Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 105/106 (1935)

Heft: 9

Artikel: Beitrag zur Berechnung der Geschiebeführung und der Normalprofilbreite von Gebirgsflüssen

Autor: Meyer-Peter, E. / Favre, Henry / Müller, Robert

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-47397

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: 13.07.2025

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

INHALT: Beitrag zur Berechnung der Geschiebeführung und der Normalprofilbreite von Gebirgsflüssen. — Ergebnisse des Kantonsspital-Wettbewerbes. — Markt- und Ausstellungshalle Chur. — Verdübelte Holzbalken System Derewiagin. — Kennlinien für Gusseisen. — Mitteilungen: Eisenbahn-Rollmaterial-Neuerungen. Auspumpzeiten. Siemens-Radialturbinen. Schweizerische Binnenschiffahrtsfragen. Preise und Diplome für gute Bauten. Vortragzyklus des Radioklub Zürich: „Die Photozelle in der Technik". Kunstharz-Presstoffe für Gleitlager. Der Bau hölzerner Antennentürme in Deutschland. Ein Hochstrassennetz für Chicago. Der Abbruch der Waterloobrücke in London. — Wettbewerbe: Kleine Genfer Wohnhäuser. Strandbad in Lausanne-Bellerive. — Nekrologe: Eva Kepes. Max Grass. Oscar Smreker. Arnold Pauli. Friedr. Trechsel. — Literatur. — Mitteilungen der Vereine. — Sitzungs- und Vortrags-Kalender.

Band 105 Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet. Nr. 9

Beitrag zur Berechnung der Geschiebeführung und der Normalprofilbreite von Gebirgsflüssen.

Von Prof. Dr. E. MEYER-PETER, Dr. HENRY FAVRE und Dipl. Ing. ROBERT MÜLLER, E. T. H. Zürich.

I. AUFGABESTELLUNG.

Vom hydraulischen Standpunkt aus ist der Wasserabfluss bei einem Gewässer mit freiem Wasserspiegel durch folgende Grössen eindeutig bestimmt:

1. Die Wassermenge pro Zeiteinheit Q,
2. das Sohlengefälle J_s,
3. die Profilform, die, gemäss Abb. 1, durch die Beziehung $z = f(x)$ (bezogen auf ein beliebiges Koordinatensystem) dargestellt wird,
4. Die Rauhigkeit des Flussbettes, die bei Anwendung der Manning-Strickler'schen Formel entweder für den ganzen benetzten Querschnitt durch einen mittleren Rauhigkeitskoeffizienten k_m, oder für einzelne Abschnitte des Profils durch verschiedene Rauhigkeitskoeffizienten k zum Ausdruck gebracht wird.

Im Falle eines prismatischen Gerinnes (J_s und Profilform konstant) und bei einer sehr grossen Flusslänge sind die vier genannten Grössen ausreichend zur Bestimmung der Wasserspiegellage und damit auch des benetzten Querschnittes $F = \int_{x_1}^{x_2} y\, dx$, des benetzten Umfanges $P = \int_{x_1}^{x_2} ds$ und des Profilradius $R = \frac{F}{P}$.

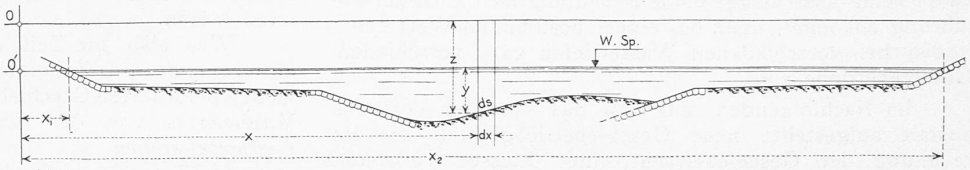

Abb. 1

Der Wasserspiegel ist dann parallel zur Flussohle und der entsprechende Abfluss wird als Normalabfluss bezeichnet.

In andern Fällen, also besonders auch bei in der Länge begrenzten Flusstrecken muss zur eindeutigen Bestimmung der Wasserspiegellage noch eine fünfte Bedingung, nämlich ein Punkt des Wasserspiegels gegeben sein.

Man sieht aber sofort, dass auch im Falle des Normalabflusses die gleiche Wassermenge bei gleichem Gefälle, gleicher Wasserspiegel-Höhe und Rauhigkeit, bei unendlich vielen verschiedenen Profilformen abgeleitet werden kann. Insbesondere ist das Verhältnis zwischen der Flussbreite und der Wassertiefe zunächst noch durchaus unbestimmt, auch wenn man aus praktischen Gründen die Grundform des Profils trapezförmig oder aus mehreren Trapezen zusammengesetzt wählt und die Böschungen der Ufer, bzw. der Wuhrungen ein für allemal aus konstruktiven Ueberlegungen festlegt. Bei industriellen Kanälen, bei denen jede Geschiebeführung vermieden werden muss, kann das Verhältnis von Breite zu Tiefe nach dem Grundsatz des „hydraulisch günstigsten" Profils ermittelt werden, das, bei sonst gleichen Bedingungen, einen minimalen Profilquerschnitt ergibt, doch lässt sich dieser Querschnitt aus konstruktiven Gründen praktisch meist nicht durchführen, weil die Wassertiefe dabei zu gross wird, sodass man gewöhnlich darauf angewiesen ist, einfach eine „möglichst" grosse Wassertiefe frei zu wählen. Bei Kraftwerkskanälen ist das Gefälle a priori nicht gegeben. Die daraus entstehende Unbestimmtheit der Aufgabe der Profilberechnung wird dann auf Grund der Bedingung ausgeschaltet, dass die Summe aus den jährlichen Auslagen für die Verzinsung und die Tilgung des Anlagekapitals, für die Erneuerung und den Unterhalt, sowie den Betrieb des Kanals einerseits und dem jährlichen Einnahmeausfall infolge der Energieverluste anderseits, ein Minimum werde. Man bestimmt, mit andern Worten, das „wirtschaftlichste Kanalprofil".

