      | 90    | 837                    | 100,0 | 0,09     | 0,96                          | 80,0  | 1                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 15              | 102,0     | 55,0               | 8,0         | 16,5  | 128,1                       | 39    | 2,2      | 10    | 1330                   | 100,0 | 0,09     | 0,96                          | 70,0  | 1                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 16              | 0,54      | 3,2                | 0,8         | 0,6   | 2,4                         | 55    | 13,0     | 40    | 1063                   | 100,0 | 0,09     | 0,95                          | 1,0   | 1                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 17              | 0,59      | 3,2                | 0,7         | 0,5   | 2,3                         | 68    | 15,0     | 20    | 1141                   | 100,0 | 0,09     | 0,95                          | 69,0  | 1                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 18              | 115,0     | 47,0               | 10,0        | 18,7  | 111,9                       | 15    | 1,2      | 90    | 713                    | 100,0 | 0,09     | 0,95                          | 65,0  | 1                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 19              | 72,1      | 36,8               | 2,1         | 16,0  | 124,3                       | 28    | 6,4      | 130   | 800                    | 100,0 | 0,09     | 1,06                          | 70,0  | 1                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 20              | 75,5      | 38,0               | 4,5         | 8,5   | 42,1                        | 72    | 12,0     | 120   | 2330                   | 70,2  | 0,09     | 0,93                          | 90,0  | 2                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 21              | 31,1      | 25,2               | 4,0         | 7,8   | 48,2                        | 36    | 2,3      | 90    | 1200                   | 100,0 | 0,09     | 0,93                          | 40,0  | 1                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 22              | 38,9      | 33,0               | 5,0         | 5,0   | 9,5                         | 42    | 12,5     | 50    | 2719                   | 43,6  | 0,06     | 0,93                          | 100,0 | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 23              | 77,8      | 37,0               | 5,5         | 6,4   | 37,8                        | 58    | 6,0      | 30    | 2630                   | 59,4  | 0,09     | 0,93                          | 95,0  | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 24              | -         | -                  | -           | -     | -                           | -     | -        | -     | -                      | -     | -        | -                             | -     | -                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 25              | 66,8      | 35,0               | 5,0         | 9,0   | 64,5                        | 59    | 6,3      | 90    | 2340                   | 87,7  | 0,03     | 1,06                          | 92,0  | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 26              | 24,0      | 23,0               | 4,0         | 2,4   | 9,6                         | 61    | 28,0     | 170   | 2750                   | 50,1  | 0,03     | 1,06                          | 95,0  | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 27              | 29,1      | 24,0               | 3,5         | 3,7   | 13,9                        | 58    | 14,0     | 80    | 2370                   | 65,8  | 0,03     | 1,06                          | 88,0  | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 28              | 18,4      | 18,0               | 2,0         | 2,0   | 7,1                         | 48    | 17,5     | 160   | 2320                   | 93,0  | 0,09     | 0,76                          | 100,0 | 2                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 29              | 6,9       | 13,0               | 1,5         | 3,0   | 23,0                        | 57    | 15,0     | 70    | 1410                   | 100,0 | 0,09     | 0,76                          | 50,0  | 2                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 30              | 13,8      | 17,0               | 3,0         | 6,0   | 37,5                        | 56    | 13,5     | 50    | 1220                   | 100,0 | 0,09     | 0,76                          | 40,0  | 2                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 31              | 76,0      | 38,2               | 6,0         | 18,5  | 34,5                        | 14    | 1,0      | 110   | 400                    | 100,0 | 0,09     | 0,79                          | 65,0  | 1                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 32              | 19,8      | 21,0               | 2,0         | 2,2   | 17,2                        | 47    | 4,5      | 110   | 2276                   | 97,1  | 0,02     | 1,06                          | 100,0 | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 33              | 17,3      | 20,0               | 2,0         | 4,3   | 11,8                        | 58    | 10,0     | 150   | 2531                   | 86,6  | 0,02     | 1,06                          | 100,0 | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 34              | 20,5      | 18,8               | 2,7         | 1,5   | 12,0                        | 57    | 10,0     | 90    | 2670                   | 42,4  | 0,06     | 0,93                          | 100,0 | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 35              | 155,0     | 58,0               | 8,0         | 14,0  | 116,5                       | 23    | 2,7      | 130   | 2400                   | 91,4  | 0,06     | 0,93                          | 93,0  | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 36              | 66,5      | 36,0               | 8,5         | 7,4   | 28,5                        | 53    | 3,5      | 100   | 2716                   | 67,2  | 0,06     | 0,93                          | 95,0  | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 37              | 107,0     | 45,0               | 8,0         | 7,8   | 51,3                        | 48    | 3,5      | 20    | 2617                   | 80,3  | 0,06     | 0,93                          | 95,0  | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 38              | 382,9     | 87,5               | 11,0        | 20,0  | 238,1                       | 47    | 2,2      | 110   | 2400                   | 91,4  | 0,06     | 0,93                          | 93,0  | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 39              | 73,8      | 36,0               | 7,0         | 8,1   | 53,9                        | 51    | 4,3      | 30    | 2550                   | 98,2  | 0,06     | 0,93                          | 95,0  | 3                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |
| 40              | -         | -                  | -           | -     | -                           | -     | -        | -     | -                      | -     | -        | -                             | -     | -                     |    |                                       |    |    |                             |    |    |

<sup>1)</sup> 1 = Kristallin, 2 = Flysch, 3 = Kalk

Mindestabstand von vier Wochen in die Untersuchung aufgenommen wurden.

b) Die Messwerte sind homogen, d.h. sie gehören ein und derselben statistischen Grundgesamtheit an.

Die Homogenität kann während der Beobachtungsperiode durch Veränderungen an der Messeinrichtung oder im Einzugsgebiet gestört sein (Umbauten und Verlegung der Mess-Station; Errichten eines Bauwerkes in der Nähe der Mess-Station; Kahlschlag, Verbauung im Einzugsgebiet). Sie kann aber auch durch das Auftreten von «Ausreisern» fraglich werden. Als solche mögen alle beobachteten Abflüsse gelten, welche durch eine «aussergewöhnliche» Konstellation abflussverursachender und -bestimmender Faktoren entstehen. Sie treten im interessierenden Zeitbereich (Planungshorizont zum Beispiel 20 bis 100 Jahre) so selten auf, dass sie sich nicht statistisch erfassen lassen. Als Beispiele seien angeführt: Extremabflüsse als Folge von kurzfristigem, natürlichem Rückstau (Verklausung, Vermurung, Lawine), Ausbruch von Gletscherseen (La Borgne

1952 [13], Grubenseegletscher [10]). Theoretisch bleibt es auch fragwürdig, ob man z.B. Langregen-, Gewitter- und Schneeschmelzhochwasser (letztere wiederum verursacht durch intensive Strahlung, Temperaturanstieg und/oder Föhneinbruch) statistisch derselben Grundgesamtheit zu rechnen darf. Die Bilder 3a, b und c zeigen die jahreszeitliche Verteilung von Hochwasserereignissen für drei Abflusstypen der Schweiz. Sie weisen darauf hin, dass vermutlich für alle drei Typen mehrere Abflussursachen zu Hochwasserspitzen führen.

c) Den Zufallereignissen sind keine deterministischen Anteile überlagert. Dies ist der Fall, wenn z.B. durch Aufforstung, zunehmende Besiedlung oder fortschreitende Tiefenerosion des Gewässers eine trendmässige Verschiebung der Abflüsse eintritt.

