

PAP 892

**Modelling Energy Dissipation with Hydraulic Structures: A
Phenomenon with Insignificant Scale Effects?**

D. Vischer

**Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology of the Swiss
Federal Institute of Technology, Zürich, Switzerland**

April 1986

WATER RESOURCES
RESEARCH LABORATORY
OFFICIAL FILE COPY

Versuchsanstalt für Wasserbau
Hydrologie und Glaziologie
Prof. Dr. D. Vischer, Direktor

Gloriastrasse 37/39
Telefon Durchwahl: 01/256
Sekretariat: 01/256 40 91

Postadresse:
Versuchsanstalt für Wasserbau
Hydrologie und Glaziologie
ETH-Zentrum
CH-8092 Zürich

Thomas J. Rhone, P.E.
Head of Hydraulic Structures Section
Bureau of Reclamation 0230
Eng. and Res. Center, Code D-1531
P.O. Box 25007
Denver, CO 80225
USA

Ihre Nachricht vom Ihr Zeichen Unser Zeichen 8092 Zürich April 29, 1986

Gegenstand

Dear Mr. Rhone,

Please find enclosed two papers of Prof. Vischer's on "Energy Dissipation". Prof. Vischer is now on sabbatical leave in New Zealand and asked me to send you these papers after his meeting with you in USA in April.

Also, we take this opportunity to ask you to send me your publications on this subject.

With best regards

Laboratory of Hydraulics,
Hydrology and Glaciology



A. Chervet
(for the Director)

- Enclosures: - Modelling Energy Dissipation with Hydraulic Structures:
A Phenomenon with Insignificant Scale Effects?
Proc. IAHR-Symp. on Scale Effects in Modelling Hydraulic
Structures, Esslingen 1984
- Energievernichter im Wasserbau,
Schweiz. Ingenieur und Architekt, H. 40, 1984

Modelling Energy Dissipation with Hydraulic Structures: A Phenomenon with Insignificant Scale Effects?

D. Vischer

Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology of the Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, Switzerland

1. GENERAL REMARKS ON ENERGY DISSIPATION

1.1. What is energy dissipation?

If a drop of water falls into a stilling basin and stops there, its entire energy is converted into heat. Assuming that the heat affects only the water and not the environment, the drop is heated up by 0.24 degrees centigrade for a fall of 100 m. This heating effect is so small that it is hardly ever mentioned. It is, however, of great importance as it is connected with the dissipation of hydraulic energy.

For the hydraulic engineer energy dissipation is a synonym for the annihilation of hydraulic energy. This annihilation is welcome where undamped hydraulic energy causes damage, for instance by erosion.

1.2. How can energy dissipation be realized?

The flow around hydraulic structures is practically always turbulent. Each moving drop of water loses hydraulic energy due to friction and drag forces.

If a drop of water moves with the surrounding water and is part of a turbulent flow, energy losses are generated by small but energy-consuming eddies. Such eddies do not develop just anywhere; rather they are emitted by walls and shear zones, i.e. by zones characterized by large velocity gradients. The creation of significant energy losses in a current is therefore a matter of providing such zones. This is achieved in various ways, mostly by putting obstacles into the current.

If a drop of water moves through surrounding air, it is exposed to the air drag. The slowing down of the drop is bigger the smaller the drop, and is even bigger the higher the difference between the velocity of the drop and the surrounding air. Consequently the energy of a current can also be dissipated by transforming it into a spray, that is by diffusion, which again is produced by obstacles.

Therefore energy dissipation is realized either by disturbance of the flow or by its diffusion. An energy dissipator is a device in which these measures are effected within a relatively small area.

1.3. Methods of concentrated energy dissipation

The methods of dissipating the hydraulic energy of a current within a small area, for example in a stilling basin, are numerous. They may be characterized by the following key-words:

- a. provoking large velocity gradients with obstacles like
 - sudden expansions
 - sharp deflections
 - throttles
 - sills and endsills
 - chute blocks, baffle piers and beams
 - counterflows
 - rough boundaries
 - vortex chambers
 - and possibly even
 - air entrainment devices.
- b. Diffusion by creating extended and turbulent interfaces between the water and the surrounding air through
 - split free jets.

The corresponding energy dissipators are presented in section 2.

1.4. Limits of energy dissipation

As already mentioned, energy dissipation is achieved by a disturbance or a diffusion of the flow, and demands an appropriate design of the dissipator device which could be, for instance, a stilling basin, a pressure reducing valve, a vortex shaft etc. Such a design is in contrast to a hydrodynamic design, which tends to produce a smooth current with only small disturbances. The consequences of this contrast are strong effects on energy dissipators by

- pulsation
- erosion
- abrasion
- cavitation.

Energy dissipators have to resist these stresses and thus have to be of quite strong construction. In hydraulic engineering they are mostly built of concrete or steel.

Unfortunately, no materials exist which endure strong and permanent cavitation. Therefore, the risk of cavitation erosion defines some limits for energy dissipation. There is also no material which resists abrasion by a heavy silt and gravel loaded discharge that is not also prohibitively expensive.

2. TYPES OF ENERGY DISSIPATORS

2.1 The morphology of energy dissipators

The author is not aware of any publication which presents a complete morphology of energy dissipators. Hence, it would be tempting to elaborate a morphological grid here, for it would certainly allow gaps to be detected, such as types as yet unknown or used elsewhere. But this is beyond the scope of this lecture and will therefore not be done. Nevertheless, the following presentation of some types uses the keywords of section 1.3 to give at least a certain classification:

Energy dissipators with

- sudden expansions and sharp deflections
- counterflow
- rough walls
- vortex devices
- air entrainment
- spray inducing devices.

This classification is based on the most striking features of the respective energy dissipators. It must be considered, however, that some types are only really applicable to either pressure systems or to open channels. There are four possible transitions:

Energy dissipators with a transition from

- pressure to pressure flow
- pressure to free flow
- free to pressure flow
- free to free flow.

Another classification could be based on the hydraulics of jets. It is obvious that every inflow to an energy dissipator can be assumed to behave as a jet, the momentum of which is destroyed in a mixing process. It would thus be possible to define the following characteristics of an energy dissipator:

Type of the jet

- free jet
- partially free jet
- wall jet
- split jet
- rotating jet.

entrained medium

- water
- air.