Bei der Korrektion von Gebirgsflüssen, die sich in ihrer eigenen Alluvion bewegen, tritt an Stelle solcher wirtschaftlicher Ueberlegungen die Erkenntnis, dass im Gleichgewichtszustand der Sohle des Flusses, im Zustand also, bei dem weder Abtrag noch Erhöhung der Sohle mehr auftreten, die Geschiebeführung nach Menge und Korngrösse einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Längsprofil und dem Querprofil begründet. Bei gegebener Geschiebeführung gibt es mit praktisch unbedeutenden Variationsmöglichkeiten nur ein Querprofil, das mit einem gegebenen, bzw. anzustrebenden Längsprofil vereinbar ist, und umgekehrt wird das Längsprofil durch die Wahl des Querprofils zum Voraus festgelegt. Ist das Querprofil unrichtig gewählt, so ist insofern kein Erfolg der Regulierungsarbeiten möglich, als das angestrebte Längsprofil dann vom Fluss nicht eingehalten werden kann. Je nachdem das Querprofil zu eng oder zu breit gewählt worden ist, stellt sich eine zu tiefe oder zu hoch liegende Sohle ein. Im ersten Fall sind teure Unterhaltsarbeiten in Form von Wuhrergänzungen oder Sohlenschwellen erforderlich, im zweiten Fall tritt Gefahr von Ueberflutungen der Dämme ein, sowie Hebung des Grundwasserspiegels in der benachbarten Talsohle.

Damit ergibt sich die grosse Bedeutung der richtigen Bestimmung der *Normalprofilbreite* eines zu korrigierenden Gebirgsflusses, deren wichtigste Grundlage in der Kenntnis des oben genannten Zusammenhanges zwischen Geschiebeführung und dem Längs- und Querprofil zu suchen ist. Der Zweck der vorliegenden Arbeit besteht darin, einen Beitrag zur Abklärung dieses Problems zu liefern. Dabei kann die Aufgabe auf zwei Arten formuliert werden:

a) Berechnung der jährlichen Geschiebefracht eines Gebirgsflusses im Gleichgewichtszustand beim Vorhandensein praktisch paralleler Leitwerke bzw. Hochwasserdämme, also regelmässigem Querprofil.

b) Ermittlung des Längsprofils eines zu korrigierenden Gebirgsflusses bei bekannter jährlicher Geschiebefracht an einer beliebigen Stelle und bei gewählter Normalprofilbreite, oder umgekehrt die Ermittlung der Normalprofilbreite bei gegebenem Längsprofil.

II. BERECHNUNG DER JÄHRLICHEN GESCHIEBEFRACHT EINES GEBIRGSFLUSSES IM GLEICHGEWICHTSZUSTAND UND MIT REGELMÄSSIGEM QUERPROFIL.

1. *Das Geschiebetrieb-Gesetz.* Ein Versuch, diese Aufgabe zu lösen, ist auf Du Boys zurückzuführen, der im Jahre 1879 ein Geschiebetriebgesetz von nachstehender Form aufstellte:

$$g = \chi\, S\,(S - S_0)\ ^{1)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

[1]) F. Kreuter: Der Flussbau. III. Teil. Handbuch der Ingenieurwissenschaften. Bd. 6. — Ph. Krapf: Die Schwemmstofführung des Rheins und anderer Gewässer.

Hierin bedeuten:

g den Geschiebetrieb, d. h. die pro Meter Flussbreite und pro Sekunde beförderte Geschiebemenge in kg/sec/m,

S die Schleppkraft, d. h. die der Strömungsrichtung parallele Komponente des Gewichts eines über der Sohlenfläche 1 anstehenden Wasserprismas, also

$$S = \gamma\, y\, J \text{ in kg/m}^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

γ das spezifische Gewicht des Wassers in kg/m³,

S_0 die Grenzschleppkraft, d. h. denjenigen Wert der Schleppkraft, für den die die Sohle bildenden Geschiebe gerade noch in Ruhe bleiben,

χ eine vom Geschiebedurchmesser abhängige, für diesen aber konstante Grösse, die die Dimension $kg^{-1}\ sec^{-1}\ m^3$ besitzt (Abfuhrziffer nach Kreuter).

Dieses Gesetz bildete jahrzehntelang die Grundlage für fast alle Untersuchungen über das Problem der Geschiebeführung. Engels bekämpfte es seit 1908, später wurde es von Schocklitsch bestätigt gefunden. Dieser hält aber neuerdings das Gesetz von Du Boys nicht mehr aufrecht und empfiehlt eine Formel, in der der Geschiebetrieb als Funktion der pro Meter Flussbreite abfliessenden Wassermenge, des Gefälles und eines massgebenden Korndurchmessers dargestellt ist.[2])

Die neueren Untersuchungen der Versuchsanstalt für Wasserbau an der E. T. H. zeigen aber, dass dem Begriff Schleppkraft nach der Definition von Du Boys (Gl. 2) überhaupt keine ausschlaggebende Bedeutung für die Geschiebeführung zukommt, denn bei einem bestimmten Wert von S finden bei verschiedenen Wassertiefen ganz verschiedene Geschiebetriebe statt.

Im Nachfolgenden soll nun das von der Versuchsanstalt aufgestellte neue Geschiebetriebgesetz[3]) zur Berechnung der Geschiebefracht eines Flusses verwendet werden. Es lautet:

$$\frac{q^{2/3}\, J}{d} = a + b\,\frac{g^{2/3}}{d} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Hierin bedeuten:

q die Wassermenge in kg/sec pro Meter Flussbreite,

g den Geschiebetrieb in kg/sec pro Meter Flussbreite, trocken gewogen,

J das Energieliniengefälle (gleich dem Sohlengefälle bei Normalabfluss),

d den „massgebenden" Durchmesser des Geschiebes,

a und b Konstante, die bei geometrisch ähnlichem Geschiebe nur von dessen spez. Gewicht abhängen. Für Geschiebe vom spez. Gewicht 2,6 und der Form natürlichen Flussgeschiebes wurden diese Konstanten zu $a = 17$, $b = 0{,}4$ bestimmt.