Für unsere Untersuchung wurde geprüft, ob die erwähnten Voraussetzungen erfüllt sind. Da Hoch- und Niederdächer auch nicht angenähert normalverteilt auftreten, wurden so-

genannte parameterfreie Testverfahren [3] benutzt. Es zeigte sich unter anderem folgendes:

- Mehrere Stationen erfüllten die Tests nicht. Meist war die Homogenität gestört.
- Bei den Stationen Klosters und Pontresina traten Ausreisser auf. Erst nachträgliche Auskunft (der Praktiker sollte diese zu Beginn seiner Arbeit einholen) ergab folgenden Tatbestand: 1. Die Station Landquart-Klosters wurde 1954 nach Verklausung des Baches fortgeschwemmt und die angeführte Wassermenge war geschätzt worden. 2. Die Station Rosegbach-Pontresina war ebenfalls 1954 zerstört worden. Ursache dafür war eine «aussergewöhnliche» Hochwasserwelle, welche vermutlich mit einer starken Erosion der den Gletschersee aufstauenden Stirnmoräne in Zusammenhang steht. Dieses Ereignis wurde eingehend beschrieben [12]. Die Hochwassermenge war nachträglich geschätzt worden.
- Für die Stationen Sitter-Appenzell, Sperbelgraben und Rappengraben-Wesen, Lonza-Blatten, Baye de Montreux-Les Avants und Montreux, Berninabach-Pontresina mussten die Beobachtungsreihen so lange gekürzt werden, bis sie den Voraussetzungen entsprachen. Für die Beobachtungsreihen Simme-Obwil, Turtmännä-Inner Sentum, Inn-Zuoz musste auf Hoch- und Niederwasserwerte, für die Reihe Truebbach-Rätzliberg auf die Niederwasserwerte verzichtet werden. Auf Hinweise für mögliche Störungen ist der Verfasser dem Leser dankbar.

Für die weiteren Untersuchungen stehen somit nur noch 37 Stationen für Hochwasser, 36 Stationen für Niederwasser zur Verfügung.

## 2.2 Die Häufigkeitsverteilung

### 2.21 Die empirische Verteilung

An Hand der Beobachtungen wurde für jede Station die empirische Verteilungsfunktion (Beziehung zwischen Messwert und dessen Summenhäufigkeit) nach folgender Gleichung ermittelt:

$$(1) \quad H(Q < q(r)) = (r - 0,31)/(N + 0,38)$$

$H$  Summenhäufigkeit, mit  $Q < q(r)$

$Q$  Abfluss als Zufallsvariable

$q(r)$  beobachteter Abfluss mit Rangzahl  $r$

$N$  Anzahl der Beobachtungen

Die Rangzahl  $r$  ergibt sich als Platzziffer bei grössenmässigem Ordnen der Abflusswerte, wobei für den kleinsten Wert  $r = 1$  gilt. Ableitung und Begründung dieser Gleichung müssen hier fortfallen. In unserer Untersuchung, bei welcher statistisch voneinander unabhängige Jahresextremwerte ausgewertet werden, lässt sich die Jährlichkeit  $z$  eines Ereignisses einfach durch die Summenhäufigkeit ausdrücken:

$$(2) \quad z(Q > q) = 1/(1 - H(Q < q(r)))$$

Die Jährlichkeit, ein Begriff der hydrologischen Statistik, gibt das durchschnittliche Zeitintervall in Jahren an, nach welchem ein bestimmtes  $H(Q > q)$  überschritten, ein bestimmtes  $NQ(z)$  unterschritten wird. Für die Station Langeten-Lotzwil ist in Tabelle 3 die empirische Verteilungsfunktion dargestellt.

### 2.22 Die theoretischen Verteilungsfunktionen

Betreffend Wahl und Auswahlkriterien unter den zahlreichen theoretischen Verteilungsfunktionen (etwa 10) beachte man die Arbeit von [2]. Hier wurde angenommen, dass sich die empirischen Verteilungsfunktionen aller Stationen durch die theoretische Verteilung nach Gumbel [4] darstellen lassen. Die Gleichung für die Gumbelverteilung lautet:

$$(3) \quad P(Q < q) = \exp \left[ -\exp \left( \pm \frac{A - q}{B} \right) \right]$$

$P$  Unterschreitungswahrscheinlichkeit

$Q$  Abfluss als Zufallsvariable

$q$  beobachteter oder gesuchter Abfluss

$A, B$  Parameter

$\exp(a)$  steht für  $e^a$ , im letzten Klammerausdruck steht  $+$  für HQ,  $-$  für NQ. Dabei entspricht der theoretischen Unterschreitungswahrscheinlichkeit  $P$  die im vorigen Abschnitt erwähnte empirische Summenhäufigkeit  $H$ .

Zur Überprüfung der oben angeführten Annahme (Hypothese) wurden der Chi<sup>2</sup>- und *Kolmogoroff*-Test [7], [14] benutzt. Bei einer gewählten Vertrauensgrenze von  $\alpha = 10\%$  (hoch gewählt, um Fehler zweiter Art, nämlich Annahme der falschen Hypothese, zu vermeiden) entsprachen der Gumbelverteilung bei Hochwasserwerten 35 Stationen, bei Niederwasser 26 Stationen. Für die Niederwassermengen wurden auch andere theoretische Verteilungen untersucht: die *Log-Normalverteilung* (Verteilung von *Gibrat* bei [2]) konnte in 32 Fällen, die *Weibull*-Verteilung ([1]) in 33 Fällen akzeptiert werden.

Tabelle 3.

| Rangzahl<br>$r$ | HQ [m <sup>3</sup> /s]<br>geordnet | $H$ (HQ) <sup>1)</sup> | HQ [m <sup>3</sup> /s]<br>Chronologisch<br>ab 1924 |
|-----------------|------------------------------------|------------------------|--|
| 1               | 6,7                                | 0,014                  | 15,2   |
| 2               | 7,1                                | 0,035                  | 25,0   |
| 3               | 7,7                                | 0,056                  | 16,4   |
| 4               | 8,4                                | 0,076                  | 30,0   |
| 5               | 8,7                                | 0,097                  | 9,3  |
| 6               | 9,3                                | 0,118                  | 17,7   |
| 7               | 9,9                                | 0,138                  | 17,1   |
| 8               | 10,8                               | 0,159                  | 8,7  |
| 9               | 11,6                               | 0,180                  | 17,2   |
| 10              | 12,9                               | 0,200                  | 36,0   |
| 11              | 13,3                               | 0,221                  | 13,3   |
| 12              | 13,3                               | 0,242                  | 18,1   |
| 13              | 13,9                               | 0,262                  | 10,8   |
| 14              | 15,2                               | 0,283                  | 21,0   |
| 15              | 16,3                               | 0,304                  | 28,0   |
| 16              | 16,4                               | 0,324                  | 13,3   |
| 17              | 16,6                               | 0,345                  | 20,0   |
| 18              | 17,0                               | 0,366                  | 20,0   |
| 19              | 17,0                               | 0,386                  | 16,3   |
| 20              | 17,1                               | 0,407                  | 22,0   |
| 21              | 17,1                               | 0,428                  | 13,9   |
| 22              | 17,2                               | 0,448                  | 29,0   |
| 23              | 17,7                               | 0,469                  | 6,7  |
| 24              | 18,1                               | 0,490                  | 27,0   |
| 25              | 19,0                               | 0,510                  | 29,0   |
| 26              | 19,0                               | 0,531                  | 28,0   |
| 27              | 20,0                               | 0,552                  | 27,0   |
| 28              | 20,0                               | 0,572                  | 35,0   |
| 29              | 21,0                               | 0,593                  | 11,6   |
| 30              | 22,0                               | 0,614                  | 19,0   |
| 31              | 22,2                               | 0,634                  | 9,9  |
| 32              | 24,1                               | 0,655                  | 39,0   |
| 33              | 25,0                               | 0,676                  | 19,0   |
| 34              | 27,0                               | 0,696                  | 36,0   |
| 35              | 27,0                               | 0,717                  | 34,0   |
| 36              | 28,0                               | 0,738                  | 17,0   |
| 37              | 28,0                               | 0,758                  | 30,0   |
| 38              | 28,8                               | 0,779                  | 7,1  |
| 39              | 29,0                               | 0,799                  | 7,7  |
| 40              | 29,0                               | 0,820                  | 28,8   |
| 41              | 30,0                               | 0,841                  | 36,5   |
| 42              | 30,0                               | 0,862                  | 17,1   |
| 43              | 34,0                               | 0,882                  | 8,4  |
| 44              | 35,0                               | 0,903                  | 17,0   |
| 45              | 36,0                               | 0,924                  | 22,2   |
| 46              | 36,0                               | 0,944                  | 24,1   |
| 47              | 36,5                               | 0,965                  | 16,6   |
| 48              | 39,0                               | 0,986                  | 12,9   |