2.2 Energy dissipation by expansion and deflection

(Figures 1 and 2)

Fig. 1a shows a simple expansion of a pipe or channel. This simple version is the most common energy dissipator. Its energy consumption, the famous Borda-Carnot loss, can be estimated easily and is often described as an impact loss: a fast current essentially impacts with a slower one, inducing flow separation and thus a zone of large velocity gradients.

Fig. 1b outlines a simple throttle. In the path of the current it creates both a contraction and an expansion. Yet it is mainly the expansion which produces the energy dissipation. The contraction primarily increases the strangling effect of the throttle section and thus the degree of the subsequent expansion.

In addition to these simple devices a large variety of complex expansions and throttles are used. Figs. 1c and 1d give two examples. They are for instance suitable when the current is reversible, as is the case in a throttled surge tank (see GARDEL, [1]).

Fig. 2a shows the classical hydraulic jump in a free flow. It can be compared with the simple expansion in a pipe. It works in practically the same way, and is also very commonly used. Of course it is not induced by an obstacle, but by an instability of the flow, namely the transition from supercritical to subcritical flow.

Where this instability does not automatically occur, it can be provoked by various appendances. Such a dissipator is called a forced hydraulic jump in a stilling basin. Fig. 2b outlines the possibilities in the vertical section: ramps, sills, baffles and beams. There are also some possibilities for variation in the ground-plan: lateral expansion, specially curved walls etc. The variety of the forms realized in the past is fantastic. For no other types have so many proposals, experimental devices and design rules been developed. Here, the energy dissipator of Fig. 2c is mentioned, solely because it is a transition form between the hydraulic jump stilling basin and the stilling chamber. It is an outlet with a hanging baffle or a stilling chamber with an impact wall (see PETERKA, [2]).

The free nappe of an overflow impacting on a pool of water is also subject to a sudden expansion and a corresponding deceleration. The condition of an ensuring good energy dissipation is a sufficient water cushion, i.e. a pool deep enough and large enough compared to the size of the nappe. The direction of the nappe at the point of impact can be vertical as in Fig. 2d, or oblique. If the water cushion is too small, a transformation of the plunge pool into a stilling basin by installing baffles, sills etc. is recommended.

In contrast to the free nappe Figs. 2e and 2f show two guided jets which end in a stilling well. The energy is dissipated by various obstacles.

2.3 Energy dissipation by counterflow

(Figures 3 and 4)

It is obvious that the energy of a jet can be dissipated by splitting it into two or more jets which are then directed against each other. This procedure is defined here as the principle of counterflow. To a certain extent it is already used in the types described in the previous section, especially in the stilling wells shown in Figs. 2e and 2f. But energy dissipators whose main feature is counterflow do exist. Fig. 3a shows a proposal

of HAINDL [3] for a stilling chamber with a nozzle and a diffuser cone. The nozzle can be complemented with a needle valve for regulation purposes.

The stilling chamber with a perforated distribution pipe of Fig. 3b is the counterpart of the stilling well of Fig. 2f. It is also based on the principle of counterflow, albeit not as perfectly as the stilling chamber with a perforated collector pipe outlined in Fig. 3c. With small perforations this device is very efficient and often installed in pressure systems as a pressure reducing device. The particular version shown in Fig. 3d is used as a pressure reducing valve.

When using the principle of counterflow it is important that the different jets are more or less equal and impact frontally. The impact losses are then obviously maximum. The form of a stilling basin shown in Fig. 3e, where two jets of similar size and velocity impact at a small angle and merge does not give good results (see KOCH, [4]), because it produces no particularly great velocity gradients. It develops perhaps a spray which is advantageous in another context (see section 2.7).

More efficient is the interaction of the two currents shown in Fig. 4a. This arrangement is typical for a double leaf gate. The overflowing nappe disturbs the underflowing one in the same way as a hanging baffle and improves the energy dissipation in the stilling basin.

An interesting solution for a flow with a low sediment concentration is outlined in Fig. 4b. It can be described as a stilling basin with a deflector sill. Its functioning is identical with that of the stilling basin with a forced hydraulic jump (Fig. 2b). Related to this is the solution outlined in Fig. 4c, a jet assisted hydraulic jump. As its name suggests, the relatively small countercurrent does not primarily induce an impact loss but promotes the hydraulic jump formation (see KAO, [5]). VOLLMER [6] advances the idea of the countercurrent stilling basin or stilling chamber in Fig. 4d. This energy dissipator is very compact and efficient and an alternative to that of Fig. 2c.

2.4 Energy dissipation by rough walls

(Figure 5)

It is well known that an extremely rough conduit dissipates a large part of the energy of a flow within a short distance. The roughness can be realized in different ways. Obvious is a solution which connects the already presented energy dissipators in series.

An example in Fig. 5a shows how a cascade of throttles increases the roughness of a pipe considerably. Such a solution has been proposed, for instance by INGERLE [7], for a bottom outlet. But respective realisations are still exceptional in hydraulic engineering. Rather the necessity for such cascades arises in industry. HUTAREW [8] states that series-connected pressure reducing devices of the type of Fig. 3c are in practical service for pressure reduction of up to 400 bar or 4000 m of water column.

Very common are short baffled aprons for canal or spillway drops (Fig. 5b). Closely related to them are block ramps, which in recent years have become very popular in river engineering. Both types are only efficient as dissipators if the baffles or blocs exert a relatively major effect on the flow. For steep baffled aprons, for instance, PETERKA [2] recommends baffle heights amounting to 80 % of the critical depth of the design flow.

In this context it seems logical to mention also real cascades as they are used in river engineering to fix the bed of torrents. Fig. 5c shows a solution with a series of sills, Fig. 5d one with a series of drops.

2.5 Energy dissipation with vortex devices

(Figure 6)

Most of the energy dissipators already presented have been known and commonly used for a long time, but not so vortex devices: Although their principle has also been known for a long time (see THOMA, [9]), their widespread application in hydraulic engineering is of rather recent date. Fig. 6a outlines the basic device. In Europe this is called a vortex chamber or vortex throttle and elsewhere an hydro brake. It has been promoted successfully in Germany by BROMBACH [10] for outlets of stormwater discharges and tanks in sewer systems. The vortex chamber consists mainly of a flat cylindrical tank with a tangential inlet and an axial outlet. Therefore, the inflow creates a strong vortex and the outflow becomes a rotating and sometimes hollow jet. Its energy is fairly well dissipated. If the outflow section is submerged, an axial vent is recommended.