Seit der oben genannten Veröffentlichung angestellte Versuche haben gezeigt, dass die durch Gl. (3) gegebene Beziehung, die ursprünglich für Geschiebe von einheitlicher Korngrösse gefunden wurde, auch auf Geschiebegemische von 6 bis 40 mm Korngrösse anwendbar ist, wenn man als „massgebenden" Durchmesser denjenigen Wert aus der Mischungslinie herausnimmt, der von 35 Gewichtsprozenten des Gemisches unterschritten wird. Zur definitiven Ermittlung dieser Zahl für andere Gemische bedarf es noch weiterer Versuche, die zur Zeit im Gang sind.

2. *Anwendung auf den natürlichen Vorgang.* Der zur Aufstellung des Geschiebetriebgesetzes laut Gl. (3) verwendete Versuchskanal von 2 × 2 m Querschnitt und rund 55 m Länge stellt einen Längsstreifen eines natürlichen Flusses dar, in dem das Wasser parallel zu den Wandungen fliesst; man nennt das einen zweidimensionalen Abfluss. In der Natur beobachtet man infolge der Geschiebeführung einen komplizierteren Vorgang: die Konfiguration der Sohle ist gekennzeichnet durch die abwechselnd am linken bzw. rechten Ufer anliegenden Kiesbänke, die ihnen gegenüber liegenden Kolkrinnen und die Furten mit fast horizontaler Sohle und geringer Wassertiefe. Bei Niederwasser schlängelt sich das Wasser von einer Kolkrinne zur andern und auch bei Hochwasser, wo zwar der Verlauf der Strömung gestreckt ist, machen sich die verschiedenen Wassertiefen über den Bänken und in den Kolkrinnen bemerkbar. Wir haben einen dreidimensionalen Abfluss.

Die zu lösende Aufgabe besteht nun darin, zu untersuchen, ob es möglich ist, das für den zweidimensionalen Abfluss gefundene Geschiebetriebgesetz auf den dreidimensionalen Vorgang anzuwenden.

Zunächst muss hervorgehoben werden, dass es zur Zeit noch unmöglich ist, die Geschiebeführung in ihren Einzelheiten, gewissermassen für jeden Stein, zu verfolgen. Dazu sind die Gesetze der Hydrodynamik noch zu wenig erforscht. Es handelt sich um einen sog. statistischen Vorgang, der nur durch Mittelwerte ausgedrückt werden kann. Wir müssen auch darauf verzichten, den dreidimensionalen Vorgang unter Berücksichtigung der Erscheinungen auf den Kiesbänken, in den Kolken und den Furten einzeln zu verfolgen, schon deshalb, weil es nicht möglich ist, das Gefälle von Stelle zu Stelle zu differenzieren. Infolge der dünenförmigen Bewegung des Kieses, namentlich aber in den Kiesbänken, finden zeitweise Retentionen des Geschiebes statt, sodass die Bewegung deutliche Pulsationen aufweist. Bei zeitlicher Veränderung der Wassermenge treten Translationswellen auf, die das Gefälle zeitlich variieren lassen.

Was also zur Zeit einzig in Frage kommt, ist ein Mittelwert der pro Zeiteinheit bei einer bestimmten Wassermenge beförderten Geschiebemenge. Die Abhängigkeit dieses Mittelwertes von der Wassermenge bezeichnen wir als *Geschiebefunktion.*

3. *Voraussetzungen der Berechnung.* Folgende Voraussetzungen der Berechnung müssen erfüllt sein:

a) Das Vorhandensein einer Flusstrecke von 1 bis 3 km Länge im Gleichgewichtszustand (Musterstrecke),

b) eine topographische Aufnahme des Flussbettes, etwa durch eine grössere Anzahl von Querprofilen,

c) das daraus sich ergebende Gefälle der „ausgeglichenen" Sohle; diese ist definiert durch die Ausgleichgerade der mittleren Sohlenlage aller Querprofile,

d) die Lage des Wasserspiegels bezüglich der ausgeglichenen Sohle und in Abhängigkeit von der Wasserführung; die Wasserspiegel sind parallel zur ausgeglichenen Sohle,

e) die Dauerkurve der Wasserführung für eine Anzahl von Jahren, sowie deren Mittel.

f) die Mischungslinie des transportierten Geschiebes, als Mittel einer Anzahl von Analysen.

4. *„Massgebender Querschnitt".* Zur Bestimmung der Geschiebefunktion im Sinne der oben gegebenen Definition ist es nun erforderlich, die gegebene Musterstrecke durch ein einziges Querprofil darzustellen, das die Konfiguration der Flussohle möglichst gut zum Ausdruck bringt; wir nennen diesen Querschnitt den „massgebenden". In den Kolken, wo eine grosse Wassermenge auf eine schmale Rinne zusammengedrängt ist, ist bei kleineren Wasserständen, die die Kiesbänke noch nicht überfluten, ein verhältnismässig lebhafter Geschiebetrieb vorhanden. Bei höheren Wasserständen beginnt ein kräftiger Geschiebetrieb auf den Kiesbänken, trotz kleiner Wassertiefe, voraussichtlich wegen örtlich grossen Gefälles. In den anschliessenden Kolkrinnen dagegen kommt der Geschiebetrieb am untern Kiesbankende zunächst zum Stillstand (Wasserwalze) und erst allmählig tritt wieder eine neue Sättigung mit Geschiebe ein. In den Furten ist zwar das Gefälle bei kleinen Wasserständen gross, aber die pro Meter Flussbreite durchfliessende Wassermenge wegen der grossen Breite klein. Bei hohen Wasserständen nimmt das Gefälle über den Furten wieder ab. Der „massgebende" Querschnitt soll einen Mittelwert der Geschiebefunktion liefern, er muss deshalb die Form der Kolke, Kiesbänke und Furten im Mittel zur Darstellung bringen.

