

Hochwasser-Entlastungsstollen Würzenbach Luzern: technischer Beschrieb und hydraulische Probleme

Autor(en): **Desserich, Marcel**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **98 (1980)**

Heft 35

PDF erstellt am: **22.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74169>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Hochwasser-Entlastungsstollen Würzenbach Luzern

Technischer Beschrieb und hydraulische Probleme

Von Marcel Desserich, Luzern

Als geeignetste Lösung zur Sanierung der ungenügenden Abflussverhältnisse des Würzenbaches erwies sich eine Direktableitung der Hochwasser von 27,2 m³/s in den See durch einen Entlastungsstollen mit 3,08 m Durchmesser, einer Länge von 1460 m und einem Gefälle von 11,75 ‰. Die zufließenden Büttenebäche werden ebenfalls über Wirbelfallschächte von 15 m und 30 m Höhe gefasst. Im Auslaufbauwerk werden die kinetischen Energien in einem Tosbecken verwandelt, bevor das Wasser durch Dükerleitungen unter der Seestrasse in den Vierwaldstättersee abgeleitet wird. Der beschriebene Hochwasser-Entlastungsstollen beseitigt eine ehemals latente Bedrohung des Würzenbachquartiers in Luzern. Er verkörpert ein zeitgemässes Beispiel des Umweltschutzes auf dem Gebiete des Wasserbaues.

Die ungenügenden Abflussverhältnisse des Würzenbaches führten in den vergangenen Jahren häufig zu Überschwemmungen und Schäden. Zur Sanierung wurden drei typische Varianten untersucht:

- Ausbau des bestehenden Gerinnes für ein 100jähriges Hochwasser,
- Rückhaltebecken zur Speicherung der Hochwasser vor dem Überschwemmungsgebiet,
- Entlastungsableitung direkt in den See.

Die erste Lösung einer Gerinnekorrektur verbunden mit der Forderung einer Erhöhung des Abflussvermögens von 10 m³/s auf das 100jährige Hochwasser von etwa 30 m³/s konnte aus Naturschutzgründen, d.h. ohne gravierende Eingriffe in die Uferpartien, nicht ausgeführt werden.

Die zweite Lösung einer Retention der Hochwasser hätte ein relativ grosses Speichervolumen mit kostspieligem Stauwehr- oder Erddammabschluss bedingt. Zudem hätte nicht das ganze Einzugsgebiet, ohne das der noch unterhalb der Sperre zufließenden Büttenebäche, erfasst werden können.

Als geeignetste Lösung drängte sich in diesem Fall eine Direktableitung der Hochwasser mittels Entlastungsstollen in den See auf, verbunden mit der Auflage einer Trockenwetterableitung durch den bestehenden Würzenbach und einer Retentionsmöglichkeit des Geschiebes in einem als Kiesfang wirkenden Rückhaltebecken oberhalb des Verzweigungsbauwerkes.

Die Übersicht über die gegebenen Verhältnisse und das Projekt des Hochwasser-

entlastungsstollens sind aus der Situation (Bild 1) und dem Längsprofil (Bild 2) ersichtlich.

Besonderen Dank gebührt an dieser Stelle den Herren des Tiefbauamtes der

Stadt Luzern für die kooperative Zusammenarbeit, insbesondere Herrn Stadttingenieur Albert Gassmann, dem die örtliche Bauleitung oblag.

Wassermengen

Das Abflussregime des Würzenbaches musste geschätzt werden, da keine Messreihen der Pegelstände zur Verfügung standen. Für die Ermittlung des Hochwasserabflusses wurden zwei grundsätzliche Methoden der Flussbau-Praxis angewandt. Einerseits geben empirische Formeln wie die von Kürsteiner [1] brauchbare Ergebnisse. Andererseits sollen diese Abflussformeln mit weiteren Bestimmungsmethoden, wie z.B. mit der in den letzten Jahren weiterentwickelten mathematischen Niederschlag/Abflussmodell-Methode [2,22] oder dem bisher bekanntesten Fließzeitverfahren [3,4] verglichen werden.

Formel von Kürsteiner [1]:

$$Q_{max} = HHQ = C \cdot E^{2/3}$$

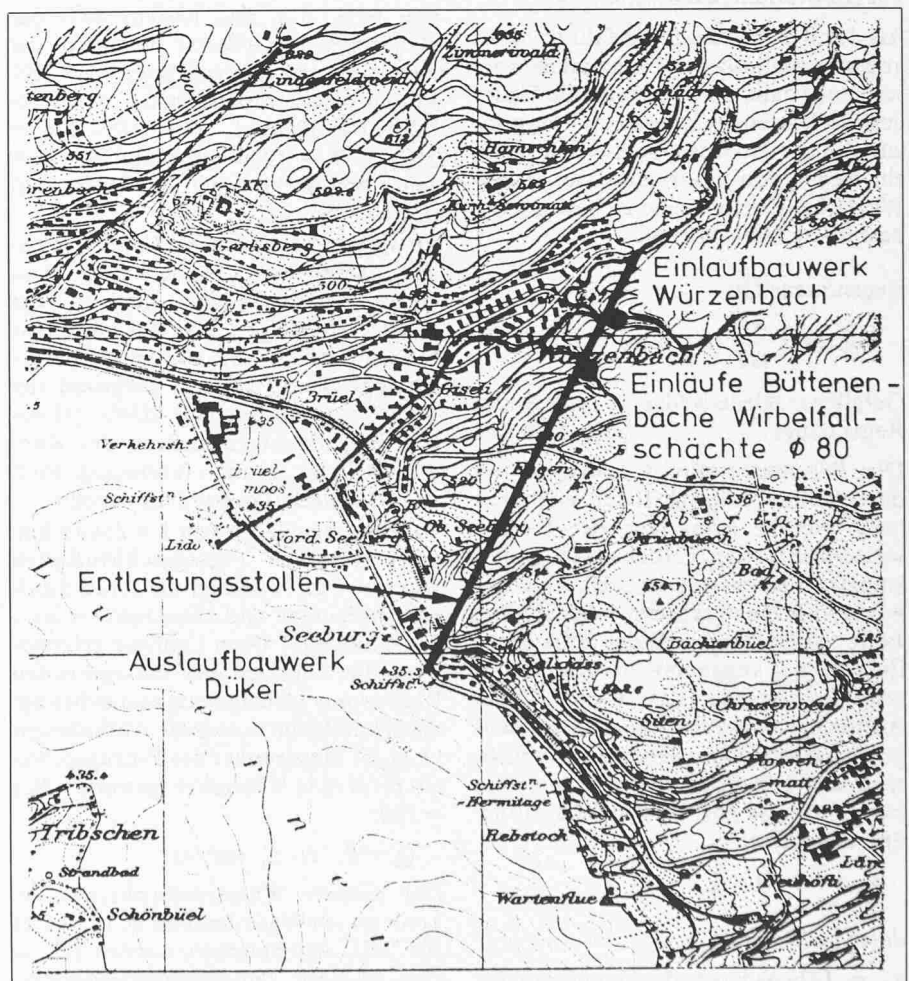


Bild 1. Situation Hochwasser-Entlastungsstollen Würzenbach Luzern

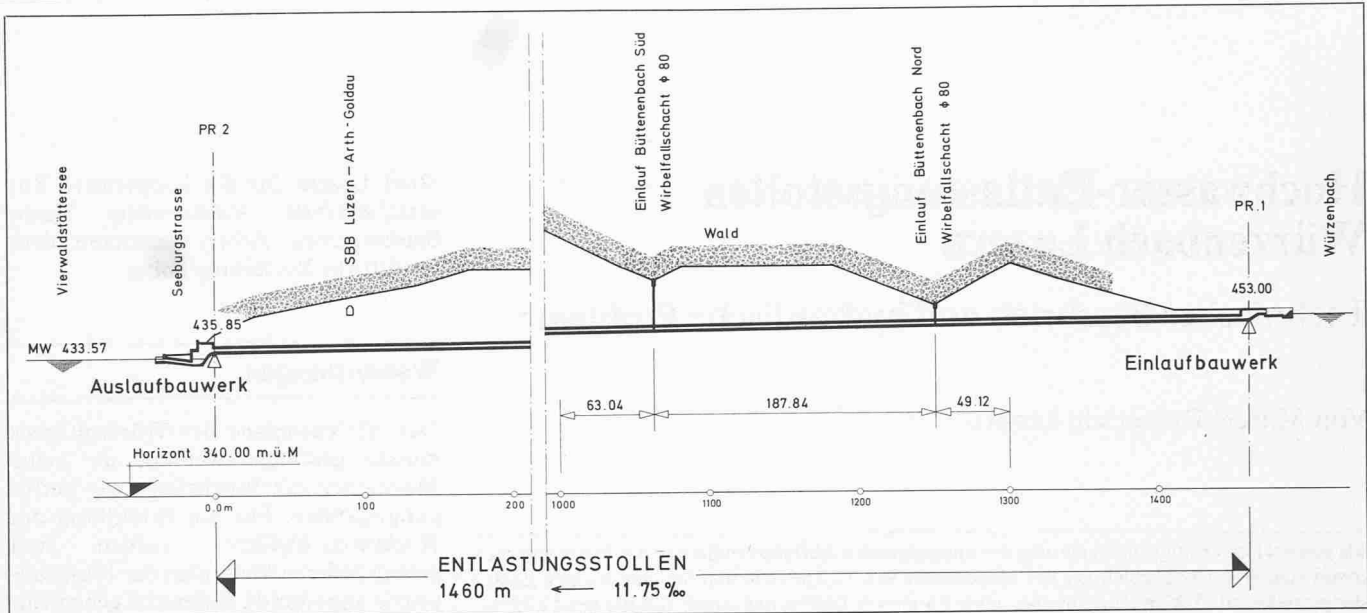


Bild 2. Längsprofil des Entlastungsstollens

Mit einer Einzugsgebietsfläche E des Würzenbaches (inkl. Büttenenbäche) von 9,4 ha und dem empirisch ermittelten Wert der Konstanten $C = 6-9$ für voralpine Gegenden, ergeben sich folgende Werte des Hochwasserabflusses:

$$Q_{\max} = 4,45 \cdot C \text{ (m}^3/\text{s)}$$

für $C = 6: Q_{\max} = 26,7 \text{ m}^3/\text{s}$
 für $C = 9: Q_{\max} = 40,1 \text{ m}^3/\text{s}$

Fliesszeitverfahren nach Imhof[4]:

Als Hypothese dieses Verfahrens wird angenommen, dass die maximale Wassermenge dann auftritt, wenn die Dauer des Starkregens mindestens so lang ist, wie die der *Fliesszeit*. Ausserdem weist ein Regen von bestimmter Dauer und Wiederkehrperiode eine zu bestimmende *mittlere Intensität* auf.

Regenintensität:

$$r = 166,7 \frac{\Delta N}{\Delta T} \text{ (m}^3/\text{s, ha)}$$

Gefallener Niederschlag ΔN in mm
 Regendauer ΔT in Minuten

Die *Regenintensität* ist abhängig von der gewollten Häufigkeit der Wiederholung. Für die Ermittlung der *Projektwassermenge* des Hochwasser-Entlastungsstollens wurde eine Häufigkeit $z = 100$, d.h. ein durchschnittlich alle 100 Jahre einmal auftretender Spitzenabfluss HQ_{100} angenommen. Die *Wahrscheinlichkeit* oder das *Risiko* R_n des Auftretens eines die Projektwassermenge überschreitenden Hochwassers während der Lebensdauer des Bauwerkes kann nach *Gumbel* [7] wie folgt ausgedrückt werden:

$$R_n = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

dabei bedeuten:

n = Lebensdauer des Bauwerkes (in Jahren)

R_n = Wahrscheinlichkeit (Risiko) des Auftretens eines die Projektwassermenge überschreitenden Hochwassers

T = Wiederkehrintervall (in Jahren) des Projektwassers HQ_{100} während der Periode
 z. B. $T = 100$ Jahre

Für $HQ_{\text{Projekt}} = HQ_{100}$, $T = 100$ Jahre und $n = 100$ Jahre folgt ein R_n -Wert von 0,64, d.h. das Risiko, dass das 100jährige Hochwasser während der angemessenen Lebensdauer von 100 Jahren einmal überschritten wird, beträgt 64 Prozent. Für $HQ_{\text{Projekt}} = HQ_{1000}$, $T = 1000$ Jahre und $n = 100$ Jahre beträgt hingegen das Risiko nur noch 9,5 Prozent.

Entsprechend einem in Luzern maximal gefallenen Niederschlag von 60 mm/Stunde ergibt sich in der Wiederkehrperiode $z = 100$ Jahre eine Regenintensität von $r_{100} = 170 \text{ l/s,ha}$. Analoge Werte können aufgrund der Veröffentlichungen von *Hörler* [3] aus den Regenintensitätskurven des Kantons Aargau, gemäss Vorlesung Prof. *C. Lichtenhahn* [4], ermittelt werden.

Bei einer Bachlänge von $L =$ etwa 8 km, einer mittleren Fliessgeschwindigkeit von $v = 3 \text{ m/s}$, beträgt die totale Laufzeit (Anlaufzeit und Fliesszeit) $t =$ etwa 50 Minuten [6]. Beim Laufzeitverfahren wird die Fliesszeit der massgebenden Regendauer gleichgesetzt und es beträgt die sekundliche maximale Abflussmenge Q_i im Messpunkt i des Einzugsgebietes E_i für eine Wiederkehrperiode z. B. $z = 100$:

$$Q_i = \Psi_i \cdot r_i \cdot E_i \text{ (m}^3/\text{s)}$$

Der mittlere Wasserverlustbeiwert Ψ_i kann im vorliegenden Fall zu rund 0,18 bis 0,25 angenommen werden [5], so dass folgende *Projektwassermengen* ermittelt wurden:

Jährlichkeit der Projektwassermenge: $z = 100$ jähriges Hochwasser.

Hochwasserzufluss:

Würzenbach:

$$Q_{100} = 0,18 \times 170 \text{ l/s,ha} \times 860 \text{ ha} = 25,7 \text{ m}^3/\text{s}$$

Büttenenbäche:

$$Q_{100} = 0,25 \times 170 \text{ l/s,ha} \times 80 \text{ ha} = 3,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Total $Q_{100} = 29,2 \text{ m}^3/\text{s}$

Umgeleitete Hochwassermenge = Projektwassermenge im Entlastungsstollen

Würzenbach: $Q = 23,7 \text{ m}^3/\text{s}$

Büttenenbäche: $Q = 3,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Total: $Q = 27,2 \text{ m}^3/\text{s}$

Restwasser = Pflichtwasser im alten Gerinne:

ab Stollenumleitung ($E = 8,6 \text{ km}^2$):
 $Q = 2,0 \text{ m}^3/\text{s}$

mit Zufluss bis Seemündung ($E = 10,5 \text{ km}^2$):
 $Q = 8,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Mit etwa 10 km^2 *Einzugsgebiet* und einer *Hochwassermenge* Q_{100} von rund $30 \text{ m}^3/\text{s}$ zählt der *Würzenbach* mit seinen Nebenbächen zu den *besonders kritischen Gewässern in Luzern* mit ehemals häufigen Schadenereignissen.