An interesting application of the vortex chamber is the so called counterflow throttle shown in Fig. 6b. It has been used in Austria for the past 10 years or so for throttled surge tanks of hydro power plants. In this context it produces a low resistance when the level in the surge tank rises, and a high one when the level drops. The relation between the related resistance coefficients can vary from 1:10 to 1:40, depending on the design (see GSPAN, [11]). Hence the counterflow is subject to a 10 to 40 times larger energy dissipation.

Among others, HYDRO-PROGRESS (Switzerland) fabricates powerful energy dissipators in the form of vortex tubes or vortex drums as shown in Fig. 6c. The flow is guided tangentially into the tube and proceeds with a helical path along the wall to the exit with no special device but an axial vent. Its energy is mainly consumed by friction. This type of energy dissipator is used during the emptying of penstocks and pressure shafts.

At the IAHR-Congress of September 1983 in Moscow, HYDROPROJECT (USSR) presented a newly developed energy dissipator. While the corresponding contribution in seminar 3 has not yet been published, the author tries to resume it from memory: The energy dissipator was conceived for the pressure system of a high head power plant. Its main characteristic is the inducing of a helical current and thus a strong swirling flow in a penstock by using several tangential inlets. The result is strongly increased turbulence in the affected

part of the penstock which consumes a lot of energy. Fig. 6d gives a rough idea of the system. It will be interesting to read about details.

Another alternative for a vortex is the vortex chamber with a free water level as outlined in Fig. 6e. It is a kind of transition form to the now so popular vortex shaft which consists, as demonstrated in Fig. 6f, of a spiral shaped inlet and a vertical shaft. The inlet has the effect of guiding the flow to the shaft wall with centrifugal forces where it remains due to atmospheric pressure. As a result it follows a helical or a screw-shaped path downwards but loses revolutions as a result of the decreasing spin. In the lower part of a long shaft it moves vertically and becomes practically a free flow with the slope L (expressed as a sine). The energy dissipation is rather poor; neither the vortex at the inlet nor the friction along the shaft wall consume much energy. Therefore it is necessary to complete the system with a stilling chamber at the bottom of the shaft. The vortex shaft was originally developed for intermediate additions to pressure tunnels of hydro power plants but is now mainly used for drops in sewer systems.

2.6 Energy dissipation by air entrainment (Figure 7)

In section 2.1 it was emphasized that energy dissipation is virtually a mixing process. Several types of dissipators were presented in which a fast current is mixed with a slow one or with a countercurrent and thus dispersed. The question therefore arises if mixing with air has a similar effect.

Fig. 7a shows a water-jet pump as an example of a mixing tube used in industry: The propelling water jet enters the mixing chamber with high velocity and is subject to a strong diffusion. Consequently air is sucked in and a water-air mixture leaves the mixing tube. Air entrainment devices which are now used for the prevention of cavitation in open chute spillways work on the same principle. Fig. 7b outlines a commonly chosen design for large chutes with specific discharges up to $260 \text{ m}^3/\text{sm}$ and flow velocities up to 50 m/s . It creates an air concentration near the bottom of the flow of the order of magnitude of 50 % (equal amounts of water and air).

It is regrettable that the energy balance of such a device is not known, i.e. the author has not yet seen any corresponding figures. But he nevertheless presumes that the resulting energy dissipation effect is negligible. It is true that the water-air mixture flows considerably slower downwards than pure water, but it is also deeper. Thus the hydraulic energy of the flow is probably not much altered by the air entrainment. If there is a change, it is of course fundamentally a loss because every mixing process consumes energy. But in this process the shooting water is mixed with a medium 1000 times less dense, namely with air. Consequently the impact loss cannot become important even with high air concentrations.

Therefore the air entrainment itself cannot induce a sufficient energy dissipation. It is perhaps able to assist another method of energy dissipation. However, the statement of HERBRAND [12] does not sound very promising: He says that the influence of natural air entrainment into a hydraulic jump basin has practically no effect on the efficiency of the jump. There might be other air entrainment devices which lead to better results than those arising from the solution of Fig. 7b or any natural air entrainment.

Two possibilities to combine an energy dissipator with an air entrainment device are shown in Figs. 7c and 7d. The first one is mentioned by PETERKA in [2] for small stilling basins and is somehow similar to the bottom rack of a tirolian intake. Energy is consumed mainly by splitting and deflecting the inflow. The second corresponds to a proposal of SOGREAH (France) in [13], and is primarily an air entrainment device with a rack and only secondly an energy dissipator.

2.7 Energy dissipation by jet diffusion (Figure 8)

As has been said in the above section, air entrainment does not result in very much energy dissipation. This judgement must be modified to a certain extent, because if the air entrainment reaches a degree where the current is transformed into a spray, energy dissipation can become quite significant. The reason lies in the transformation of the medium from water including air bubbles into a cloud of drops in air. These drops are strongly affected by air drag if they are small and moving with high velocities relative to the surrounding air.

The classic example of a jet diffusor is the fountain of Fig. 8a, though it is generally used for adornment and not for energy dissipation. But it is interesting to note that the famous fountain of Geneva (Switzerland) which to-day launches a hollow jet of $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ to an elevation of 140 m was conceived in the past century as an energy dissipator in the urban pressure water supply.

Basically the same principle is now used in the hollow-jet valves of the types shown in Figs. 8b and 8c. Of course their jets are intentionally subject to a stronger diffusion and generally directed horizontally or possibly into a stilling basin. The valves have the purpose of multiplying the water-air interface and thus stimulating air-entrainment so as to generate finally a spray. They are commonly installed in bottom outlets of dams.

In spillways of dams the free overflow (Fig. 8d) and the ski jump (Fig. 8e) serve as spray generators. However, their success as energy dissipators is usually only partial because their nappes are often too thick to be completely dispersed on their downwards trajectory; the nappes keep a virtual hard core of water. Therefore it is recommended to increase diffusion by putting splitters on the crests and buckets. There are, of course, other possibilities to create jet diffusion.

3. PROBLEMS WITH THE HYDRAULIC MODELLING OF ENERGY DISSIPATORS

3.1 A preliminary remark

The title of this contribution is "Modelling energy dissipators with hydraulic structures: a phenomenon with insignificant scale effects?" Numerous energy dissipators can indeed be reproduced in hydraulic models without relevant scale effects. On the other hand some energy dissipators cause troubles in this respect. The variety of the types -- of which the previous chapter has presented only a small and scarcely representative selection -- does not enable a general judgement to be made on this point. It is also obvious that the modelling of energy dissipators does not occupy a special position in the whole modelling technique, i.e. the reproduction of dissipators does not seem to be very different from the reproduction of other hydraulic structures. But the following remarks may perhaps be helpful (see among others KOBUS et al, [14]).