[2]) A. Schoklitsch: „Der Geschiebetrieb und die Geschiebefracht". „Wasserkraft und Wasserwirtschaft", München, 16. Febr. 1934.

[3]) E. Meyer-Peter, H. Favre und A. Einstein: „Neuere Versuchsresultate über den Geschiebetrieb". „Schweiz. Bauzeitung", 31. März 1934 (Bd. 103, S. 147*).

Es ist mithin ausgeschlossen, als massgebendes Profil etwa das Trapezprofil zu wählen, das durch Einzeichnung der sogenannten ausgeglichenen Sohle in das durch die Wuhrungen bestimmte Normalprofil erhalten wird. Wir wählen vielmehr die hypsographische Kurve der Sohlenkonfiguration der ganzen Mustertrecke zwischen den Wuhren. Sie gibt an, welcher Anteil der Horizontalprojektion der Sohle über, bzw. unter einem zur ausgeglichenen Sohle parallelen Horizont liegt. Sie ist die Summenlinie der Teilflächen zwischen zwei Höhenkurven der Sohle, die parallel zu diesem geneigten Horizont gelegt werden, wobei zur Erreichung jeder wünschbaren Genauigkeit beliebig kleine Höhenstufen gewählt werden können. Abb. 2 zeigt das Schema eines solchen Querschnittes für eine Musterstrecke mit Doppelprofil. Die Auswertung zahlreicher Flussprofile und Modellprofile hat ergeben, dass das Quergefälle des massgebenden Querschnittes in guter Annäherung durch zwei oder drei Gerade dargestellt werden kann.

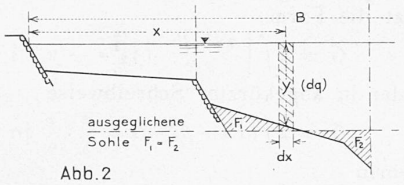

Abb. 2

5. *Die Geschwindigkeitsverteilung im massgebenden Querschnitt.* Bei gewöhnlichen hydraulischen Aufgaben ist es ausreichend, mit dem Mittelwert der Geschwindigkeit zu rechnen, das Manning-Strickler'sche Gesetz gibt hierfür bekanntlich die Beziehung

$$v_m = k_m J^{1/2} R^{2/3} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Vorstudien haben aber gezeigt, dass bei Einführung des Wertes v_m die Geschiebemenge nicht annähernd richtig erfasst wird. Wir sind gezwungen, den benetzten Querschnitt in vertikale Lamellen einzuteilen. Für eine solche ist, unter ausdrücklicher Vernachlässigung der Trennflächen im Wasser als Teil des benetzten Umfanges[4]), der Profilradius gleich der Wassertiefe, und es ergibt sich für die mittlere Geschwindigkeit in einer solchen Lamelle die Formel

$$v_y = k J^{1/2} y^{2/3} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

(siehe Abb. 2). Bei einer Breite dx der Lamelle ist der Durchfluss

$$dq = k J^{1/2} y^{5/3} dx \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

und der Gesamtdurchfluss durch eine Lamelle von endlicher Breite B bei konstant angenommenem Gefälle und durchgehend gleicher Rauhigkeit für den ganzen Querschnitt

$$Q = k J^{1/2} \int_0^B y^{5/3} dx \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

Es ist klar, dass der neue k-Wert anders definiert ist, als der frühere Mittelwert k_m, jedoch kann er aus den üblichen Beobachtungen (Wassermenge, Tiefe, Profilform, Gefälle) ebensogut ermittelt werden wie dieser. Bei breiten Flüssen unterscheiden sich beide Werte nicht voneinander. Gleichung (7) und die folgenden Gleichungen lassen sich auch für den Fall umformen, dass der Querschnitt aus mehreren Teilen mit verschiedenen k-Werten besteht, von denen diejenigen für das Vorland und die Wuhrpflästerung bekannt sind. Der Einfachheit halber sind die nachstehenden Ableitungen mit konstantem k-Wert durchgeführt.

6. *Ausdruck für die Wassermenge im massgebenden Querschnitt.* Aus Gründen, die erst später auseinandergesetzt werden können, hat es sich als notwendig erwiesen, das massgebende Profil, statt aus einzelnen Geraden, aus Kurvenstücken von der Form (siehe Abb. 3)

$$y = \varphi x^{9/10} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

zusammengesetzt zu denken. Die Kurven weichen im praktischen Bereich ihrer Anwendung nur unmerklich von den Geraden ab.

[4]) A. Einstein: „Der hydraulische oder Profilradius". „Schweiz. Bauzeitung" vom 24. Februar 1934 (Bd. 103, S. 89).

a) *Massgebender Querschnitt bestehend aus zwei symmetrischen trapezähnlichen Flächen.* Gemäss Abb. 3 ergibt sich:

$$y_1 = \varphi x_1^{9/10}$$

$$y_2 = \varphi \left(x_1 + \frac{B}{2}\right)^{9/10} \text{ und damit } y_2 = \varphi \left[\left(\frac{y_1}{\varphi}\right)^{10/9} + \frac{B}{2}\right]^{9/10}$$

weiter wird:

$$x_1 = \frac{y_1^{10/9}}{y_2^{10/9} - y_1^{10/9}} \frac{B}{2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

Als Gleichung der Begrenzungslinie wird gefunden

$$y = (y_2^{10/9} - y_1^{10/9})^{9/10} \left(\frac{2}{B}\right)^{9/10} x^{9/10} \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