Verzweigungsbauwerk Würzenbach

Oberhalb des Siedlungsgebietes wurde im natürlichen Bachbett des Würzenbaches das Verzweigungsbauwerk mit *Geschiebe-Rückhaltebecken* angeordnet.

Durch den Einbau eines *oberen Stau- bzw. Überfallwehres* wird die Zufluss-Geschwindigkeit abgebremst, die natür-

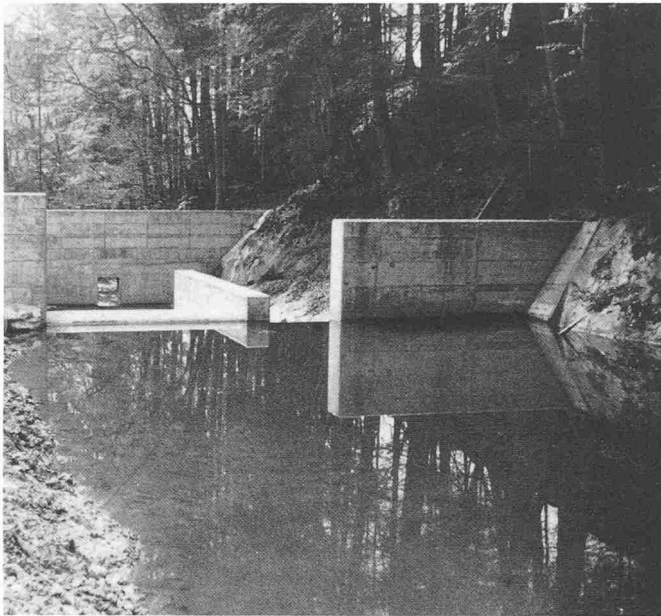


Bild 3. Blick vom Oberwasser (Kiesfang-Rückhaltebecken) auf das Verzweigungsbauwerk

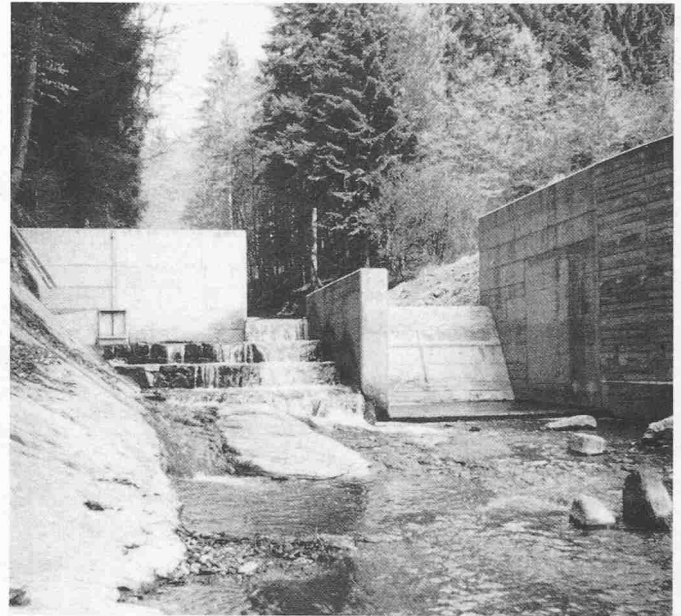


Bild 4. Überfallwehr mit Fischtreppe

liche Schleppkraft verkleinert und somit eine Auflandung vor dem Wehr erzwungen [25]. Der Inhalt des als Kiesfang wirkenden Rückhaltebeckens umfasst etwa 100 m^3 (Bild 3). Entsprechende Zufahrtswege ermöglichen die jährliche Ausbaggerung des Geschiebes aus dem Rückhaltebecken sowie die Säuberung der Geschwemmel-Rückstände im Zwischenbecken.

Das Überfallwehr konnte, wie übrigens alle anderen Bauwerke, auf gesunden Fels abgestellt bzw. eingebunden werden. Eine parallel neben der Leitwand des Wehres geführte Fischtreppe ermöglicht die Fischpassage des Bauwerkes auch bei Niederwasser. In vier Stufen zu je 50 cm wird der Höhenunterschied von 2 m überwunden (Bild 4).

Der unterhalb des Verzweigungseinlaufes angeordnete eigentliche Talsperrenabschluss gestattet den freien Abfluss

der Niederwasser des Würzenbaches durch eine mit einer Schütze stationär ausgerüsteten Auslauföffnung (Bild 5). Bei Hochwasser erfolgt ein Aufstau mit zunehmender Durchfluss-Wassermenge durch diese Öffnung und – mit steigendem Wasserspiegel – eine sukzessiv zunehmende Ableitung der Hochwasser über die als breiter Überlauf ausgebildete Einlaufschwelle in den Umleitungsstollen [18]. Ein massiver Stahlrechen beim Stolleneinlauf verhindert das Eindringen grober Geschwemmelteile wie Strünke und Baumstämme (Bild 6).

Zu Revisionszwecken kann der Stollen mit Dammbalken temporär in der Trockenperiode abgeschlossen werden. Durch entsprechende Wahl der Grösse und Lage der Durchflussöffnung in der Talsperre und der Überlaufkote im Einlaufbauwerk wird die sogenannte Trenncharakteristik bestimmt (Bild 8)

[24]. Dadurch werden die maximal zulässigen Abflüsse im alten Gerinne des Würzenbaches limitiert sowie die Grenzwassermenge für das Anspringen des Hochwasser-Entlastungsstollens festgelegt. Im vorliegenden Fall wird bei einer Schützöffnung von 40 cm der Würzenbachabfluss bei max. Stau auf $2 \text{ m}^3/\text{s}$ limitiert (Bild 9).

Die hydraulischen Verhältnisse und Abflussvorgänge bei Hochwasser sind für das gesamte Einlauf- bzw. Verzweigungsbauwerk in Bild 7 dargestellt. Ausgehend von den fixen Fließwechselstellen der strömenden zu den schiessenden Abflusszuständen, d.h. beim Wehrüberfall und beim Stolleneinlauf kann mittels Staukurvenberechnungen der Wasserspiegelverlauf für die interessierenden Wassermengen ermittelt werden [19,20].