<sup>1)</sup> Der theoretischen Unterschreitungswahrscheinlichkeit  $P$  entspricht die empirische Summenhäufigkeit  $H$ .

Für die «bestmögliche» Wahl der Parameter der theoretischen Verteilungsfunktionen wurde hier die Methode der kleinsten Quadrate gewählt. Tabelle 4 zeigt für jede Station mit positivem Kolmogoroff-Test die Parameter  $A$  und  $B$ . Die Bilder 4 und 5 zeigen Dichte und Verteilungsfunktion zweier Gewässer. In Bild 5a und 5b wurde die  $x$ -Achse (Wahrscheinlichkeit) so transformiert, dass die theoretische Verteilungsfunktion nach Gumbel auf eine Gerade zu liegen kommt. Zugleich geben sie schraffiert den 66%-Vertrauensbereich an. Man beachte:

- die stark zunehmende Breite des Vertrauensbereiches für seltene Ereignisse («Alphornform» des Vertrauensbereiches)
- für gleich genaue Aussage genügt bei Beobachtungsreihen mit geringer Streuung eine kürzere Beobachtungsdauer als für Reihen grösserer Streuung. Man vergleiche dazu die HQ-Verteilung der Kander und Langeten in Bild 5a
- die NQ-Werte werden für die Kander gut, für die Langeten nur schlecht durch eine Gumbelverteilung repräsentiert.

Die Parameter  $A$  und  $B$  bestimmen die erwähnten theoretischen Verteilungsfunktionen mathematisch eindeutig. Gemäss den getroffenen Annahmen geben diese zwei Zahlenwerte vermutlich eine Schätzung der «wahren» Verteilungsfunktion. Der Parameter  $A$  stellt den häufigsten Wert, der Parameter  $B$  ein Mass für die Streuung der theoretischen Verteilungsfunktion dar.

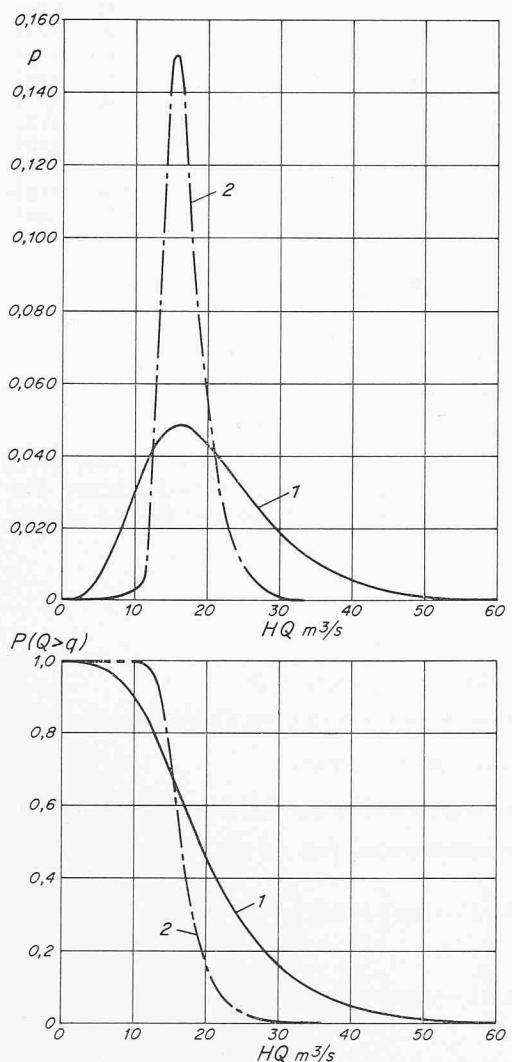


Bild 4. Gumbelverteilung für zwei Gewässer (Hochwasser). Oben: Dichtefunktion, unten: Verteilungsfunktion. 1 Langeten bei Lotzwil  $A = 16,46$ ,  $B = 7,46$ ; 2 Kander bei Gasterntal  $A = 15,77$ ,  $B = 2,44$

### 3. Massgebende Einflüsse auf die Verteilungsfunktionen extremer Wasserführung

Der Gedanke liegt nahe, die Verteilungsparameter mit Charakteristika der Einzugsgebiete zu korrelieren. Dabei würde man ein Mass für die Abhängigkeit der Verteilungsfunktionen von bestimmten Gebietscharakteristika (wie etwa in Tabelle 2 zusammengestellt) erhalten: die auf die rund 30

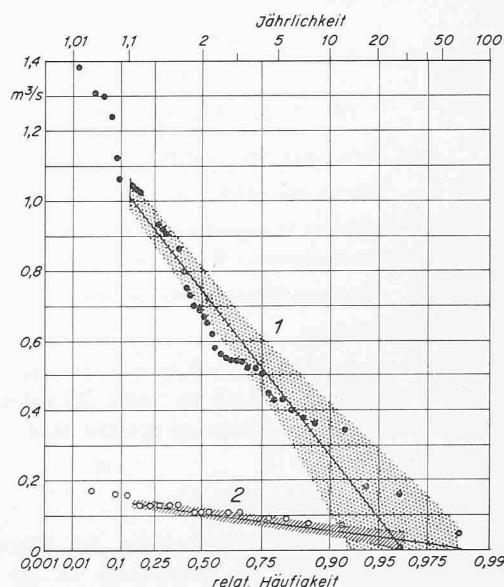
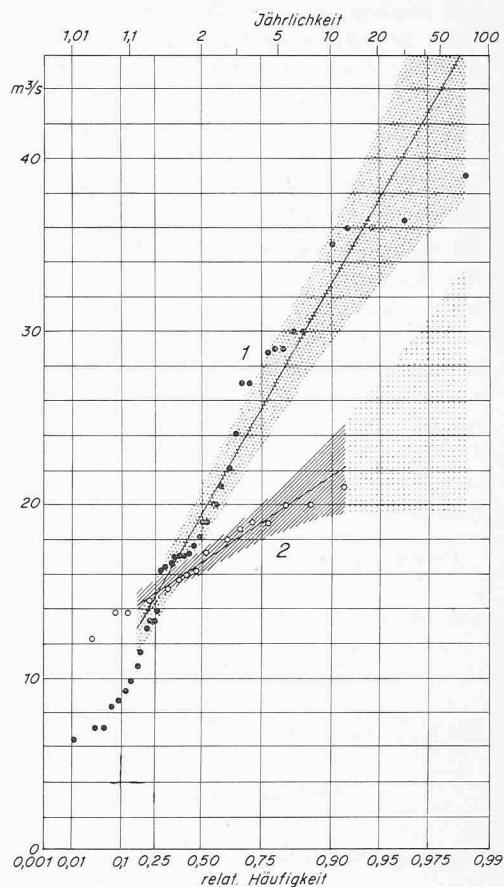