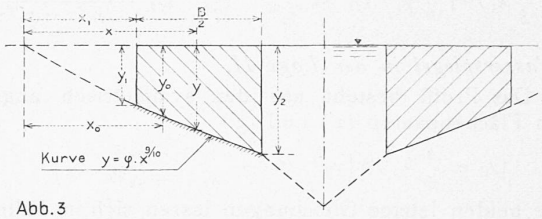

Abb. 3

Unter Berücksichtigung der Gleichung (6) erhält man für die durchfliessende Wassermenge pro Meter Flussbreite und für irgend eine Lamelle mit Abszisse x:

$$q_y = k J^{1/2} \left(\frac{2}{B}\right)^{3/2} (y_2^{10/9} - y_1^{10/9})^{3/2} x^{3/2} \quad . \quad (11)$$

und damit die Gesamtwassermenge in den beiden Flächen

$$Q = 2 \int_{x_1}^{x_1 + \frac{B}{2}} q_y \, dx \quad \text{oder}$$

$$Q = \frac{2}{5} k J^{1/2} \frac{y_2^{25/9} - y_1^{25/9}}{y_2^{10/9} - y_1^{10/9}} B \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

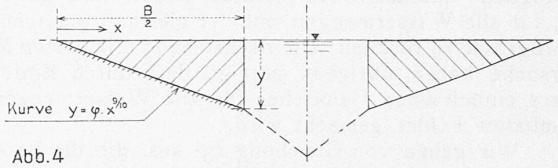

Abb. 4

b) *Massgebender Querschnitt bestehend aus zwei symmetrischen dreieckähnlichen Flächen.* Gemäss Abb. 4 erhält man aus Gleichung (12) ohne weiteres, da $y_1 = 0$ $y_2 = y$

$$Q = \frac{2}{5} k J^{1/2} y^{5/3} B \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

c) *Massgebender Querschnitt bestehend aus zwei symmetrischen rechteckähnlichen Flächen.* Die Gleichung (12) geht für $y_2 = y_1 = y$ in die Formel für zwei rechteckähnliche Flächen über. Die genaue Bestimmung des Grenzwertes zeigt, dass man einfach die Manning-Strickler'sche Formel erhält $Q = k J^{1/2} y^{5/3} B$

d) *Bemerkung zu den Formeln (12) und (13).* Vergleichsweise sei noch angeführt, dass bei Annahme geradlinig verlaufender Umgrenzungslinie der Sohle sich weiter ergeben würde:

Für das doppelte Trapezprofil

$$Q' = \frac{3}{8} k J^{1/2} \frac{y_2^{8/3} - y_1^{8/3}}{y_2 - y_1} B \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12a)$$

und für das doppelte Dreieckprofil

$$Q' = \frac{3}{8} k J^{1/2} y^{5/3} B \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13a)$$

Die Abweichungen der Werte nach Gleichung (13) und (13a) betragen 6 %, beim Rechteck ist sie Null und beim Trapez, das meistens in Betracht kommt, von der Ordnung von 1 %, weil, sobald $y_1 \neq 0$ ist, derjenige Teil der Kurve $y = \varphi x^{9/10}$, der den Fehler verursacht, ausserhalb der für die Rechnung in Betracht kommenden Figur fällt (siehe Abb. 3).

e) *Massgebender Querschnitt gemäss Abbildung 5* (S. 98).

Wir haben zwei Fälle zu unterscheiden:

1. *Wasserspiegel in der Lage I.*

Das Profil besteht in symmetrischer Anordnung aus den Dreiecken (1) und den Trapezen oder trapezähnlichen Flächen (2) und (3).

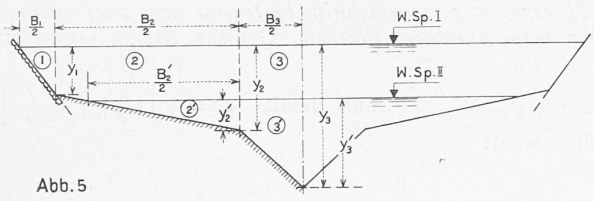

Abb. 5

Durch Kombination der Formeln (13a) und (12) ergibt sich:

$$Q_{\mathrm{I}} = \frac{2}{5} k_{\mathrm{I}} J^{1/2} \left(\frac{15}{16} y_1^{5/3} B_1 + \frac{y_2^{25/9} - y_1^{25/9}}{y_2^{10/9} - y_1^{10/9}} B_2 + \frac{y_3^{25/9} - y_2^{25/9}}{y_3^{10/9} - y_2^{10/9}} B_3 \right) \tag{14}$$

2. *Wasserspiegel in der Lage II.*

Das Profil besteht aus den symmetrisch angeordneten Flächenpaaren (2′) und (3′)

$$Q_{\mathrm{II}} = \frac{2}{5} k_{\mathrm{II}} J^{1/2} \left(y_2'^{5/3} B_2' + \frac{y_3'^{25/9} - y_2'^{25/9}}{y_3'^{10/9} - y_2'^{10/9}} B_3 \right) \quad . \quad . \tag{15}$$

Diese beiden letzten Gleichungen lassen sich im Falle von gemessenen Werten von Q_{I} und Q_{II} nach k_{I} bzw. k_{II} auflösen.

7. *Berechnung der Geschiebemenge im massgebenden Querschnitt in Funktion der Wassermenge.* Wie aus Gleichung (3) und dem unter (I) Gesagten hervorgeht, ist für den Geschiebetrieb der massgebende Korndurchmesser von grossem Einfluss. Bei einem bestimmten vorliegenden Sohlenmaterial ist die Ansicht naheliegend, dass jeder Wassermenge nicht nur eine bestimmte Geschiebemenge, sondern auch eine bestimmte Kornzusammensetzung entspricht. Wenn dies zutreffen sollte, so hätte man bei jeder Wassermenge einen andern massgebenden Korndurchmesser einzusetzen. Es fehlen aber zur Zeit hierüber noch genügende qualitative Aufschlüsse, sodass man gezwungen ist, für alle Wassermengen mit der gleichen massgebenden Korngrösse zu rechnen. Die nachstehend erläuterten Modellversuche haben übrigens gezeigt, dass durch Einführung eines einheitlichen Gemisches für alle Wassermengen kein namhafter Fehler gemacht wird.