Bild 5. Talsperrenabschluss



Bild 6. Einlaufbauwerk mit Überlaufschwelle und Rechen

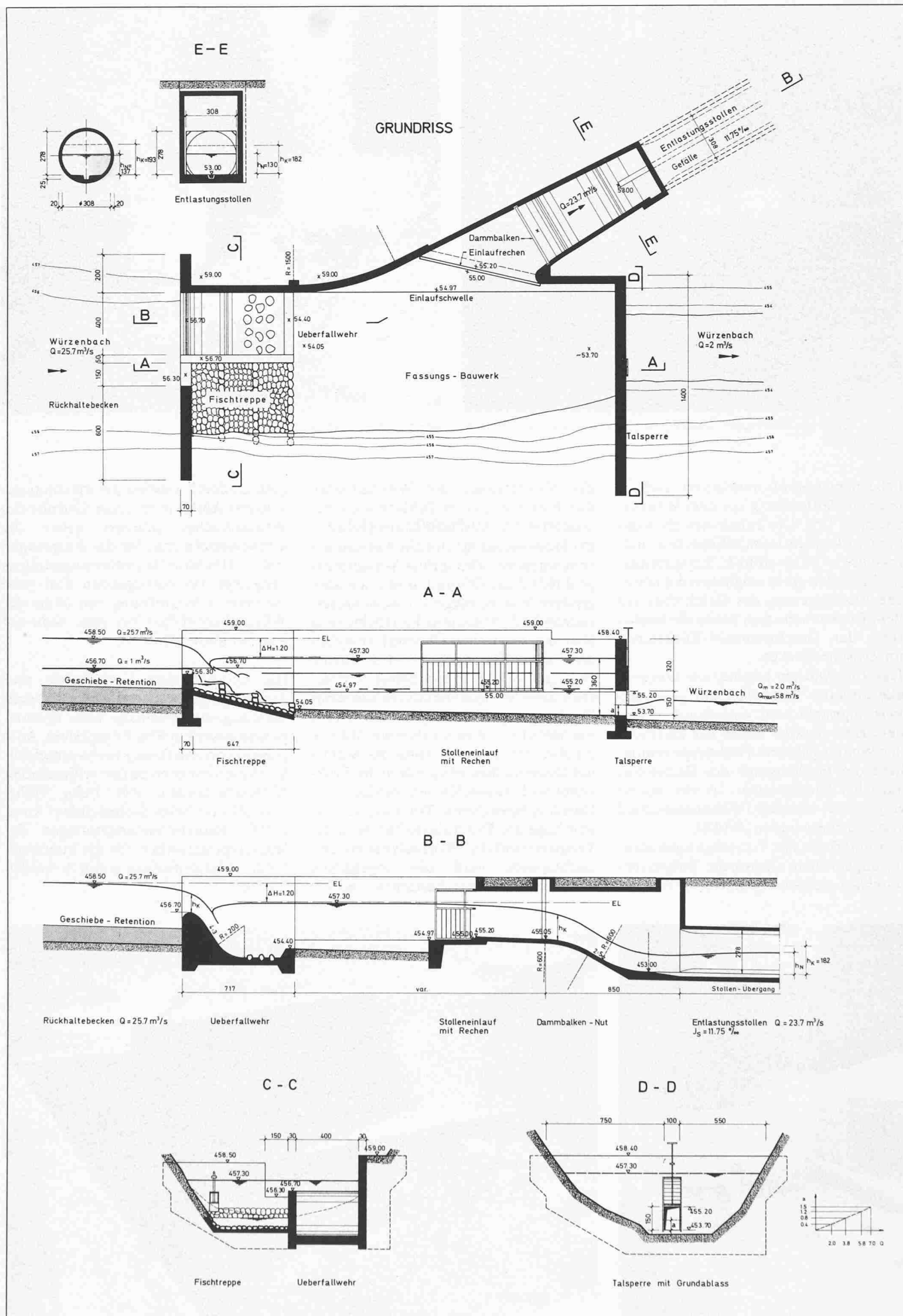


Bild 7. Verzweigungsbauwerk des Würzenbaches, bestehend aus Rückhaltebecken, Wehrüberfall und Fischtreppe, Talsperrenabschluss und Einlaufbauwerk Entlastungsstollen



Bild 12. Fassungsbauwerk Büttenebäche

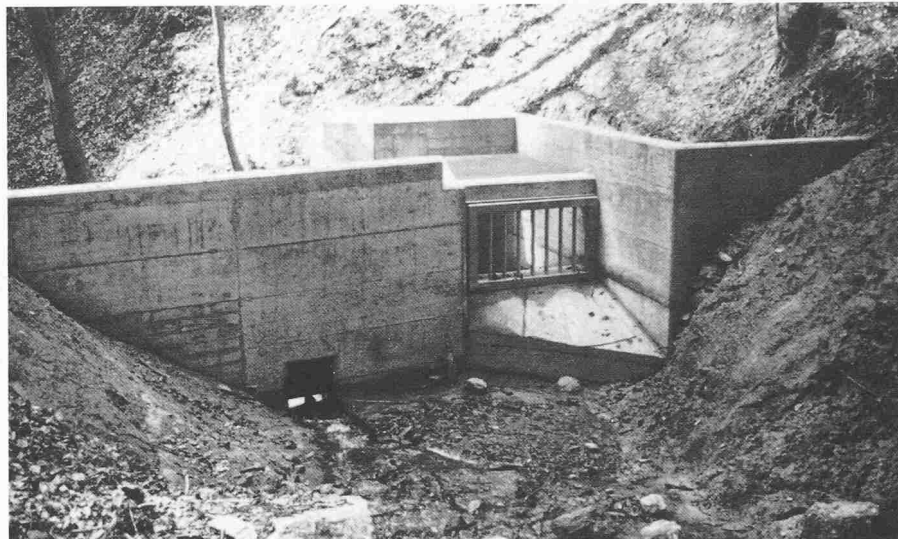


Bild 13. Talsperrenabschluss Büttenebäche und Einlaufbauwerk Wirbelfallschacht

Fassungsbauwerke der Büttenebäche (Wirbelfallschächte)

Die Hochwasser der in den Würzenbach mündenden Büttenebäche werden über der Stollenaxe gefasst und durch *Wirbelfallschächte* in den Entlastungstollen abgeleitet (Bild 14). Die *Wirbelfallschächte* der Büttenebäche sind 15 m bzw. 30 m hoch und weisen einen kreisrunden Querschnitt mit einem Schachtdurchmesser von $D_s = 80$ cm auf. Die Verhältniszahlen «Höhe/Durchmesser» betragen demzufolge: $H/D_s =$ etwa 19 bzw. 38.

Die Abflüsse schwanken zwischen 0 und $2 \text{ m}^3/\text{s}$ je Schacht, wobei der Maximalwert als 100jähriger Höchstwert veranschlagt und als Ausbauwassermenge den Bachfassungen zugrunde gelegt wurde.

Mit dem *Wirbelfallschacht*, der *Drallkammer* und dem *Einlaufbauwerk* ist ebenfalls der *Talsperrenabschluss* als einheitliches Bauwerk konzipiert (Bild 12).

Die Trenncharakteristik sieht analog der des Würzenbaches aus, indem bei zunehmendem Hochwasser-Zufluss hinter der Sperre, bei ansteigendem Spiegel, das Wasser über die Einlaufschwelle in den *Wirbelfallschacht* und den Entlastungsstollen abgeleitet wird. Die regulierbare Ausflussöffnung von 50×60 cm gestattet einen Abfluss für das Niederwasser (Dotierwassermenge) von etwa $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ und einen Hochwasserabfluss durch die *Wirbelfallschächte* bis zu je $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (Bild 13).

Die *Wirbelfallschächte* (Bild 14) bestehen im wesentlichen aus einem spiralförmigen Einlauf, aus einem vertikalen kreisrunden Schacht und einer Toskammer am Schachtfuss. Die hydraulische Berechnung des *Wirbelfallschachtes* kann auf der Grundlage der physikalischen Gesetze von erzwungenen Rotationsströmungen, in Analogie zu dem «Badewannenwirbel» erfolgen. Die *Wirbelfallschächte* verfolgen den Zweck, eine spiralförmige, an die Schachtwand gepresste Vertikal-Ableitung zu erhalten [13].

Der im Schachtinnern vorhandene Atmosphärendruck (Luftsäule) soll den an der Wandung erfolgende Rotationsabfluss mit gleichzeitiger teilweiser Energieumwandlung garantieren. Die an der VAW an der ETH Zürich unter der Leitung von Herrn Prof. D. Vischer [8] durchgeführten Modellversuche derartiger *Wirbelfallschächte* lassen erkennen, dass der schießende Abfluss im Einlaufgerinne deren Wirksamkeit erhöht. Schwankende und selbst kleine Abflussmengen können derart beschleunigt werden, dass der ihnen in der Einlaufspirale aufgezwungene Drall ausreicht, um sie an die Schachtwandung zu drücken (Bild 10), [14].

Für den Zufluss im schießenden Fließzustand sorgt ein Längsgefälle der Drallkammersohle von 30 Prozent in der Einlauftrumpete mit sukzessiver Abnahme bis auf 15 Prozent. Die Einlaufbreite B der Drallkammer wurde gleich dem Schachtdurchmesser $D_s = 80$ cm gewählt ($B/D_s = 1$).