Bild 5a (oben). Gumbelverteilung mit Vertrauensbereich für zwei Gewässer (Hochwasser) 1 Langeten bei Lotzwil, 2 Kander bei Gasterntal

Bild 5b (unten). Gumbelverteilung mit Vertrauensbereich für zwei Gewässer (Niederwasser) 1 Langeten bei Lotzwil, 2 Kander bei Gasterntal

Einzugsgebiete beschränkten Aussagen liessen sich dann auf andere Gebiete näherungsweise übertragen. Diesem Wunsch stehen jedoch folgende Schwierigkeiten entgegen:

- Die teilweise kurzen Beobachtungsdauern ermöglichen nur eine grobe Schätzung der «wahren» Parameter  $A$  und  $B$ .
- Die geringe Anzahl der untersuchten Gebiete repräsentiert die Vielfalt der möglichen Kombinationen nur mangelhaft.
- Die Gebietcharakteristika sind untereinander nicht unabhängig. So bestehen etwa Zusammenhänge zwischen Fläche und Umfang der Einzugsgebiete, zwischen Fläche, Meereshöhe, Steilheit, Bewaldung, Vergletscherung usw. Bei einer sorglosen Auswertung besteht die Gefahr der Multikollinearität ([14]).
- Der lokale klimatologische Einfluss lässt sich nur schlecht beschreiben. Allein die Regenintensitäten nach [5], die Exposition, sowie die mittlere Meereshöhe stehen als leicht zugängliche Information zur Verfügung.

Erheblicher mathematischer Einsatz (Berechnung partieller Korrelationskoeffizienten, schrittweise Mehrfachregression, Faktorenanalyse) führte zu folgenden, nur mit Vorbehalt aufzunehmenden Schlüssen:

- Für Hochwasser zeigen sich  $A$  und  $B$  weitgehend von Geometrie- und Gefällsverhältnissen des Einzugsgebietes abhängig.
- Für Niederwasser besteht ein statistischer Zusammenhang von  $A$  und  $B$  mit Geometrie, Hangneigung und mittlerer Meereshöhe.

Formelmässig lassen sich die Beziehungen angeben mit:

$$(4.1a) A_{HQ} = 0,0531 \cdot \frac{km^{0,732} \cdot HN^{0,939}}{FG^{0,295}}$$

(87,8 % der Varianz erklärt)

$$(4.2a) B_{HQ} = 0,002457 \cdot \frac{UM^{1,241} \cdot HN^{1,203}}{FG^{0,498}}$$

(75,6 % der Varianz)

$$(4.1b) A_{NQ} = 0,04157 \cdot \frac{km^{1,378}}{SP^{0,710} \cdot MH^{0,321}}$$

(92,4 % der Varianz)

$$(4.2b) B_{NQ} = 0,12481 \cdot \frac{TL^{0,3007} \cdot km^{0,7521}}{MH^{0,5901}}$$

(91,7 % der Varianz)

$A, B$  Parameter der Gumbelverteilung

$km$  Fläche des Einzugsgebietes

$HN$  Mittlere Hangneigung, einzusetzen in (Ermittlung s.z.B. [1], 4–16)

$FG$  Mittleres Fliessgefälle, einzusetzen in

$UM$  Umfang

$SP$  Distanz zwischen Schwerpunkt des Einzugsgebietes und der Stelle, für welche die Extrem wassermenge gesucht wird.

$TL$  Tallänge

$MH$  Mittlere Meereshöhe

[m<sup>3</sup>/s]

[km<sup>2</sup>]

[%]

[%]

[km]

[km]

[m]

Schrittweise Mehrfachregression mit Einbezug weiterer Charakteristika hätte die Anpassung an die vorhandenen Daten verbessert. Sie hätte aber, wie weitere Untersuchungen andeuten, nicht zu einer Verbesserung allgemeingültiger Aussagen geführt. Auch bedeuten die empirischen Gleichungen (4a) und (4b) nicht unbedingt, dass ein kausaler Zusammenhang zwischen den dort angeführten Charakteristika bestehen muss.

Tabelle 4a.

| Nr. | Stations-Gumbelverteilung |       |          |          | Ln-Normalverteilung |        |          |          |
|-----|---------------------------|-------|----------|----------|---------------------|--------|----------|----------|
|     | $A$                       | $B$   | $A/km^2$ | $B/km^2$ | $A$                 | $B$    | $A/km^2$ | $B/km^2$ |
| 1   | 26,9                      | 10,5  | 1,19     | 0,46     | 30,5                | 0,38   | 1,35     | 0,017    |
| 2   | 10,4                      | 9,3   | 0,33     | 0,29     | 12,0                | 0,81   | 0,38     | 0,025    |
| 3   | 51,6                      | 19,9  | 0,94     | 0,36     | 58,0                | 0,40   | 1,05     | 0,007    |
| 4   | 32,8                      | 11,2  | 0,29     | 0,10     | 37,1                | 0,28   | 0,33     | 0,003    |
| 5   | 49,0                      | 15,5  | 0,33     | 0,11     | 54,8                | 0,31   | 0,37     | 0,002    |
| 6   | 12,8                      | 5,1   | 0,08     | 0,03     | 14,2                | 0,45   | 0,08     | 0,003    |
| 7   | 56,4                      | 23,2  | 0,76     | 0,31     | 64,6                | 0,35   | 0,87     | 0,005    |
| 8   | 15,7                      | 2,4   | 0,38     | 0,06     | 16,8                | 0,16   | 0,41     | 0,004    |
| 9   | 6,9                       | 0,9   | 0,48     | 0,06     | 7,4                 | 0,13   | 0,51     | 0,009    |
| 10  | 14,4                      | 8,1   | 0,49     | 0,28     | 16,9                | 0,47   | 0,58     | 0,016    |
| 11  | 11,0                      | 3,4   | 0,43     | 0,13     | 12,3                | 0,30   | 0,48     | 0,012    |
| 12  | –                         | –     | –        | –        | –                   | –      | –        | –        |
| 13  | –                         | –     | –        | –        | –                   | –      | –        | –        |
| 14  | 25,7                      | 9,4   | 0,21     | 0,08     | 28,9                | 0,37   | 0,23     | 0,003    |
| 15  | 83,1                      | 32,1  | 0,81     | 0,31     | 94,3                | 0,37   | 0,92     | 0,004    |
| 16  | 0,569                     | 0,393 | 1,05     | 0,73     | 0,665               | 0,0006 | 1,23     | 0,001    |
| 17  | 0,562                     | 0,193 | 0,95     | 0,32     | 0,632               | 0,0003 | 1,07     | 0,001    |
| 18  | 16,4                      | 7,6   | 0,14     | 0,07     | 18,5                | 0,48   | 0,16     | 0,004    |
| 19  | 11,4                      | 3,1   | 0,16     | 0,04     | 12,6                | 0,27   | 0,17     | 0,004    |
| 20  | 45,0                      | 13,7  | 0,60     | 0,18     | 50,2                | 0,31   | 0,66     | 0,004    |
| 21  | 37,2                      | 12,3  | 1,20     | 0,40     | 41,9                | 0,30   | 1,35     | 0,010    |
| 22  | 17,6                      | 2,9   | 0,45     | 0,07     | 18,8                | 0,18   | 0,48     | 0,005    |
| 23  | 27,6                      | 7,1   | 0,35     | 0,09     | 29,9                | 0,31   | 0,38     | 0,004    |
| 24  | –                         | –     | –        | –        | –                   | –      | –        | –        |
| 25  | 23,0                      | 5,7   | 0,34     | 0,09     | 25,3                | 0,22   | 0,38     | 0,003    |
| 26  | 9,2                       | 6,4   | 0,38     | 0,27     | 11,0                | 0,46   | 0,46     | 0,019    |
| 27  | 14,7                      | 7,8   | 0,51     | 0,27     | 17,0                | 0,48   | 0,58     | 0,016    |
| 28  | 6,1                       | 2,6   | 0,33     | 0,14     | 7,0                 | 0,37   | 0,38     | 0,020    |
| 29  | 5,7                       | 5,8   | 0,83     | 0,84     | 7,0                 | 0,66   | 1,01     | 0,096    |
| 30  | 7,0                       | 6,2   | 0,51     | 0,45     | 8,6                 | 0,59   | 0,62     | 0,043    |
| 31  | 19,4                      | 10,2  | 0,26     | 0,13     | 21,7                | 0,57   | 0,29     | 0,008    |
| 32  | 7,3                       | 2,9   | 0,37     | 0,15     | 8,3                 | 0,37   | 0,42     | 0,019    |
| 33  | 8,0                       | 7,8   | 0,46     | 0,45     | 9,9                 | 0,60   | 0,57     | 0,035    |
| 34  | 11,3                      | 4,1   | 0,55     | 0,20     | 12,8                | 0,27   | 0,62     | 0,013    |
| 35  | 27,0                      | 8,8   | 0,17     | 0,06     | 30,2                | 0,29   | 0,19     | 0,002    |
| 36  | 21,4                      | 12,8  | 0,32     | 0,19     | 25,4                | 0,38   | 0,38     | 0,005    |
| 37  | 41,8                      | 34,1  | 0,39     | 0,32     | 50,4                | 0,60   | 0,47     | 0,005    |
| 38  | 78,2                      | 52,1  | 0,20     | 0,14     | 93,4                | 0,48   | 0,24     | 0,001    |
| 39  | 22,1                      | 15,5  | 0,30     | 0,21     | 26,4                | 0,54   | 0,36     | 0,007    |
| 40  | –                         | –     | –        | –        | –                   | –      | –        | –        |