3.2 Models with negligible scale effects.

Energy dissipators with a dominating free flow are reproduced according to the model law of Froude, because their current is mainly influenced by gravity. In contrast to river models for instance, the majority of dissipator models are so short that roughness, and therefore the Reynolds number, plays a minor part. If the water depth exceeds a few centimeters, the effects of the surface tension and thus the Weber number can be disregarded as well. These remarks are certainly valid for the relatively compact stilling basins, stilling chambers and stilling wells, provided air entrainment is unimportant.

Energy dissipators working under pressure are in principle reproduced according to the model law of Reynolds. But if the dissipators are fairly compact, as is the case for stilling chambers with sudden expansion, sharp deflectors and throttles, their overall resistance coefficient does not depend on Reynolds number. Consequently the identity of this number in model and prototype is not necessary and the headlosses measured in the model can be scaled by simply multiplying them with the model scale.

This is, generally speaking, also the case for the energy dissipators of the cascade type. They can be reproduced without relevant scale effects because they form by definition an extremely rough conduit and have an overall friction coefficient which does not vary much within a large range of Reynolds numbers. It is therefore easy to produce the described similarity by running the models in this range. Problems may only arise in baffled aprons with a considerable air-entrainment.

3.3 Models with small scale effects

The author is uncertain with respect to energy dissipators with a vortex device: Are models of these devices subject to relevant scale effects? BROMBACH and especially ELALFY [15] deal with this question related to vortex chambers. They established curves for scaling discharges and thus indirectly

resistance coefficients. They relied on tests with a family of models 1:20 to 1:800 to do this, and so demonstrated the influence of the Reynolds number. Now the inflow sections of operating vortex chambers are not wider than perhaps 2000 mm. It is then possible to reproduce them in a model, for instance 50 mm wide, i.e. with a scale of at least 1:40. It follows from the diagram of ELALFY [15] that for such a scale the Reynolds effects are of minor importance.

There seem to exist no similar results for vortex shafts. Nevertheless, an interesting comparison between model tests and prototype measurements has been achieved by DRIOLI [16]. He proves that the discharge of several prototypes and corresponding models with scales in the range of 1:10 to 1:30 is perfectly subject to the similarity law of Froude. Of course, this result only relates to discharges and therefore the intake structure. It is not relevant for the shaft itself where the main part of the energy dissipation takes place. Realizing that this dissipation is modest anyway (see section 2.5), the uncertainty is practically of no concern.

The problems of scale effects may have more important consequences in models of vortex tubes outlined in Fig. 6c.

3.4 Models with relevant scale effects

Energy dissipators in which air plays an important part cannot be modelled properly or at all. Air entrainment into a current depends on the Froude- and Weber numbers and thus excludes a correct scaling of model measurements. Yet, such a model can be explored according to the similarity law of Froude as long as the scale exceeds 1:15 (see VISCHER et al., [17]). The reliability of this procedure is still of concern to ongoing research. It has gained considerable attention because of the development of huge air-entrainment devices for large spillway chutes.

Even more problems arise with the modelling of sprays or spray inducing devices. The reason is the same as for the air-entrainment devices, and the consequences are even greater. This is why the literature of energy dissipation often contains the rather self explanatory statement: The splitting of a jet into a spray can only be investigated at a scale of 1:1 and thus practically only in the prototype.

Cavitation produces a drastic restriction of model similarity. This phenomenon is induced by extremely low pressures and high velocities and is strongly influenced by the pattern of a current and consequently the energy dissipation. If cavitation effects have to be reproduced, the Cavitation- or Thoma number must be equal in model and prototype. As a rule, this condition implies the use of a special test stand, i.e. a cavitation flume. But even with this expensive device the complete and accurate modelling of a whole energy dissipator cannot be performed successfully (see among others NAUDASCHER in [18]). Here again ongoing research should lead to new findings.

REFERENCES

- [1] Gardel, A.: Perte de charge dans un étranglement conique. Bulletin Technique de la Suisse Romande 88 (1962) 21, 313-337
- [2] Peterka, A.J.: Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. Engineering Monograph No.25, USBR, Edition Washington: US Printing Office 1964
- [3] Haindl, K.: Stilling device of mechanical energy of water jet discharging from a high pressure conduit. Proc. ICOLD-Congress New Delhi 1979. Q.50, R.34, 577-590
- [4] Koch, K.: Die gegenseitige Strahlableitung auf horizontaler Sohle. Report Nr.18 Versuchsanstalt für Wasserbau, University München, 1968
- [5] Kao, T.K.: Hydraulic jump assisted by cross jet. Proc. ASCE HY 12 (Dec. 1971) 2037-2050
- [6] Vollmer, E.; Khader, M.H.A.: Counter-current energy dissipator for conduit outlets. Water Power and Dam Construction (July 1971), 260-263
- [7] Ingerle, K.: Ein neuartiger Grundablass mit der Energieumwandlung im Stollen. Die Wasserwirtschaft 9 (1971), 271-275
- [8] Hutarew, G.: Technische Hydraulik. Edition 2, Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1973
- [9] Thoma, D.: Die Rückstromdrossel. VDI-Zeitschrift 74 (1930/31), 1098
- [10] Brombach, H.: Mehr als 500 Wirbeldrosseln im Einsatz. Wasserwirtschaft 72 (1982) 1, 25-26
- [11] Gspan, J.: Untersuchungen an der hydraulischen Rückstromdrossel von Wasserschlässern. Wasserwirtschaft 69 (1979) 12, 376-379
- [12] Herbrand, K.: Der Wechselsprung unter dem Einfluss der Luftbeimischung. Die Wasserwirtschaft 59 (1969) 9, 1-7
- [13] Comité Français des Grands Barrages, Groupe de Travail: Quelques problèmes particuliers posés par les déversoirs à grande capacité. Proc. IDOLD-Congress New Delhi 1979, Q.50, R.38, 649-673
- [14] Kobus, H.: Wasserbauliches Versuchswesen. Mitteilungsheft Nr. 4, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), 1978
- [15] Elalfy, Y.E.: Untersuchung der Strömungsvorgänge in Wirbelkammerdioden und -drosseln. Report Nr. 47, Institut für Wasserbau, University of Stuttgart, 1979
- [16] Drioli, C.: Esperienza su installazioni con pozzo di scarico a vortice. L'Energia Elettrica Vol.46 (1969) No.6, 399-409
- [17] Vischer, D.; Volkart, P.; Siegenthaler, A.: Hydraulic modelling of air slots in open chute spillways. Cranfield 1982, paper E 4, 239-251. Proc. BHRA Conference on Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures, Coventry, 1982
- [18] Naudascher, E.: Bauwerksmodelle; Strömungskräfte, Schwingungen und Kavitation. Mitteilungsheft Nr. 4, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), 1978