Wir gehen von Gleichung (3) aus, die die Beziehung zwischen Geschiebetrieb und Wassermenge, beide bezogen auf einen Meter Flussbreite, angibt. Die gesamte Geschiebemenge für den massgebenden Querschnitt wird demnach

$$G = \int g \, dx \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \tag{16}$$

wobei die Integration über jene Breite zu erstrecken ist, für die, gemäss Gleichung (3), noch positive Werte von g erhalten werden. Drücken wir aus (3) die Grösse g aus, so wird:

$$G = \int \left[\frac{q^{2/3} J}{b} - \frac{a\,d}{b} \right]^{3/2} dx \quad . \quad . \quad . \quad . \tag{17}$$

Der massgebende Querschnitt ist wieder in seine Abschnitte zu unterteilen, wie bei der Berechnung der Wassermengen. Dabei ist aber zu beachten, dass der Geschiebetrieb nicht unbedingt auf der ganzen Profilbreite stattfindet.

a) *Massgebender Querschnitt bestehend aus zwei symmetrischen trapezähnlichen Flächen (Abb. 3).* Wir berechnen nun zunächst g aus Gleichung (3) und setzen in den erhaltenen Ausdruck den Wert für q_y gemäss Gleichung (11) ein:

$$g = \left[\frac{2\, k^{2/3} J^{4/3}}{b\, B} \left(y_2^{10/9} - y_1^{10/9} \right) x - \frac{a\,d}{b} \right]^{3/2} \quad . \quad . \tag{18}$$

Für das symmetrische Profil wird dann:

$$G = 2 \int_{x_0}^{x_1 + \frac{B}{2}} g \, dx \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \tag{19}$$

Hierin ist x_0 die Abszisse desjenigen Profilpunktes, für den die Tiefe y_0 gerade den Geschiebetrieb Null zur Folge hat. Wir müssen deshalb nachstehend zwei Fälle unterscheiden, je nachdem x_0 grösser oder kleiner als x_1 ist.

Im Fall $x_0 > x_1$ herrscht Geschiebebewegung nur auf einem Teil der Breite der Lamelle.

Im Fall $x_0 < x_1$ ist Bewegung auf der ganzen Lamellenbreite vorhanden.

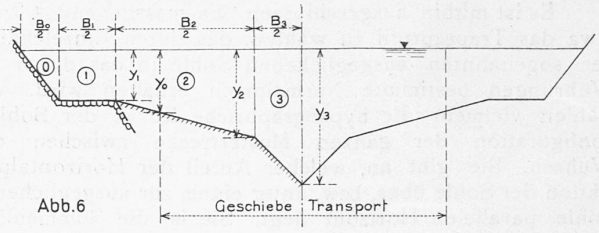

Abb. 6

Die Behandlung beider Fälle ist nur in Bezug auf die Integrationsgrenzen verschieden. Das zu lösende Integral hat die Form:

$$G = 2 \int \left[\frac{2\, k^{2/3} J^{4/3}}{b\, B} \left(y_2^{10/9} - y_1^{10/9} \right) x - \frac{a\,d}{b} \right]^{3/2} dx \quad . \tag{20}$$

oder in abgekürzter Schreibweise

$$G = 2 \int (\alpha\, x - \beta)^{3/2} dx = \frac{2}{5} \cdot \frac{2}{\alpha} \left| [\alpha\, x - \beta]^{5/2} \right|_{\text{Grenzen}} \tag{21}$$

worin

$$\alpha = \frac{2\, k^{2/3} J^{4/3}}{b\, B} \left(y_2^{10/9} - y_1^{10/9} \right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \tag{22}$$

$$\beta = \frac{a\,d}{b} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \tag{23}$$

α) *Geschiebetrieb nur auf einem Teil der Breite.* Die Integrationsgrenzen sind x_0 und $x_1 + \frac{B}{2}$

x_1 ist gemäss Gl. (9) bekannt, wir haben also nur noch x_0 zu bestimmen, was aus Gl. (3) erfolgt, wobei $g = 0$ zu setzen ist. Dies ergibt zunächst für die Grenzwassermenge

$$q_0 = \left(\frac{a\,d}{J} \right)^{3/2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \tag{24}$$

Wir können nun in Gleichung (11) für $q_y = q_0$ und für $x = x_0$ einsetzen und erhalten durch Auflösung nach x_0:

$$x_0 = \frac{a\,d}{J} \frac{B}{2} \frac{1}{k^{2/3} J^{1/3} \left(y_2^{10/9} - y_1^{10/9} \right)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \tag{25}$$

Schliesslich setzen wir in Gleichung (21) die Werte für α und β nach Gleichung (22) und (23) ein. Die obere Integrationsgrenze ist $x_1 + \frac{B}{2}$, worin x_1 nach Gl. (9) eingesetzt wird, die untere Grenze ist x_0 gemäss Gl. (25). Dies ergibt:

$$G = \frac{2}{5} \frac{\left(k^{2/3} J^{4/3} y_2^{10/9} - a\,d \right)^{5/2}}{k^{2/3} J^{4/3} b^{3/2} \; y_2^{10/9} - y_1^{10/9}} B \quad . \quad . \quad . \quad . \tag{26}$$

β) *Geschiebetrieb auf der ganzen Breite.* Die obere Grenze ist $x_1 + \frac{B}{2}$, die untere x_1.

In analoger Weise wie oben ergibt sich die Geschiebemenge zu

$$G = \frac{2}{5} \frac{\left(k^{2/3} J^{4/3} y_2^{10/9} - a\,d \right)^{5/2} - \left(k^{2/3} J^{4/3} y_1^{10/9} - a\,d \right)^{5/2}}{k^{2/3} J^{4/3} b^{3/2} \left(y_2^{10/9} - y_1^{10/9} \right)} B \tag{27}$$

b) *Massgebender Querschnitt bestehend aus zwei symmetrischen dreieckförmigen Flächen.* Setzt man in Gleichung (26) $y_1 = 0$ und $y_2 = y$, so ergibt sich ohne weiteres

$$G = \frac{2}{5} \frac{\left(k^{2/3} J^{4/3} y^{10/9} - a\,d \right)^{5/2}}{k^{2/3} J^{4/3} b^{3/2} y^{10/9}} B \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \tag{28}$$

c) *Grenztiefe für den Geschiebetrieb.* Es sei für $y = y_0 : g = 0$ und die zugehörige Wassermenge sei q_0.