$A, B$  in [m<sup>3</sup>/s];  $A/km^2, B/km^2$  in [m<sup>3</sup>/s km<sup>2</sup>]

#### 4. Anwendung und Folgerung

##### 4.1 Schätzen von extremen Abflüssen

Die Gleichungen (4a) und (4b) können für eine grobe Abschätzung von Extremabflüssen aus Schweizerischen Einzugsgebieten zwischen etwa 10 und 200 km<sup>2</sup> benutzt werden. Es gilt

$$(5a) HQ_z = A_{HQ} + k \cdot B_{HQ}$$

$$(5b) NQ_z = A_{NQ} - k \cdot B_{NQ}$$

$z$  Jährlichkeit von HQ bzw. NQ

$k$  Faktor als Funktion von  $z$ ; bei Gumbelverteilung

$$k = -\ln(-\ln(1 - 1/z))$$

Tabelle 5 gibt einige  $k$ -Werte für die Gumbelverteilung an.

Die Umkehrfunktionen von Gl (5a) und (5b) lauten:

$$(6a) z_{HQ} = 1 \left[ 1 - \exp \left( -\exp \left( \frac{q - A}{B} \right) \right) \right]$$

$$(6b) z_{NQ} = 1 \left[ 1 - \exp \left( -\exp \left( \frac{A - q}{B} \right) \right) \right]$$

Bei dieser Abschätzung können Fehler bis  $\pm 100\%$ , in Sonderfällen und insbesondere bei seltenen Ereignissen ( $z > 20$ ) wohl auch darüber, auftreten. Dennoch stellen diese Abschätzformeln gegenüber den derzeit angewandten «empiri-

Tabelle 4b.