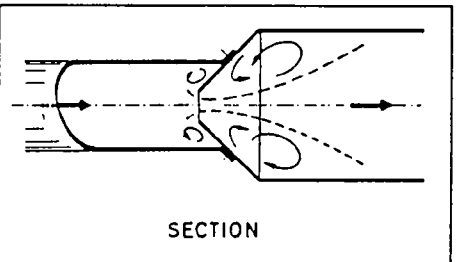
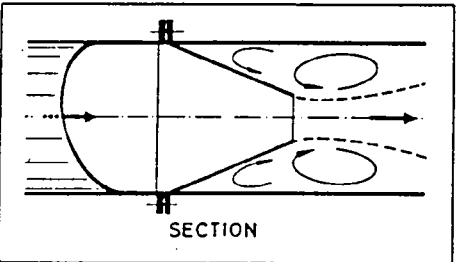
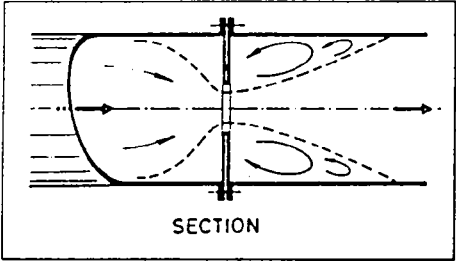
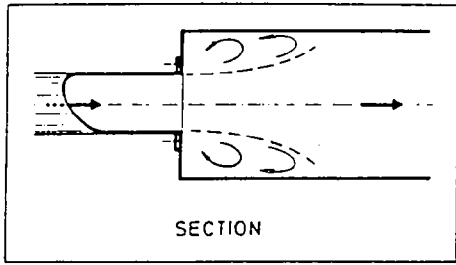
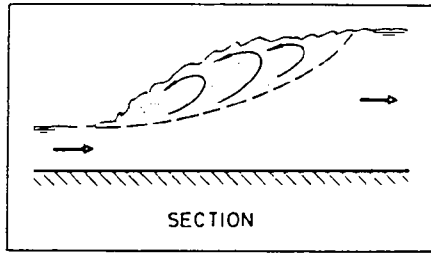


Fig.1. Energy dissipation by expansion and deflection

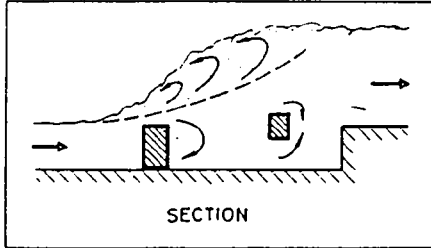
Fig.1

a



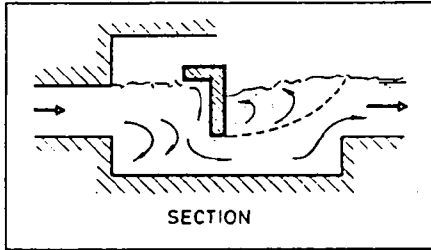
a

b



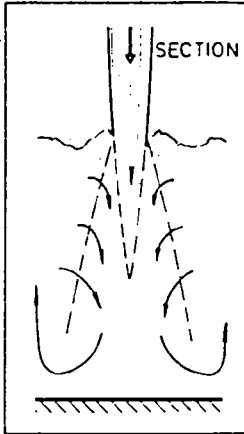
b

c



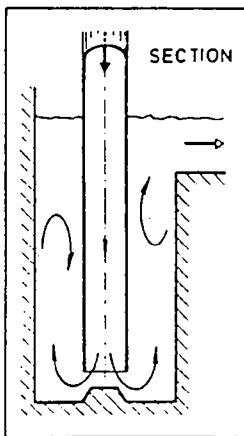
c

d



d

e



e

f

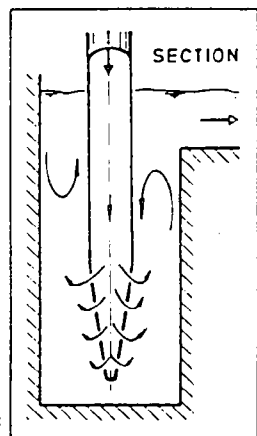


Fig.2. Energy dissipation by expansion and deflection (continued from Fig.1)

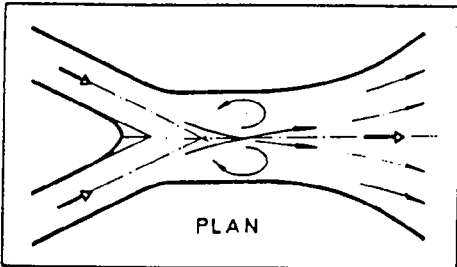
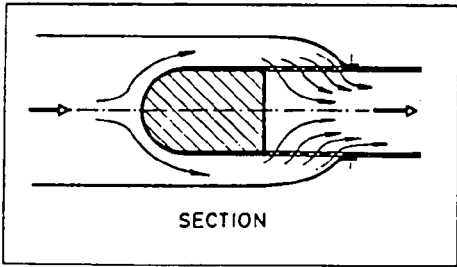
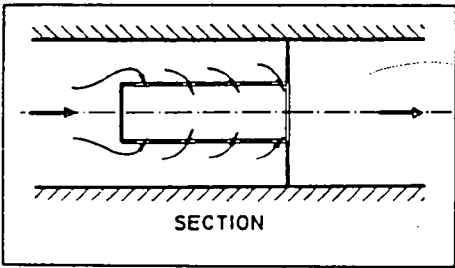
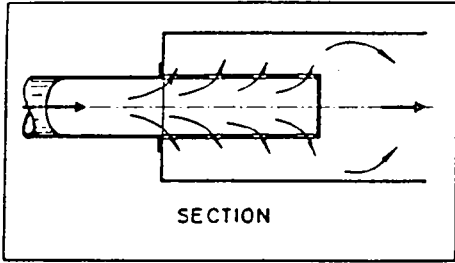
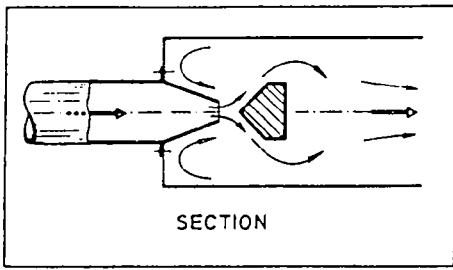