Drallkammer

In der Praxis hat sich die Konstruktion der *Spirale mit Korbbögen* nach *Drioli* [11] bewährt (Bild 11). Für die im vorliegenden Fall ermittelten Grössen B , D_s und $S = 25$ cm ergeben sich die übrigen Abmessungen des Spiraleinlaufes aus folgenden Beziehungen:

- Einlaufbreite: $B = 80$ cm
- Durchmesser Wirbelfallschacht: $D_s = 80$ cm
- Radius Wirbelfallschacht: $R_s = D_s/2 = 40$ cm
- Abstand Schachtaxe zu Einlaufaxe: $A = R_s + S + B/2 = 105$ cm
- Exzentrizität der Korbbögen: $E = (B + S)/7 = 15$ cm
- Spiralradien der Drallkammer (Korbbogen-Radien!): $R_1 = R_s + E = 55$ cm
- $R_2 = R_s + 2E = 70$ cm
- $R_3 = R_s + 4E = 100$ cm
- $R_4 = R_s + 6E = 130$ cm

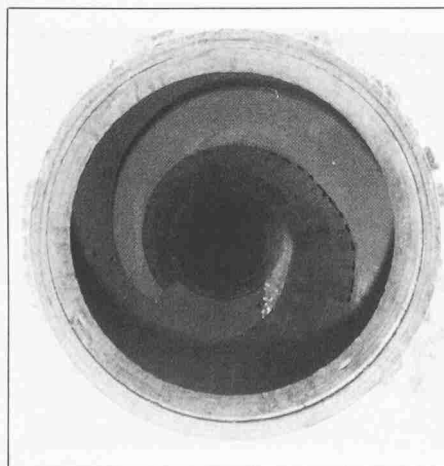


Bild 10. Spiralförmiger Einlauf des Wirbelfallschachtes

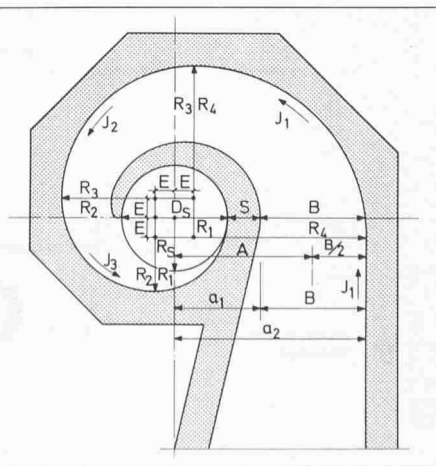


Bild 11. Spiralen-Ausbildung des Wirbelfallschachtes

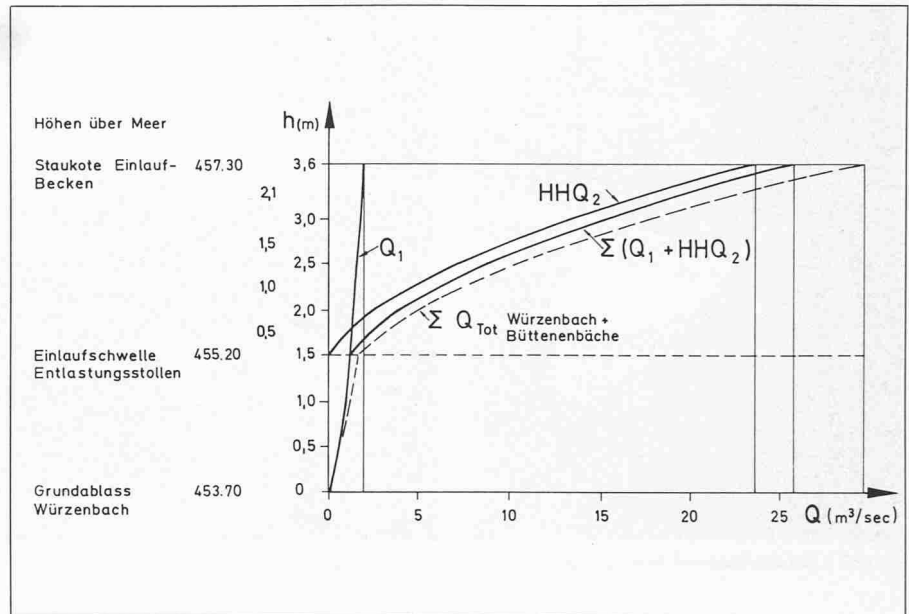
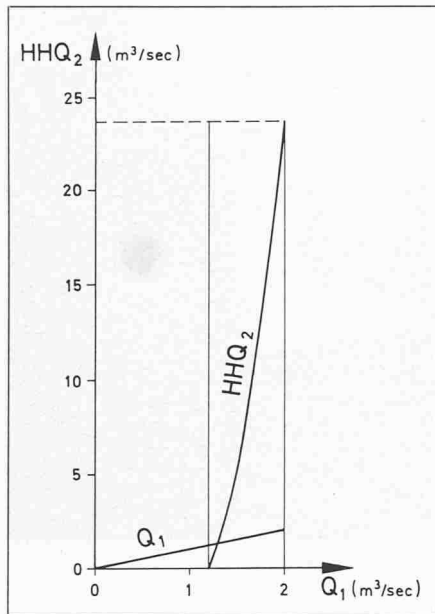