| Stations-Nr. | Gumbelverteilung |       |                   |                   | Ln-Normalverteilung |       |                   |                   | Weibull-Verteilung |       |                   |                   |
|--------------|------------------|-------|-------------------|-------------------|---------------------|-------|-------------------|-------------------|--------------------|-------|-------------------|-------------------|
|              | A                | B     | A/km <sup>2</sup> | B/km <sup>2</sup> | A                   | B     | A/km <sup>2</sup> | B/km <sup>2</sup> | A                  | B     | A/km <sup>2</sup> | B/km <sup>2</sup> |
| 1            | 0,101            | 0,025 | 4,4               | 1,1               | 0,08                | 0,399 | 3,5               | 17,6              | 1,842              | 0,067 | 81,5              | 3,0               |
| 2            | 0,089            | 0,024 | 2,7               | 0,7               | 0,07                | 0,433 | 2,2               | 13,6              | 1,793              | 0,060 | 56,4              | 1,9               |
| 3            | —                | —     | —                 | —                 | 0,24                | 0,363 | 4,3               | 6,6               | 2,282              | 0,187 | 41,5              | 3,4               |
| 4            | 0,761            | 0,137 | 6,7               | 1,2               | 0,65                | 0,300 | 5,8               | 2,6               | 2,488              | 0,631 | 22,2              | 5,6               |
| 5            | 0,826            | 0,168 | 5,6               | 1,1               | 0,70                | 0,326 | 4,7               | 2,2               | 2,404              | 0,607 | 16,4              | 4,1               |
| 6            | —                | —     | —                 | —                 | 0,15                | 0,867 | 0,9               | 5,3               | 1,640              | 0,220 | 10,1              | 1,4               |
| 7            | 0,389            | 0,081 | 5,2               | 1,0               | 0,33                | 0,305 | 4,4               | 4,1               | 1,450              | 0,167 | 19,5              | 2,3               |
| 8            | 0,129            | 0,028 | 3,1               | 0,6               | 0,11                | 0,386 | 2,7               | 9,4               | 4,226              | 0,108 | 103,8             | 2,7               |
| 9            | 0,091            | 0,015 | 6,3               | 1,0               | 0,08                | 0,238 | 5,5               | 16,5              | 3,500              | 0,051 | 243,1             | 3,5               |
| 10           | 0,241            | 0,038 | 8,3               | 1,3               | 0,22                | 0,223 | 7,6               | 7,7               | 1,857              | 0,112 | 64,3              | 3,9               |
| 11           | —                | —     | —                 | —                 | 0,07                | 0,331 | 2,7               | 12,9              | 1,587              | 0,041 | 62,0              | 1,6               |
| 12           | —                | —     | —                 | —                 | —                   | —     | —                 | —                 | —                  | —     | —                 | —                 |
| 13           | —                | —     | —                 | —                 | —                   | —     | —                 | —                 | —                  | —     | —                 | —                 |
| 14           | 0,782            | 0,208 | 6,3               | 1,6               | 0,60                | 0,466 | 4,8               | 3,7               | 2,418              | 0,653 | 19,5              | 5,3               |
| 15           | 0,399            | 0,138 | 3,9               | 1,3               | —                   | —     | —                 | —                 | 1,616              | 0,356 | 15,8              | 3,5               |
| 16           | 0,002            | 0,001 | 3,7               | 1,8               | 0,001               | 0,001 | 2,2               | 1,5               | 0,002              | 0,002 | 3,7               | 3,7               |
| 17           | 0,002            | 0,001 | 3,3               | 1,6               | 0,001               | 0,001 | 1,5               | 2,1               | 0,002              | 0,002 | 3,4               | 3,4               |
| 18           | 0,858            | 0,265 | 7,4               | 2,3               | 0,62                | 0,576 | 5,3               | 5,0               | 1,430              | 0,828 | 12,4              | 7,2               |
| 19           | 0,680            | 0,204 | 9,4               | 2,8               | 0,51                | 0,537 | 7,0               | 7,4               | 2,343              | 0,558 | 32,5              | 7,7               |
| 20           | 0,373            | 0,059 | 4,9               | 0,7               | 0,33                | 0,228 | 4,3               | 3,0               | 2,224              | 0,188 | 29,5              | 2,5               |
| 21           | —                | —     | —                 | —                 | 0,13                | 0,775 | 4,1               | 24,9              | 1,723              | 0,183 | 55,4              | 5,9               |
| 22           | 0,146            | 0,034 | 3,7               | 0,8               | 0,12                | 0,360 | 3,0               | 9,2               | 2,791              | 0,094 | 71,7              | 2,4               |
| 23           | —                | —     | —                 | —                 | 0,45                | 0,064 | 5,7               | 0,8               | —                  | —     | —                 | —                 |
| 24           | —                | —     | —                 | —                 | —                   | —     | —                 | —                 | —                  | —     | —                 | —                 |
| 25           | 0,273            | 0,052 | 4,0               | 0,7               | 0,24                | 0,272 | 3,5               | 4,0               | 1,743              | 0,116 | 26,1              | 1,7               |
| 26           | 0,125            | 0,015 | 5,2               | 0,6               | 0,12                | 0,162 | 5,0               | 6,7               | 1,651              | 0,034 | 68,8              | 1,4               |
| 27           | 0,185            | 0,028 | 6,3               | 0,9               | 0,17                | 0,209 | 5,8               | 7,1               | 1,337              | 0,052 | 45,9              | 1,8               |
| 28           | 0,131            | 0,016 | 7,1               | 0,8               | 0,12                | 0,172 | 6,5               | 9,3               | 1,965              | 0,004 | 10,7              | 2,2               |
| 29           | —                | —     | —                 | —                 | —                   | —     | —                 | —                 | —                  | —     | —                 | —                 |
| 30           | —                | —     | —                 | —                 | —                   | —     | —                 | —                 | 1,936              | 0,059 | 14,0              | 4,3               |
| 31           | 1,427            | 0,376 | 18,8              | 5,0               | 1,15                | 0,398 | 15,2              | 5,2               | 1,139              | 0,692 | 15,0              | 9,1               |
| 32           | 0,124            | 0,014 | 6,2               | 0,7               | 0,11                | 0,157 | 5,5               | 7,9               | 2,266              | 0,036 | 11,4              | 1,8               |
| 33           | —                | —     | —                 | —                 | 0,17                | 0,126 | 9,8               | 7,2               | 1,887              | 0,038 | 10,9              | 2,2               |
| 34           | —                | —     | —                 | —                 | —                   | —     | —                 | —                 | —                  | —     | —                 | —                 |
| 35           | 0,923            | 0,167 | 5,9               | 1,0               | 0,80                | 0,243 | 5,1               | 1,5               | 2,478              | 0,531 | 16,0              | 3,4               |
| 36           | 0,140            | 0,034 | 2,1               | 0,5               | 0,11                | 0,374 | 1,6               | 5,6               | 1,672              | 0,083 | 25,1              | 1,2               |
| 37           | 0,360            | 0,066 | 3,3               | 0,6               | 0,31                | 0,259 | 2,8               | 2,4               | 1,348              | 0,137 | 12,6              | 1,3               |
| 38           | 1,561            | 0,125 | 4,0               | 0,3               | 1,49                | 0,104 | 3,8               | 0,2               | 1,546              | 0,287 | 4,0               | 0,7               |
| 39           | —                | —     | —                 | —                 | 0,58                | 0,170 | 7,8               | 2,3               | 1,373              | 0,170 | 18,6              | 2,3               |
| 40           | —                | —     | —                 | —                 | —                   | —     | —                 | —                 | —                  | —     | —                 | —                 |

A, B in [m<sup>3</sup>/s]; A/km<sup>2</sup>, B/km<sup>2</sup> in [1/s km<sup>2</sup>]

schen» Formeln von Hofbauer, Kürsteiner, Salcher, ([6], [8], [11]), Melli und Müller einen gewissen Fortschritt dar:

- Sie liefern mit zumindest gleichwertiger Genauigkeit die Schätzung einer Häufigkeitsverteilung
- Sie beruhen auf Beobachtungen aus Schweizerischen Einzugsgebieten bis zum Jahre 1970
- Sie erlauben auch ein Abschätzen von Niederwassermengen

Man befindet sich dabei etwa in der Lage eines Bergwanderers in einem Schweizerischen Seitental: statt einer Karte Mitteleuropas erhält er zu seiner Orientierung eine neue Übersichtskarte der Schweiz. Für gewagte Klettertouren wird diese nicht ausreichen! Zusätzliche Beobachtungen und Überlegungen über mögliche Sondereinflüsse (Karsterscheinungen; Stauseen; extremes Relief usw.) sollten keinesfalls vernachlässigt werden.

Höhere Genauigkeit erfordert heutzutage meist noch bedeutenden Zeit- und Geldaufwand: Durchführen von kurzfristigen Messkampagnen und anschliessendes Einpassen der Beobachtungen in ein gewähltes hydrologisches Modell oder langzeitige Beobachtungsreihen und deren mathematische Analyse.

Tabelle 5. k-Werte für die Gumbelverteilung

| z    | 2     | 5     | 10    | 15    | 20    | 25    | 30    |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| k(z) | 0,367 | 1,500 | 2,250 | 2,674 | 2,970 | 3,199 | 3,384 |

#### 4.2 Eigenschaften der Gumbelverteilung

Aufgrund der Untersuchung kann geschlossen werden, dass die Gumbelverteilung das statistische Verhalten zumindest von Hochwasserereignissen recht gut wiedergibt<sup>2)</sup>. Deshalb sei diese Verteilung noch etwas näher betrachtet, und zwar im Hinblick auf eine Aussage über die zeitliche Aufeinanderfolge von Abflussextremen und auf eine Langzeitstrategie gegenüber Extremabflüssen.

#### 4.2.1 Die zeitliche Aufeinanderfolge von Extremabflüssen

Die theoretischen Verteilungen wurden aus der jeweils pro Kalenderjahr höchsten, bzw. niederen Wassermenge ermittelt. Gl. (2) liefert das dazu entsprechende durchschnittliche Wiederkehrintervall (Jährlichkeit). Es mögen nun die Wiederkehrintervalle all jener Extremabflüsse interessieren, welche einen bestimmten Grenzwert  $q_g$  (z. B. Beginn der Ausuferung) überschreiten, bzw. unterschreiten (Bild 6). Solche Extreme können pro Jahr mehrmals, einmal oder auch gar nicht auftreten. Für diese Extremwerte ergibt sich das durchschnittliche Wiederkehrintervall  $\tau$  [genauer: der Erwartungswert  $E(T)$  der Zufallsvariablen  $(T)$ ] als Funktion von  $q_g$ .