Fig. 3

a

b

c

d

e

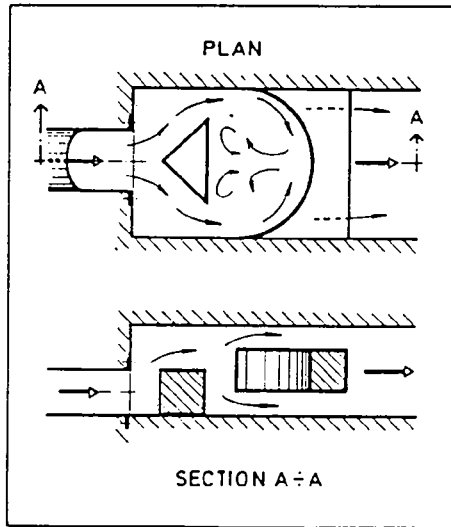
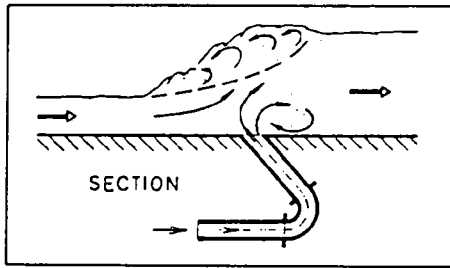
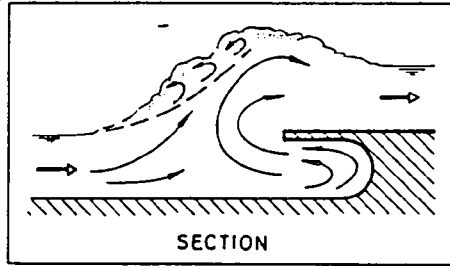
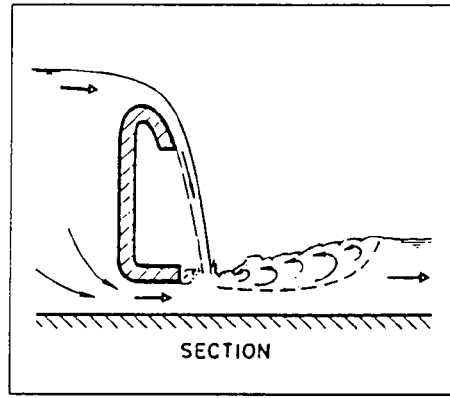


Fig. 4

a

b

c

d

Fig. 3. Energy dissipation by counterflow

Fig. 4. Energy dissipation by counterflow (continued from Fig. 3)

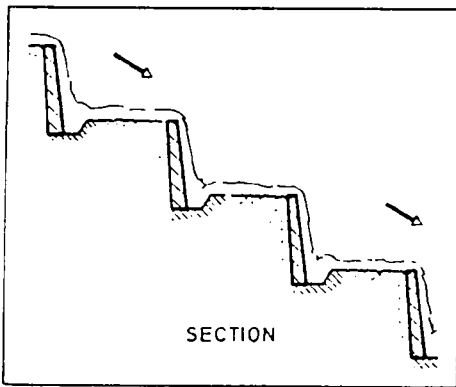
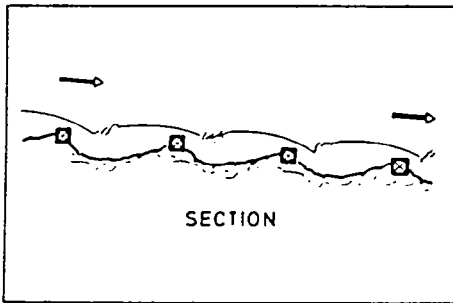
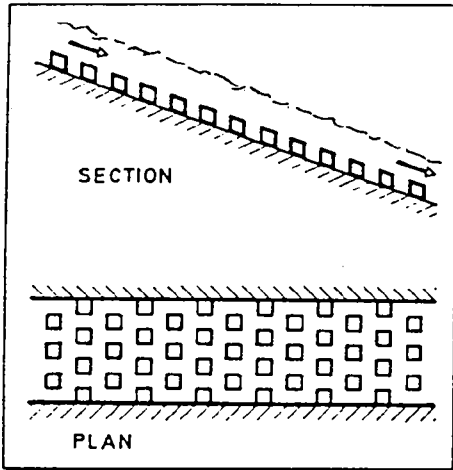
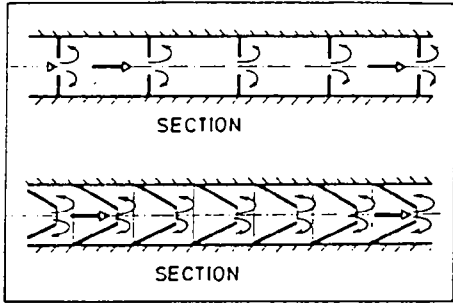