Bild 8. Trenncharakteristik des Verzweigungsbauwerkes

Bild 9. Trenncharakteristik in Funktion der Koten

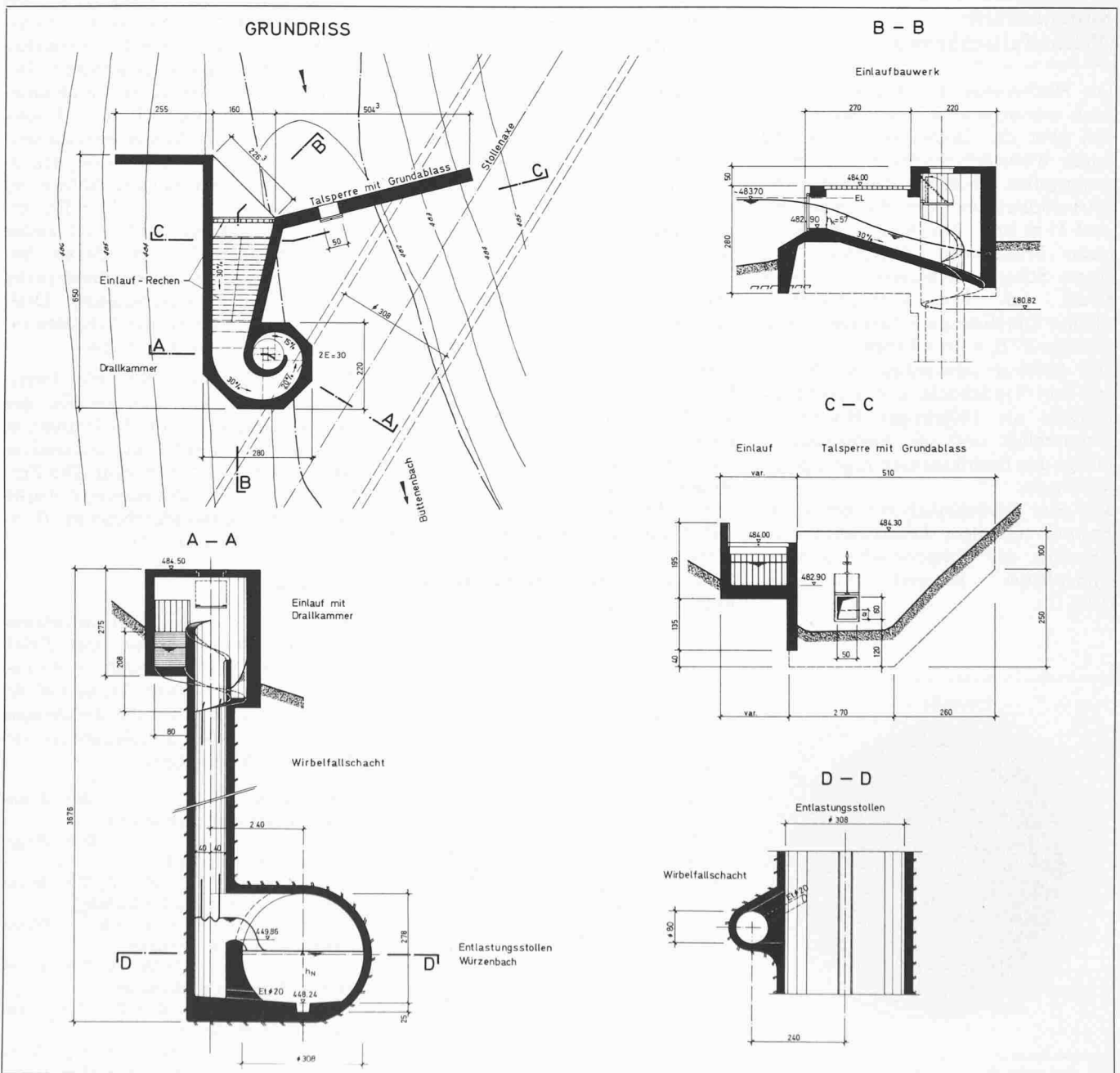


Bild 14. Verzweigungsbauwerk der Büttenebäche, bestehend aus Rückhaltebecken, Talsperrenabschluss und Einlaufbauwerk des Wirbelfallschachtes

Abstand Einlauf/Wirbelfallschacht:

$S = 25 \text{ cm}$
 Innenradius: $a_1 = A - B/2 = 65 \text{ cm}$
 Aussenradius: $a_2 = A + B/2 = 145 \text{ cm}$

Spiralströmung

Die in der Folge verwendeten Abkürzungen bedeuten:

- Q Abflussmenge
- R_0 Wirbelkernradius
- H Hydrostatische Höhe
- g Erdbeschleunigung (9,81 m/s²)
- c Konstanter Faktor
- ξ, δ Verhältnis-Zahlen
- μ, η Funktionsparameter
- f Vertikaler Wirbelkernabstand von Drallkammersohle
- λ Reibungswert

a) nach *Ackers und Crump* [10]:
 Einlaufbedingung:

mit $\xi = \frac{R_0}{R_s} = 0,5$

und $c = 0,7 \cdot R_0 \sqrt{2gH} = 1,0$

wird $Q = H \cdot c \cdot \ln \frac{a_2}{a_1} - \frac{c^3}{4g}$
 $(\frac{1}{a_1^2} - \frac{1}{a_2^2}) = 2,2 \text{ m}^3/\text{s}$

Abflussbedingung:

max. bei $\partial Q / \partial \delta = 0$:

$\frac{H+f}{D_s} = \frac{c^2(1+\delta)}{g D_s^2 \cdot \delta^2}$

mit $\delta = \xi^2 = \frac{R_0^2}{R_s^2} = 0,25$

wird $Q = \frac{\pi D_s}{4} \cdot c \sqrt{\frac{2(1-\delta)^3}{\delta^2}}$
 $= 2,3 \text{ m}^3/\text{s}$

b) nach *Drioli, Viparelli und Pica* [9, 11, 12]:

$Q = \mu \cdot \pi R_s^2 \sqrt{2gH} = 2,1 \text{ m}^3/\text{s}$
 mit $\mu \approx 0,6$

Fallschacht

Durchmesser:

$D_s = \eta \sqrt[5]{\frac{Q^2}{g}} \approx 0,80 \text{ m}$
 mit $0,70 < \eta < 1,05$

Schachtwasser-Geschwindigkeit:

$v = \sqrt[3]{\frac{8 Q g}{\lambda \pi D_s}} \approx 4,6 \text{ m/s}$

Entlastungsstollen

Die gegenüber dem Würzenbach wesentlich kürzere Ableitstrecke in den See erlaubte ein grösseres Gefälle des Stollens und somit ein relativ kleiner Abflussquerschnitt für eine erforderliche Abflussleistung von rund 28 m³/s (Bild 1 und 7).

Der *Entlastungsstollen* als Umleitungskanal der Hochwasser hat eine Länge von 1460 m, ein Gefälle von 11,75‰ und als Kreissegmentprofil einen In-

nendurchmesser von 3,08 m. Der Stollen durchquert Sandstein- und Mergelschichten der unteren Süsswassermolasse. Da besiedeltes Gebiet und die SBB-Gotthardstrecke unterfahren wurden, war ein mechanisch vorgetriebener Stollen nach bekannten Bohrsystemen wünschbar. Gewählt wurde ein kreisrunder Querschnitt von 3,50 m Bohrdurchmesser.

Die Erfahrung beim Bau des Sonnenbergtunnels der Nationalstrasse N2 zeigte, dass ein Schutz der Felsoberfläche erforderlich war. Es wurde deshalb auf die ganze Länge eine Betonverkleidung von 20 cm Stärke ausgeführt. Die dadurch verbesserte Oberflächenbeschaffenheit gewährleistet zudem eine höhere Abflussleistung sowie eine grössere Sicherheit gegen Abrasionseinwirkungen (Bild 15).

Der horizontale Sohleneinbau mit mittlerer Sickerwasserrinne (Niederlaufrinne) garantiert eine gute Begehbarkeit zu Kontrollzwecken. Die Einleitung der Büttenebäche in den Stollen erfolgt über einen Überfall der seitlich der Stollenwandung angeordneten schachtförmigen *Toskammern* (Bild 16).

Die Abflusskapazität des als Freispiegelabfluss-System konzipierten Entlastungsstollens ist von der Wahl des Querschnittes, der Rauigkeit und der Stollenneigung abhängig.

Der Abfluss der Ausbauwassermenge von $Q = 27,2 \text{ m}^3/\text{s}$ im Stollen ist schies-