Damit ergibt sich aus den Gleichungen (6) und (24)

$$q_0 = k\, J^{1/2} y_0^{5/3} = \left(\frac{a\,d}{J} \right)^{3/2}$$

woraus

$$y_0 = \frac{1}{k^{3/5}} \frac{(a\,d)^{9/10}}{J^{6/5}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \tag{29}$$

d) *Massgebender Querschnitt bestehend aus zwei symmetrischen Rechtecken.* Es ist

$$q = k\, y^{5/3} J^{1/2}$$

aus Gleichung (3) folgt

$$g = \left(\frac{q^{2/3} J}{b} - \frac{a\,d}{b} \right)^{3/2}$$

und durch die Kombination dieser Ausdrücke

$$g = \left(\frac{k^{2/3} J^{4/3}}{b} y^{10/9} - \frac{a\,d}{b} \right)^{3/2}$$

$$G = 2 \int_0^{\frac{B}{2}} g \, dx = \left(k^{2/3} J^{4/3} y^{10/9} - a\,d \right)^{3/2} \frac{B}{b^{3/2}} \quad . \tag{30}$$

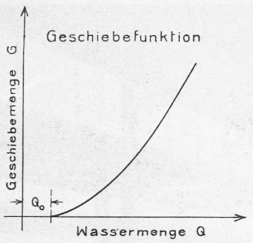

Abb.7

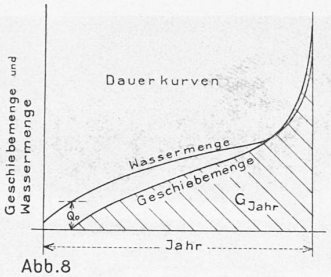

Abb.8

e) *Begründung der Wahl der Funktion:*

$$y = \varphi\, x^{9/10} = (y_2^{10/9} - y_1^{10/9})^{9/10} \left(\frac{2}{B}\right)^{9/10} x^{9/10} \qquad (10)$$

Auf den ersten Blick erschiene es als einfacher, die Begrenzung des Profils als aus einzelnen Geraden zusammengesetzt zu denken. Diese Geraden würden durch die Gleichung

$$y = \frac{2\,(y_2 - y_1)}{B}\, x \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (31)$$

dargestellt. Damit würde der Ausdruck für q:

$$q = k\, J^{1/2} \left[\frac{2\,(y_2 - y_1)}{B}\, x\right]^{5/3} \quad . \quad . \quad . \qquad (32)$$

und für g:

$$g = \left[\frac{k^{2/3} J^{4/3}}{b} \left(\frac{2\,(y_2 - y_1)}{B}\, x\right)^{10/9} - \frac{a\,d}{b}\right]^{3/2} \quad . \qquad (33)$$

$$G = 2 \int g\, dx = 2 \int [\alpha\, x^{10/9} - \beta]^{3/2}\, dx \quad . \qquad (34)$$

(in abgekürzter Schreibweise).

Dieses Integral ist mit den gewöhnlichen Methoden nicht lösbar.[5]) Demgegenüber führte die Annahme einer leicht gekrümmten, von der Geraden sehr wenig abweichenden Umrisslinie zu der durch Gleichung (21) gegebenen, leicht lösbaren Form

$$G = 2 \int (\alpha\, x - \beta)^{3/2}\, dx$$

f) *Zusammenstellung der bisherigen Ergebnisse, unter Anwendung auf ein komplizierteres Profil.* In Abbildung 6 ist der massgebende Querschnitt, wie er einem korrigierten Fluss entspricht, dargestellt. In den Profilteilen (0) und (1) kann wegen der durch die Pflästerung, bzw. den Steinwurf (Vorgrund) befestigten Sohle kein Geschiebetrieb stattfinden. Wir haben also nur die Abschnitte (2) und (3) zu berücksichtigen. Zunächst ist zu untersuchen, ob die Grenzwassertiefe y_0 grösser oder kleiner ist als die vorhandenen Tiefen.

Es werden zwei Fälle unterschieden:

Fall. I. $\qquad y_2 > y_1 > y_0$

Dann findet Geschiebebewegung statt auf dem ganzen mittleren Abschnitt bis y_1. Die totale Geschiebeführung im Querschnitt wird dann, gemäss der Gleichung (27):

$$G_{tot} = \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{2}{5}\, \dfrac{(k_I^{2/3} J^{4/3} y_2^{10/9} - a\,d)^{5/2} - (k_I^{2/3} J^{4/3} y_1^{10/9} - a\,d)^{5/2}}{k_I^{2/3} J^{4/3} b^{3/2} (y_2^{10/9} - y_1^{10/9})}\, B_2 \\ + \dfrac{2}{5}\, \dfrac{(k_I^{2/3} J^{4/3} y_3^{10/9} - a\,d)^{5/2} - (k_I^{2/3} J^{4/3} y_2^{10/9} - a\,d)^{5/2}}{k_I^{2/3} J^{4/3} b^{3/2} (y_3^{10/9} - y_2^{10/9})}\, B_3 \end{array} \right. \qquad (35)$$

Fall II. $\qquad y_1 < y_0 < y_2$

Der Geschiebetrieb findet statt auf der ganzen Breite des Abschnittes (3) und auf einem Teil des Abschnittes (2). Auf Grund der Gleichung (28) und (27) ergibt sich:

$$G_{tot} = \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{2}{5}\, \dfrac{(k_{II}^{2/3} J^{4/3} y_2^{10/9} - a\,d)^{5/2}}{k_{II}^{2/3} J^{4/3} b^{3/2} (y_2^{10/9} - y_1^{10/9})}\, B_2 \\ + \dfrac{2}{5}\, \dfrac{(k_{II}^{2/3} J^{4/3} y_3^{10/9} - a\,d)^{5/2} - (k_{II}^{2/3} J^{4/3} y_2^{10/9} - a\,d)^{5/2}}{k_{II}^{2/3} J^{4/3} b^{3/2} (y_3^{10/9} - y_2^{10/9})}\, B_3 \end{array} \right. \qquad (36)$$