Fig.5

a

b

c

d

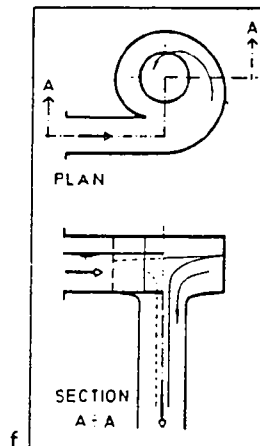
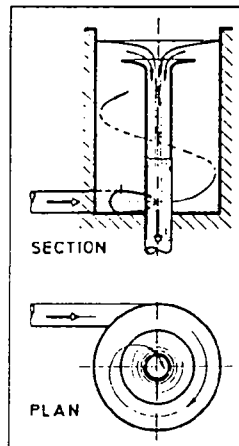
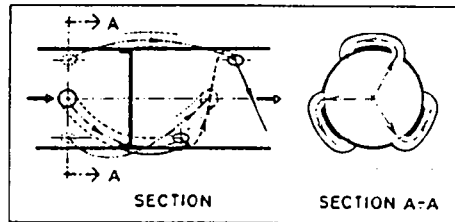
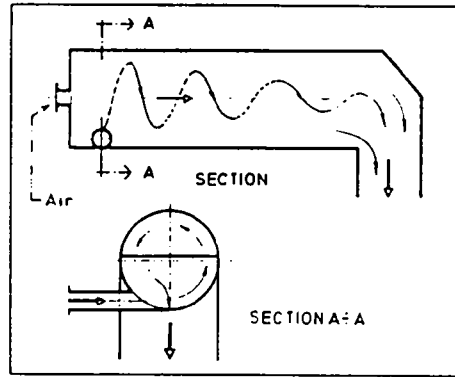
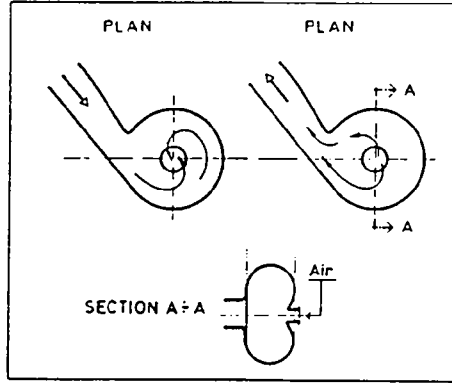
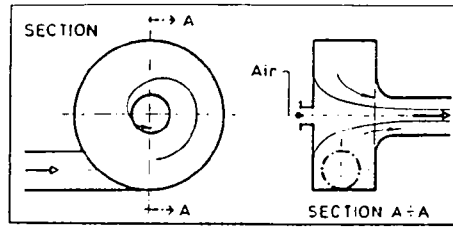


Fig.6

a

b

c

d

e

f

Fig.5. Energy dissipation by rough walls

Fig.6. Energy dissipation with vortex devices

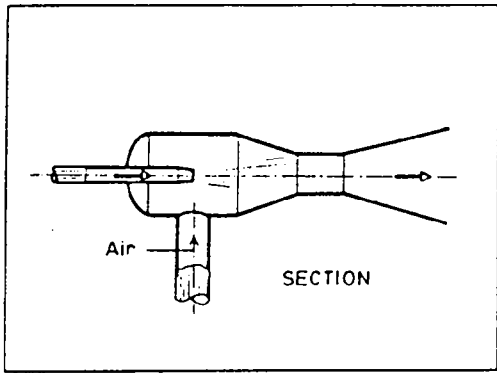
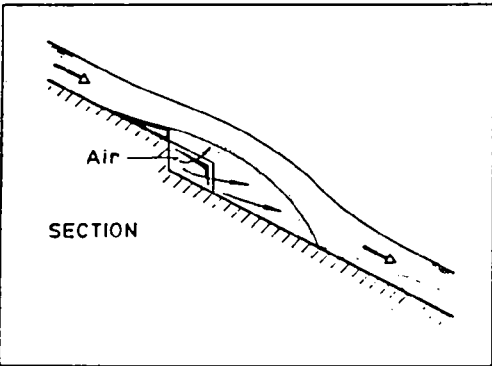
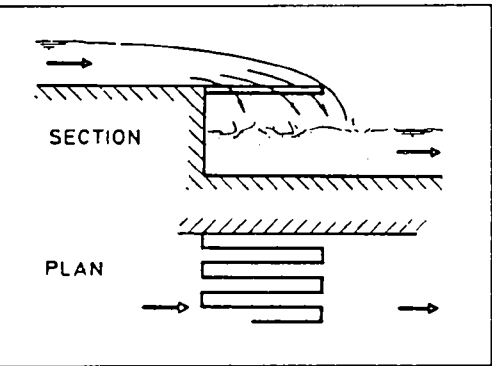


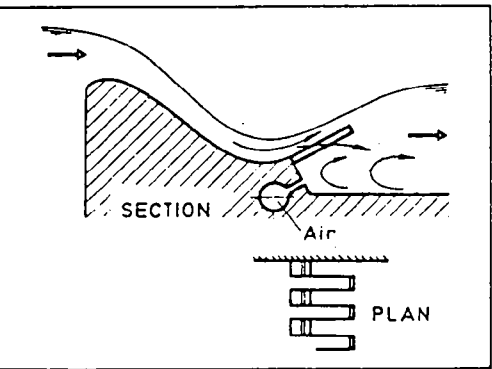
Fig.7



a



b



c

d

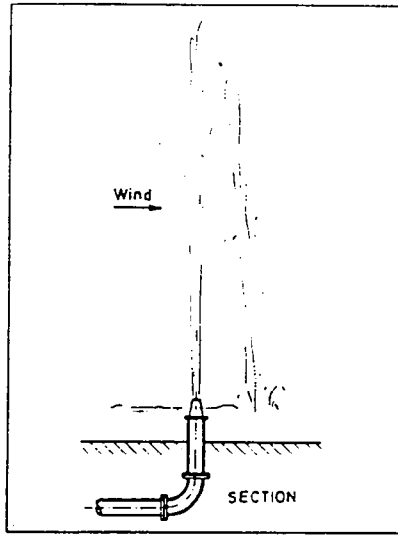
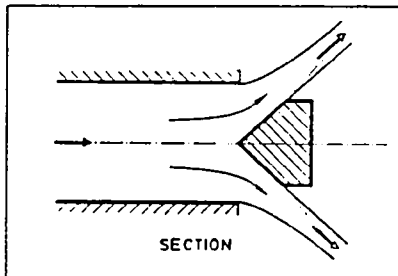
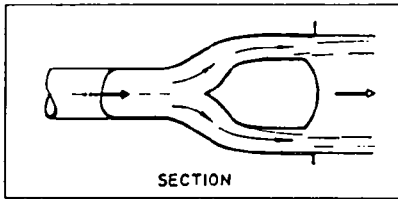


Fig.8

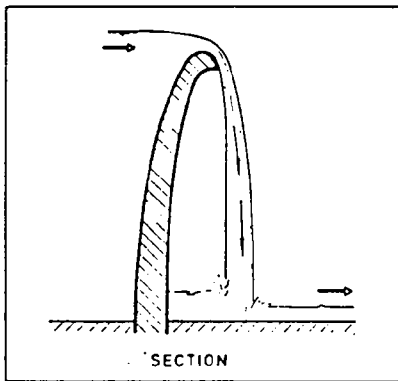
a



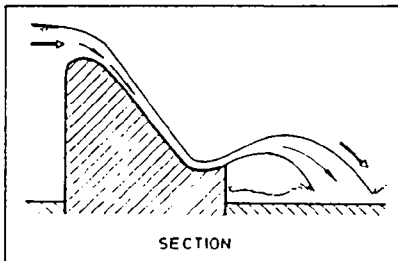
b



c



d



e

Fig.7. Energy dissipation by air entrainment

Fig.8. Energy dissipation by jet diffusion

Energievernichter im Wasserbau

Schweizer Ingenieur und Architekt
Sonderdruck aus Heft 40/1984
Druck: Konrad Bösch AG, 8003 Zürich