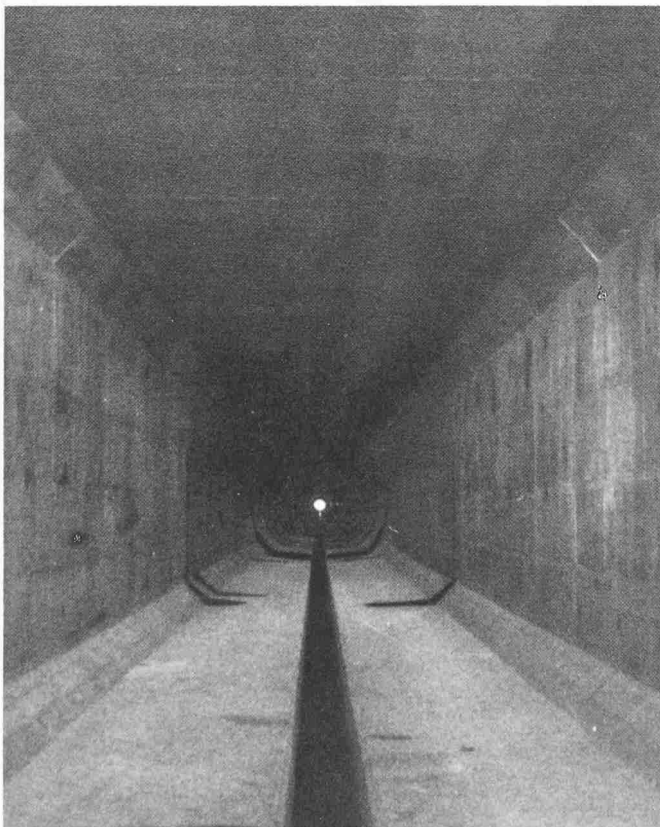


Bild 15. Hochwasser-Entlastungsstollen

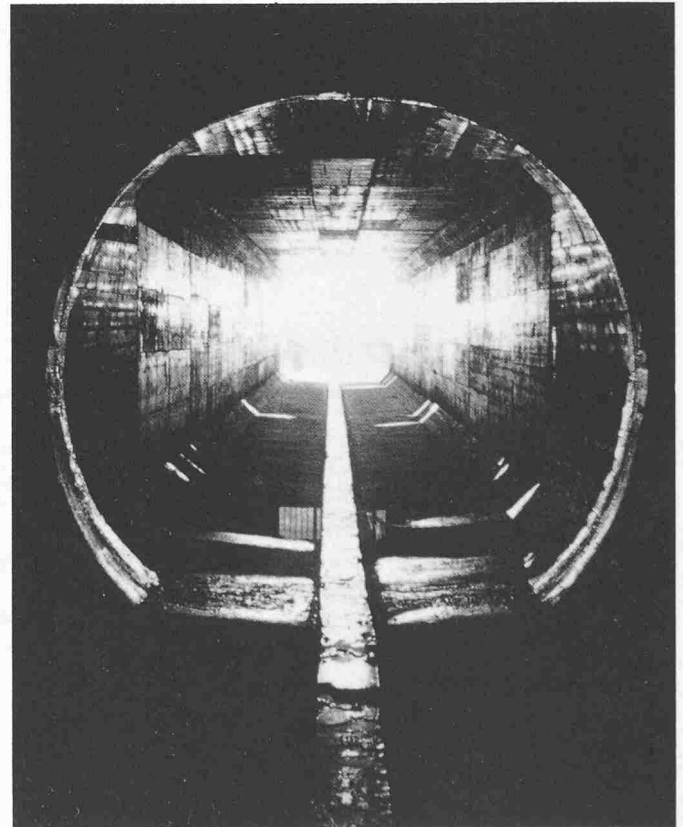


Bild 16. Stollenquerschnitt

send ($V_N = 6,5 \text{ m/s}$), wobei sich eine Normalabflusshöhe von $h_N = 1,51 \text{ m}$ einstellt, bei einem Rauigkeitswert nach Strickler von $k_s = 70$ bzw. einer Wandrauigkeit von $W_R = 2 \text{ mm}$ nach Prandtl-Colebrook [20].

Das *Lufteintragungsverhältnis* nach Douma [19, 20] beträgt:

$$\lambda = \sqrt{20 Fr_{LW} - 100} = 2,5\%$$

und die *Froude'sche Zahl* des Luftwassergemisches:

$$Fr_{LW} = \frac{v^2}{g R_{LW}} = 5,3 \text{ bei } k_s = 70 \quad (5,0 \text{ bei } k_s = 65)$$

Bei diesen Verhältnissen findet noch keine wesentliche Luftaufnahme statt, ebensowenig eine Gefahr des Zuschlagens. Luft wird erst mitgerissen bei

grösseren Geschwindigkeiten d.h. bei k_s -Werten grösser als 65 oder falls die Froude'sche Zahl grösser als 5 ist.

Auslaufbauwerk

Die Einleitung der umgeleiteten Hochwasser in den Vierwaldstättersee erfolgt *unter Wasser*, indem die kinetische Energie der Abflussmenge in einem *Tosbecken* zunächst umgewandelt werden muss, bevor dass Wasser durch zwei *rechteckförmige Düker* in den See abgeleitet wird [16]. Die zu reduzierende Energiehöhe beträgt 3,5 m bei HHW und 4,9 m bei MW (Bild 17).

Es wurde darauf geachtet, dass sowohl bei NW- als auch bei HW-Stand kein Mitreissen der Wasserwalze in den See

stattfindet, um störende Pulsationen im Düker zu vermeiden. Entsprechende Berechnungen der kinetischen Energieverhältnisse (statische und dynamische Stützkräfte) erforderten eine Tieferlegung des Dükers unter der Seestrasse [20]. Die Lage des Wassersprunges im Tosbecken wurde nach dem Stützkraftsatz ($S_I = S_{II}$) bestimmt.

Die auch bei HHW-Stand des Sees sich einstellende Wasser- bzw. Energiehöhe im Tosbecken des Auslaufbauwerkes ergibt noch eine genügende Freibordhöhe. Um Kavitationsschäden zu vermeiden, wurde ein Absenkradius zum Tosbecken von 6 m gewählt, also ein grösserer Wert als der nach Rouse [15] minimal zulässige für den freifallenden Wasserstrahl von $R_{\min} = 5 \text{ m}$ bei $Fr = 3,7$.