8. *Berechnung der jährlichen Geschiebefracht.* Nachdem es nun möglich ist, für jede Wassermenge die zugehörige Geschiebemenge anzugeben (Abb. 7), ist der letzte Schritt zur Berechnung der jährlichen Geschiebefracht ohne weiteres gegeben. Es ist nämlich, wenn mit t die Zeit bezeichnet wird:

$$G_{Jahr} = \int_{Jahr} G\, dt \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (37)$$

[5]) Siehe „Tchebycheff: Journal de Liouville" 1853, S. 108 und „Cours d'analyse de Jordan", Tome 2, page 15, Gauthier Villars, 1913.

Am einfachsten gestaltet sich die Berechnung an Hand der mittleren Dauerkurve der Wassermengen (Abb. 8), deren Kombination mit der Geschiebefunktion (Abb. 7) ohne weiteres die Dauerkurve der Geschiebemenge liefert. Der Inhalt der schraffierten Fläche entspricht der gesuchten mittleren jährlichen Geschiebefracht. Wenn es von Interesse ist, die Geschiebefracht für ein bestimmtes Jahr zu kennen, ist die gleiche Konstruktion an Hand der Dauerkurve der Wassermengen des betreffenden Jahres durchzuführen.

(Schluss folgt.)

Ergebnisse des Zürcher Kantonsspital-Wettbewerbes.

(Schluss von Seite 90.)

III. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICKE.

Nach mehrwöchentlichem, eingehendem Studium der Entwürfe stellte das Preisgericht anerkennend fest, dass die beurteilten 82 Arbeiten einen beachtenswerten Qualitätsdurchschnitt aufweisen, der umso höher einzuschätzen ist, als die gestellte Bauaufgabe für die Architektenschaft ein Novum darstellte, das ein weitgehendes Spezialstudium voraussetzte und zu dem weder innoch ausländische Beispiele gleicher Grösse zum Vergleich herangezogen werden konnten. Besonders stark tritt die ursprüngliche, schöpferische Kraft in der klaren Fassung des Betriebsorganismus hervor.

Die Gestaltung der Baukörper, der Rhythmus der Bauten und ihre Haltung zeigen, dass es einzelnen Verfassern gelungen ist, das schwierige Problem darüber hinausgehend zu architektonischer Grösse zu formen. Wenn der Wettbewerb trotzdem keinen Entwurf gezeitigt hat, der ohne weitere Umarbeitung und ohne Berücksichtigung der in den übrigen Entwürfen enthaltenen Vorzüge als Grundlage für die Ausführung betrachtet werden kann, so liegt dies grösstenteils im Wesen des etwas starren Systems dieses aussergewöhnlichen Wettbewerbes begründet, indem ein fruchtbarer Meinungsaustausch zwischen Programmverfassern und Bewerbern durch die im Wettbewerb bedingte Neutralität unterbleiben musste.

Trotzdem in der durch Preise und Ankäufe ausgezeichneten Projektgruppe schon hervorragende Lösungen bezüglich der Gesamtorganisation, der Geländeauswertung und der Detailbearbeitung enthalten sind, lässt die Gegenüberstellung der einzelnen Systeme und die Untersuchung ihrer Auswirkungen in Bezug auf Baukosten und betriebstechnische Lösung keinem derselben eine namhafte Ueberlegenheit zusprechen. Welchem Bausystem schliesslich der Vorzug gegeben werden kann, wird nicht ohne nochmaliges eingehendes Detailstudium und damit verbundene Betriebs- und Wirtschaftsberechnungen ermittelt werden können. Es empfiehlt sich daher, eine vergleichende, planliche und rechnerische Untersuchung der aus dem Wettbewerb hervorgegangenen Bausysteme vorzunehmen und in Verbindung mit dem Studium ausländischer Grosskrankenhäuser und Grosskrankenhausprojekte durchzuführen.

Die aus dem Wettbewerb hervorgegangenen lebendigen Ideen sollten wach gehalten werden. Durch reine schöpferische Arbeit ist nicht nur die Möglichkeit einer klaren Gesamtdisposition und die Lösung wichtiger Einzelheiten gewiesen; sie legt auch die Schwierigkeiten bloss, die aus den programmatischen Forderungen resultierten. Das Programm war vielleicht vorerst mehr ein Wunschprogramm der einzelnen Abteilungsleiter, bei dem die ärztlichen und verwaltungstechnischen Belange wohl durchberaten, die Gesamtforderungen schliesslich straff organisiert, textlich und graphisch vereinfacht zur Ausschreibung gebracht wurden. Das Bauprogramm für die Ausführung wird aber nicht auf das nochmalige eingehende Vorstudium aller Einzelfragen verzichten können, wenn Bau und Betrieb als funktionelles Ganzes erstehen sollen. Die Folgerungen aus dem Ergebnis dieses Wettbewerbes, die vielen Fragen, die Abwägung der Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme müssen zwangsläufig zu einem stark revidierten Bauprogramm führen. Soll aber das starre System des offenen Wettbewerbes in fördernde Zusammenarbeit übergeleitet werden, so ist die Mitwirkung der Planverfasser bei dem Studium der einzelnen Abteilungen notwendig. Seit der Bewilligung der Kosten für den Wettbewerb haben sich die finanziellen Verhältnisse des Kantons nicht gebessert. Es braucht blinden Optimismus, um für die nächsten Jahre eine Prosperität vorauszusehen, und so steht in dem Problem der Verwirklichung des Kantonsspitals die wirtschaftliche Frage allen anderen voran. Schon aus diesem Grund wird eine gründliche Programmrevision erforderlich sein. Durch Vorschlag, Kritik und Gegenvorschlag wird schliesslich eine Fassung der