Für die Hochwasser der Langen gen wurde nachgewiesen, dass die Häufigkeitsverteilung von  $\tau$  (genauer: der Zufallsvariablen  $T$ ) einer Exponentialverteilung entspricht.

<sup>2)</sup> Für die Niederwasserereignisse scheint sich allerdings die Weibull-Verteilung besser zu eignen. Zeitmangel verhinderte eine Erweiterung der Betrachtung auch auf diese Verteilung.

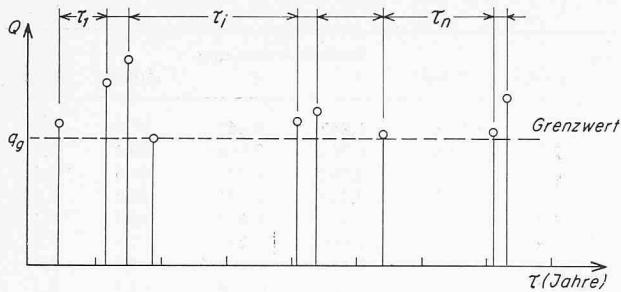


Bild 6. Extremabflüsse, die den Grenzwert  $q_g$  überschreiten

$$(7) \quad P(T \leq \tau) = 1 - e^{-a\tau}$$

$P(T \leq \tau)$  Wahrscheinlichkeit, dass Zufallsvariable  $T \leq \tau$

$T$  Zeitintervall als Zufallsvariable

$\tau$  vorgegebenes Zeitintervall

$a$  Parameter

Für statistisch voneinander unabhängige Extremwerte gilt dann für das Auftreten von  $r$  Extremen ( $HQ > q_g$ , bzw.  $NQ < q_g$ ) innerhalb eines Jahres die Poissonverteilung (Nachweis z. B. bei [14]).

$$(8) \quad P(R = r) = e^{-a} \cdot \frac{a^r}{r!}$$

$a$  Parameter

$r$  0, 1, 2...

Speziell für  $r = 0$  gilt  $P(R = 0) = e^{-a}$ . Auch dieser Zusammenhang wurde für die Langenzen zur Kontrolle überprüft und als statistisch gesichert gefunden.

Der Verfasser [15] fand nun die folgende Beziehung zwischen dem in Gl. (7) und Gl. (8) auftretenden Parameter  $a$  und der Gumbelverteilung

$$(9) \quad a = \exp\left(-\frac{q_g - A}{B}\right)$$

$a$  Parameter der Exponential-, bzw. Poissonverteilung; Einheit: 1/Jahr

$A, B$  Parameter der Gumbelverteilung

Weiters gilt auch

$$t = \frac{1}{a}, \quad z = 1/(1 - e^a) \quad \text{und} \quad a = -\ln(1 - 1/z)$$

$z$  Jährlichkeit

$a$  Parameter wie oben

$t$  durchschnittliches Wiederkehrintervall für Exponentialverteilung

Es lässt sich leicht zeigen, dass  $t$  immer kleiner ist als das zugehörige  $z$  (Ausnahme: für  $a = 0$  sind  $z$  und  $t = \infty$ ). Für  $z > 10$  sind die Unterschiede jedoch nur noch gering (siehe dazu auch [9]).

Aus diesen theoretischen Überlegungen lässt sich z. B. folgendes ableiten:

- Es dürfen Risiko-Betrachtungen, wie etwa bei [2] erwähnt, angestellt werden.
- Das Risiko, dass  $z$ -jährige Extreme bereits vor Ablauf von  $z$  Jahren auftreten, steht etwa bei 64 zu 100.

- Es besteht durchaus die Möglichkeit zeitlicher Häufung von Extremwasserabflüssen, ohne dass dies von vornherein einem katastrophalen Trend zugeschrieben werden muss.

#### 4.22 Eine Langzeitstrategie gegenüber Extremabflüssen

Extremabflüsse interessieren vor allem im Zusammenhang mit zu erwartenden Schäden (Überschwemmungen, erhöhte Abwasserbelastung bei Niederwasserführung usw.). Ist die Beziehung zwischen Extremabfluss und Schadenskosten (Schadensfunktion) bekannt, so lässt sich für jede Häufigkeitsverteilung des Extremabflusses der langzeitig zu erwartende Gesamtschaden (Schadenserwartungswert) berechnen (siehe dazu [16]). Für die Gumbelverteilung und lineare Schadensfunktion wurde die folgende Beziehung abgeleitet:

$$(10) \quad SE = b \cdot B \cdot I(z_a, z_a)$$

$SE$  Schadenserwartungswert [Fr.]

$b$  Steigung der linearen Schadensfunktion [Fr. s/m<sup>3</sup>]

$B$  Parameter der Gumbelverteilung [m<sup>3</sup>/s]

$I(z_a, z_e)$  Faktor, abhängig vom Hochwasser der Jährlichkeit  $z_a$ , bei welchem der Schaden einsetzt, und dem Hochwasser der Jährlichkeit  $z_e$ , von dem ab kein zusätzlicher Schaden zu erwarten ist.

Gl. (10) zeigt die lineare Abhängigkeit des Schadenserwartungswertes vom Streuungsparameter  $B$  und der Steigung der Schadensfunktion. Die Werte für  $I(z_a, z_e)$  sind dem Bild 7 zu entnehmen. Dort lässt sich z. B. ablesen, dass der Ausbau eines vorgegebenen Gewässers vom derzeitigen zehnjährlichen Schadensfall auf ein hundertjährliches Schadensereignis den Schadenserwartungswert auf 1/10 herabsetzt. Dies gilt aber nur dann, wenn die Schadensfunktion stetig ansteigt ( $z_e = \infty \cong 10^5$ ). Wäre jedoch z. B. vom 200-jährlichen Schadensereignis an auch ohne Ausbau kein zusätzlicher Schaden mehr zu erwarten ( $z_e = 200$ ), so verringert sich der Schadenserwartungswert auf 1/50.

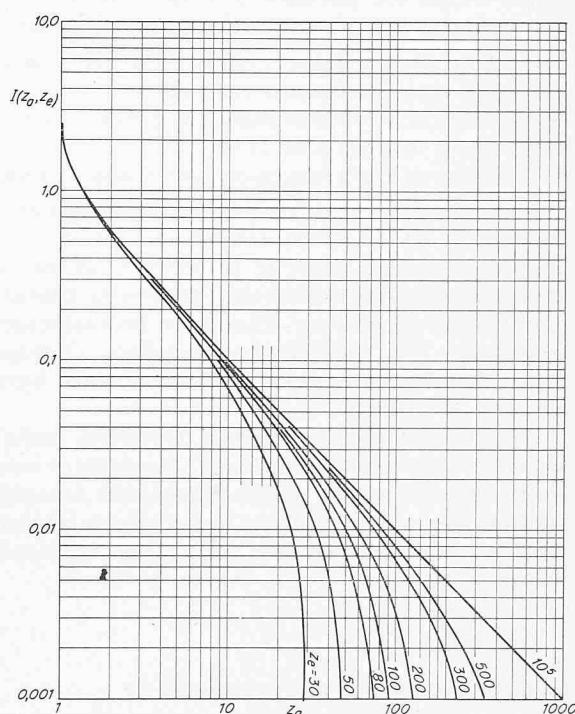


Bild 7.  $I(z_a, z_e)$ -Funktion zur Ermittlung des Schadenserwartungswertes

An solchen Vergleichen kann sich eine Strategie für die Verteilung von öffentlichen Geldmitteln zur Schadensverhütung orientieren. Sie könnte auch die Grundlage für eine Hochwasser-Versicherung liefern, wie sie etwa derzeit für den Bodensee diskutiert wird.