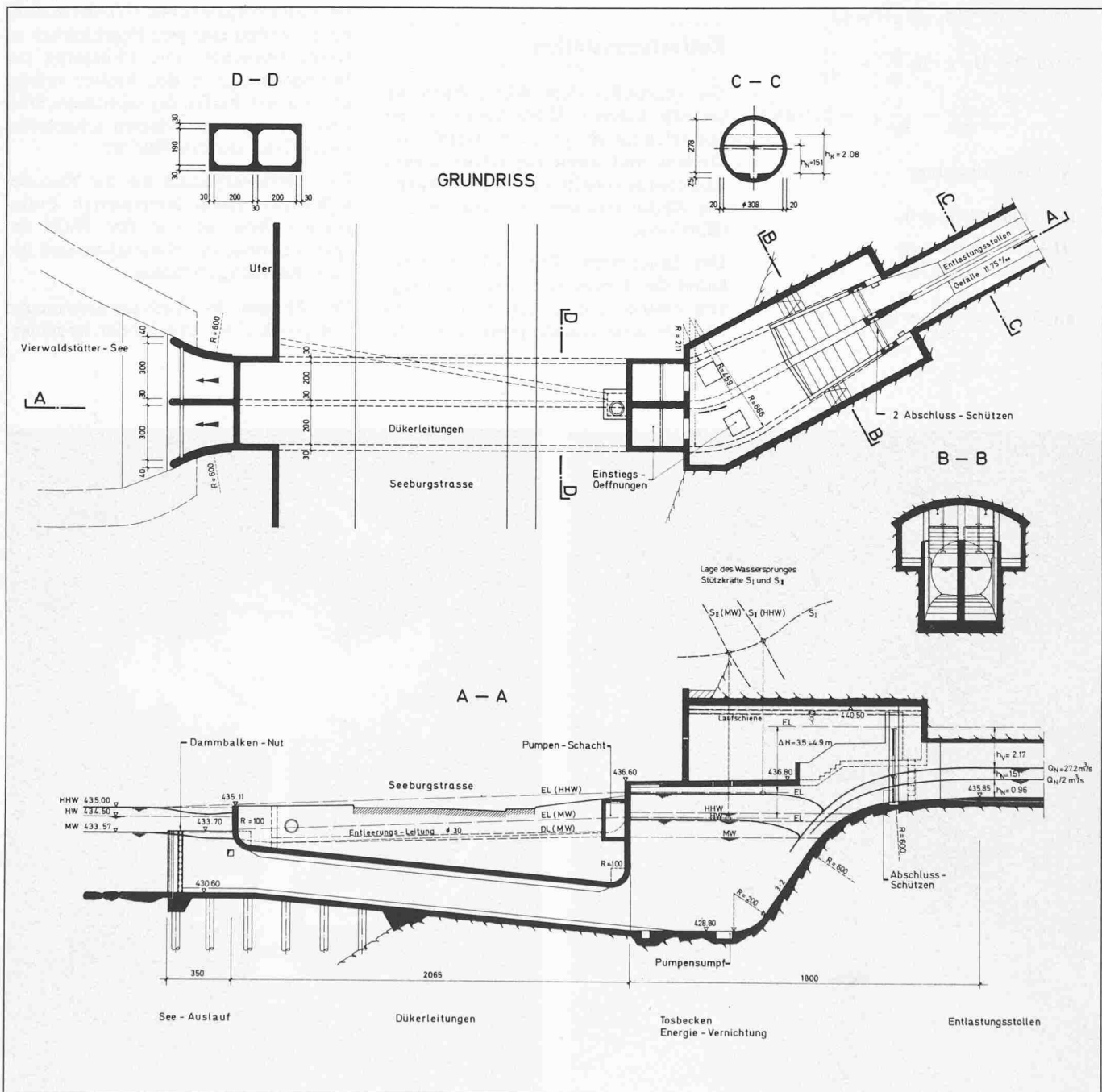


Bild 17. Auslaufbauwerk: Tosbecken, Düker, Seeauslauf (Vereinigungsbauwerk)

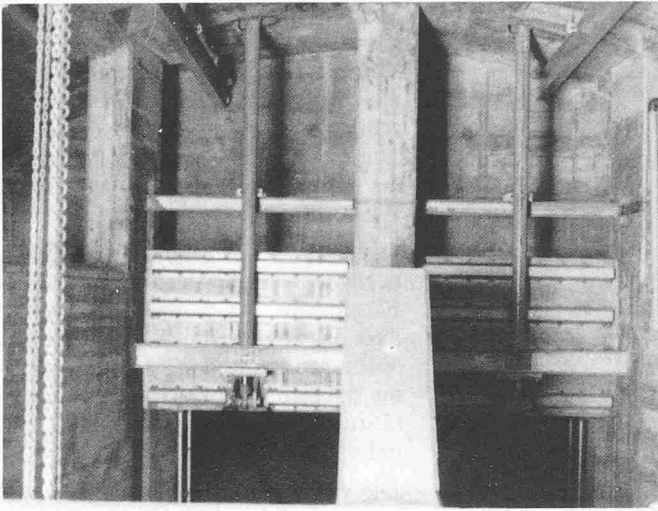


Bild 18. Blick vom Auslaufbauwerk gegen Abschlusschützen des Stollens



Bild 19. Seeauslauf

Eine Doppelrohrausbildung erlaubt die zu Kontrollzwecken wahlweise Trockenlegung der Düker mittels seeseitig einsetzbaren Dammbalken und stollenseitig angeordneten manuell bedienbaren Abschluss-Schützen (Bild 18).

Die *Auslauferweiterung* beim Übergang in den Seeablauf dient zum energetischen Ausgleich der verschiedenen Fliessverhältnisse im Düker und im See (Bild 19). Eine Sohlenbefestigung beim Seeauslauf verhindert eine unangenehme Auskolkung des auf Pfählen fundierten Auslaufbauwerkes.

Literatur

- [1] Kürsteiner, L.: «Das neue Elektrizitätswerk der Stadt Chur an der Plessur bei Lüen». Schweizerische Bauzeitung, Bd. 69, Zürich (1917)
- [2] Naef, F.: «Zur Berechnung des Abflusses aus meteorologischen Grössen mittels mathematischer Modelle». Schweizerische Bauzeitung, Heft 43 (1974)
- [3] Hörler, A. und Rhein, H. R.: «Die Intensitäten der Starkregen in der Schweiz». Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie, (1962)
- [4] Lichtenhahn, C.: Vorlesung Flussbau, ETH Zürich (1978)
- [5] Spreafico, M.: «Anwendung von hydrologischen Verfahren zur Berechnung des Ablaufes von Hochwasserereignissen in der Thur». Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft ETHZ, (1972)
- [6] Zeller, J.: «Starkregen und ihr Einfluss auf Hochwasserereignisse». EAFV (1974)
- [7] Gumbel, E. J.: «Statistics of Extremes». Columbia University Press, (1967)
- [8] Vischer, D.: «Wirbelfallschächte in Kanalisationen – Zwei hydraulische Modellversuche der VAW Zürich». Gas Wasser Abwasser Nr. 2 (1971)
- [9] Kleinschroth, A.: «Der Abflussvorgang im Wirbelfallschacht». Der Bauingenieur 47 (1972, S. 214 bis 218)
- [10] Ackers, P. und Crump, E. S.: «The vortor drop». Proc. Institution of Civil Engineers 16 (1959/60), S. 443
- [11] Drioli, C.: Verschiedene Veröffentlichungen: L'Energia Elettrica 24 (1947), S. 447; 46 (1969) S. 81; 46 (1969) S. 339
- [12] Pica, M.: «Scaricatori a vortice». L'Energia Elettrica 47 (1970), S. 217
- [13] Jeanpierre, D. et Lachal, A.: «Dissipation d'énergie dans un puits à vortex». La Houille Blanche 21 (1966)
- [14] Schaer, B.: «Grosskalibrige Kanalbauten am Beispiel der Stadt Bern». Schweizerische Bauzeitung 36 (1978)
- [15] Rouse, H.: «Turbulence characteristic of the hydraulic jump». J. of Hydr. Div. Proc. ASCE Vol. 84 (1958)
- [16] Tödten, H.: «Zur Beurteilung der Energie-dissipation von Tosbecken». Bauingenieur 51 (1976)
- [17] Peter, G.: «Der Wasserstollen Hardhof-Strickhof in Zürich». Schweizerische Bauzeitung 20 (1975)
- [18] Westrich, B. und Kobus, H.: «Untersuchungen am Luftmodell zur strömungstechnisch günstigen Gestaltung von Entnahmebauwerken an Flüssen». Gas Wasser Abwasser, Heft 7 (1976)
- [19] Hörler, A.: «Gefällswechsel in der Kanalisationstechnik bei Kreisprofilen». Schweiz. Zeitschrift für Hydrologie, Fasc. 2 (1967)
- [20] Desserich, M.: «Hydraulische Berechnungen von stationären Strömungen ausgerichtet auf programmierbare Elektronenrechner». STV Zürich (1977)
- [21] Franke, J. G.: «Fliesszustand und Grenzverhältnisse im teilgefüllten Rohr». Gas Wasser Abwasser, Heft 2 (1971)
- [22] Kühne, A.: «Flood-Routing-Verfahren als rechnerische Hilfsmittel für Prognosen und Hochwasserschutzprojekte». Fachtagung «Hochwasserschutz», ETH Zürich (1980)
- [23] Vischer, D.: «Hochwasser in der Schweiz – Häufigkeit und Ausmass». Fachtagung «Hochwasserschutz», ETH Zürich (1980)
- [24] Schaad, F.: «Hydraulische Gestaltung in Hochwasserentlastungsrinnen». Fachtagung «Hochwasserschutz» ETH Zürich (1980)
- [25] Vischer, D.: «Die Verlandung von Fluss-Stauhaltungen». Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 14 (1980)
- [26] Vischer, D./Huber, A.: «Wasserbau: Hydrologische Grundlagen, Elemente des Wasserbaues, Nutz- und Schutzwasserbauten». Springer-Verlag (1978)

Adresse des Verfassers: M. Desserich, dipl. Ing. ETH, Mitinhaber Ingenieurbüro Desserich + Funk, Luzern, Zürich, Kilchberg, Erstfeld, Engelberg, Langensandstr. 74, 6005 Luzern.