Adresse des Verfassers: Dr. P. Widmoser, Privatdozent, Institut für Kulturtechnik, ETH Zürich, Leonhardstr. 33, CH-8006 Zürich

## Literatur

- [1] Chow, V.T.: *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York, 1964.
- [2] Bruschin, J. und Estéve, R.: Utilisation de l'analyse fréquentielle des crues pour la détermination de la crue de projet. «Schweiz. Bauzeitung» 91 (1973), H. 32 und 33, S. 777-790.
- [3] Eggers, H.: Parameterfreie statistische Methoden zur Analyse von Datenreihen. Mitt. d. Theodor-Rehbock-Flussbaulaboratoriums (1970), H. 158.
- [4] Gumbel, E. J.: *Statistics of Extremes* (1958), Columbia Univ. Press New York.
- [5] Hörl, A. und Rhein, M. R.: Die Intensität der Starkregen der Schweiz. «Schweiz. Zeitschrift für Hydrologie» 24 (1962). S. 291-352.
- [6] Hofbauer, R.: Eine neue Formel für die Ermittlung der grössten Hochwassermengen «Österreichische Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst». (1916), H. 3.
- [7] Kreyszig, E.: *Statistische Methoden und ihre Anwendung*. Göttingen 1968, Vandenhoeck und Ruprecht.
- [8] Kürsteiner, W.: Das Elektrizitätswerk der Stadt Chur. «Schweiz. Bauzeitung» Bd. 69 (1917), H. 1, S. 4, H. 2, S. 13, H. 3, S. 35.
- [9] Lauterbach, D.: Betrachtungen zur Wahl von Verteilungsfunktionen für die Berechnung von Hochwasserdurchflüssen. «Wasserwirtschaft, Wassertechnik» 1968, H. 1.
- [10] Lichtenhahn, C.: Stollen im Eis zur Verhinderung von Ausbrüchen eines Sees im Grubengletschergebiet (Wallis). Villach, Interpraevent (1971), S. 465-469.
- [10a] Melli, E.: Die Dimensionierung städtischer Kanäle. «Schweiz. Bauzeitung» Bd. 84 (1924), H. 12, S. 137-141.
- [10b] Müller, R.: Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauungen. Mitteilung Nr. 4 aus der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH Zürich, 1943.
- [11] Salcher, E.: Zur Berechnung von Hochwasserabflüssen. «Wasserwirtschaft und Technik», 1936, H. 28-30.
- [12] Töndury, G. A.: Ursachen und Bekämpfungsmöglichkeiten der zunehmenden Hochwassergefahr im Engadin. «Wasser und Energiewirtschaft» 46 (1954). H. 12, S. 308-323.
- [13] Walser, M. E.: La crue de la Borgne le 4 août 1952. «Wasser und Energiewirtschaft» 44 (1952). H. 9, S. 179-183.
- [14] Weinberg, F.: *Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik sowie Anwendung im Operations Research*. Berlin-Heidelberg-New York, 1968. Springer-Verlag.
- [15] Widmoser, P.: Mathematische Methoden in der Hydrologie mit besonderer Berücksichtigung von Abflüssen aus kleinen Einzugsgebieten. Habilitationsschrift ETH Zürich (1973).
- [16] Widmoser, P.: Die Schadenserwartung von Hochwasserschäden. Villach, Interpraevent (1971), S. 105-113.

## Nekrolog



ADOLF MEIER-MANTEL  
dipl. Bauingenieur

1895 1974

**Adolf Meier-Mantel, dipl. Bauingenieur**, geboren am 28. März 1895, ist, wie wir im Heft 23, S. 570, kurz erwähnten, am 1. Mai gestorben.

Obwohl ihm seine Gesundheit seit mehreren Jahren viel zu schaffen machte und es beruflich stiller um ihn geworden war, wurden alle seine Freunde von seinem plötzlichen Hinschied schmerzlich überrascht.

Wie es der Welt Lauf ist: Nach den Studienjahren kamen wir alle nach den persönlichen Verpflichtungen mehr oder weniger auseinander.

Dies um so mehr, als unsere Generation 1914 ins «Poly» eintrat und unsere Studienzeit durch die militärischen Instruktions- und Aktivdienste besonders erschwert wurde. Adolf Meier ist überdies im Militärdienst an einer Lungen- und Brustfellaffektion erkrankt, die seine Studienzeit rigoros unterbrach und einen fünfjährigen Kuraufenthalt in Leysin verlangte. Es zeugt von seiner Zuversicht und Willenskraft, dass er nachher sein Studium erneut aufnahm und 1924 erfolgreich abschloss.

Das Jahr darauf finden wir ihn zuerst im Meliorationsamt des Kantons Zürich und nachher zwei Jahre im Ingenieurbüro Rathgeb. Nach vorübergehender Arbeit in privaten Ingenieurbüros in Luzern und Basel, war er dann dauernd während vier Jahren im Ingenieurbüro Carl Erni in Luzern tätig. Nach nahezu zehn Jahren der praktischen

Ausbildung in allen Sparten des Tiefbaus und des Eisenbetons eröffnete Adolf Meier in seinem angestammten Wädenswil sein eigenes Ingenieurbüro. Eisenbeton und Tiefbau waren stets seine bevorzugten Tätigkeitsgebiete, und mit namhaften Architekten hat er in Zusammenarbeit auch bedeutende Hochbauten projektiert und ausgeführt. Ein grosses Geschick und Einfühlungsvermögen halfen ihm, die Fährnisse seiner Gesundheit zu überwinden. Freudig ist er im letzten Herbst noch einem Rufe zu einer Zusammenkunft ehemaliger Kurskollegen gefolgt. In langjähriger, glücklicher Ehe, von seiner Ehegattin, ebenfalls eine Wädenswilerin, fürsorgend betreut, hat sich bei Adolf Meier eine erfolgreiche Laufbahn als Lebenswerk eines Bauingenieurs abgeschlossen. Seinen Berufskollegen und Freunden bleibt er unvergessen.

Ernst Züttel, Küsnacht

† Karel Branberger, Maschineningenieur, Prof., von Prag, Tschechoslowakei, geboren am 4. November 1882, ETH 1905-1906, ist am 24. Juni gestorben. Der Verstorbene war Professor an höheren Staatsgewerbeschulen und Dozent an der Technischen Hochschule Brno, Zivilingenieur und Rat des Patentgerichtes in Prag, Mitglied der Masaryk-Arbeits-Akademie und der tschechischen Landwirtschafts-Akademie; er wohnte in Prag.

† Ernst Gehrig, Maschineningenieur, geb. 1. März 1885, von Solothurn, ETH 1904 bis 1908, SIA, GEP, ist kürzlich gestorben. 1910/11 und von 1924 bis zu seinem Rücktritt 1951 arbeitete der Verstorbene für die von Rollschen Eisenwerke. Zuletzt war er Direktor des Eisenwerkes Choindez. Er wohnte in Solothurn.

† Emile Dujardin, Maschineningenieur, von Lille, Frankreich, ETH 1907 bis 1911, GEP, ist am 11. Juni gestorben. Der Verstorbene war Delegierter des Verwaltungsrates der Société Dujardin & Cie, Constructeurs à Lille. Seit 1945 war er Generaldirektor der Association des Industries du Nord de la France à Lille. Seit 1963 wohnte er in Paris.