Energievernichter im Wasserbau

Von Daniel Vischer, Zürich

In Form von Tosbecken, Toskammern, Wirbelkammern usw. werden im Wasserbau zahlreiche Einrichtungen verwendet, die man als Energievernichter bezeichnet. Sie dienen dazu, die potentielle und die kinetische Energie einer Strömung – das heisst deren hydraulische Energie – teilweise in Wärme umzuwandeln. Diese Konversion ist dort erwünscht, wo die ungedämpfte Strömung zu stark oder zu turbulent ist und Schäden anrichtet, beispielsweise durch Erosion. Hier wird eine Übersicht über die verschiedenen Typen von Energievernichtern vermittelt. Dabei wird der Versuch gewagt, eine kleine Typologie zu entwickeln. Einige konkrete Ausgestaltungsmöglichkeiten werden in Skizzen vorgestellt und näher beschrieben. Das Ziel des Verfassers ist es, dem projektierenden Wasserbau-Praktiker das Lösungsfeld aufzuzeigen.

Das Wesen der Energievernichtung

Was ist «Energievernichtung»?

Fällt ein Wassertropfen über eine Schwelle in ein Tosbecken und kommt er dort zur Ruhe, so wird seine gesamte Fallenergie und damit seine hydraulische Energie in Wärme *umgewandelt*. Bei einer Fallhöhe von 100 m verursacht das eine Erwärmung des Tropfens um 0,24 °C, sofern man voraussetzt, dass die Wärme ins Wasser und nicht in

die Umgebung geht. Diese Erwärmung ist derart gering, dass sie kaum je interessieren wird. Hingegen ist von Bedeutung, dass ihre Erzeugung mit einer Verpuffung und damit einer Vernichtung der hydraulischen Energie verbunden ist.

Für den *Wasserbauer* bedeutet Energievernichtung folglich eine Vernichtung von hydraulischer Energie. Sie ist dort erwünscht, wo eine ungebrochene hydraulische Energie Schäden, beispielsweise in Form von Erosion, anrichten könnte.

Wie geschieht Energievernichtung?

Jeder Wassertropfen, der sich bewegt, verliert unterwegs an hydraulischer Energie. Die Ursache liegt in Widerständen, die im Wasserbau durchweg turbulenter Natur sind.

Bewegt sich ein *Tropfen im Wasser*, so ist er Teil einer turbulenten Strömung. In dieser hängen die Energieverluste mit der Existenz von kleinen, energiezehrenden Wirbeln zusammen. Solche Wirbel entstehen nicht irgendwo, sondern werden von Wänden und Scherflächen emittiert, also von Zonen mit grossen Geschwindigkeitsgradienten. Will man in einer Strömung grosse Energieverluste erzeugen, muss man folglich für solche Zonen sorgen. Das geschieht auf mannigfache Weise durch Hindernisse, die der Strömung in den Weg gelegt werden.

Bewegt sich ein *Tropfen in der Luft*, so wird er durch Luftwiderstand gebremst, und zwar um so mehr, je kleiner sein Durchmesser ist und je mehr seine Geschwindigkeit von jener der angrenzenden Luft abweicht. Deshalb kann man die Energie einer Strömung auch vernichten, indem man das Wasser in Gischt, das heisst in eine Wolke

von möglichst feinen Tropfen, verwandelt.

Energievernichtung lässt sich also einerseits durch *Stören* und andererseits durch *Versprühen der Strömung* erreichen. Von einer konzentrierten Energievernichtung spricht man, wenn diese Massnahmen auf engem Raum wirken.

Möglichkeiten der konzentrierten Energievernichtung

Die Möglichkeiten, die hydraulische Energie einer Strömung *auf engem Raume*, das heisst beispielsweise in einem Tosbecken oder in einer Toskammer, zu vernichten, sind äusserst mannigfaltig. Sie lassen sich mit folgenden Stichworten charakterisieren:

- (a) Schaffung von grossen Geschwindigkeitsgradienten mit *Störungen*, und zwar mit
- plötzlichen Erweiterungen
 - scharfen Krümmern
 - Blenden
 - Schwellen und Gegenswellen
 - Zahnreihen und Prallwänden
 - Gegenströmungen
 - grossen Wandrauigkeiten
 - Wirbelkammern
 - eventuell Belüftern
- (b) *Versprühen* durch Erzeugung grosser und stark turbulenter Kontaktflächen zwischen Wasser und angrenzender Luft mit
- aufgerissenen Freistrahlen

Die zugehörigen Typen von Energievernichtern werden weiter unten vorgestellt.

Grenzen der Energievernichtung

Wie erwähnt, bedeutet Energievernichten ein *Stören* oder *Versprühen* der Strömung und folglich eine entsprechende Ausbildung der Energievernichter, wie Tosbecken, Toskammern, Druckminderer usw. Diese Ausbildung steht im *Gegensatz zu einer hydrodynamischen Gestaltung*, die ja auf eine möglichst störungsfreie Strömung abzielt. Als Folge dieses Gegensatzes werden die Energievernichter stark beansprucht durch

- Pulsation
- Erosion
- Abschleiß
- Kavitation.

Daher müssen die Energievernichter dieser Beanspruchung angepasst und verhältnismässig *robust konstruiert* werden. Sie bestehen im Wasserbau denn auch meist aus Beton oder aus Stahl.

Nun gibt es allerdings kein Material, das einer starken Kavitation dauernd standhält. Deshalb setzt die *Kavitationsgefahr* der Energievernichtung be-

stimmte Grenzen. Ebenso gibt es kaum ein Material, das dem Abschleiß durch stark feststoffbefruchtetes Wasser widersteht und dessen Einsatz sich wirtschaftlich rechtfertigen lässt.

Typen von Energievernichtern

Die Morphologie der Energievernichter

Der Verfasser kennt keine Publikation, in der die Morphologie der Energievernichter dargestellt wird. Es wäre deshalb verlockend, hier ein *morphologisches Gitter* der Energievernichter zu erarbeiten. Denn dabei liessen sich bestimmt noch einige Lücken erkennen beziehungsweise einige bisher unbekannt (oder höchstens abseitig angewendete) Typen erfinden. Dies würde den hier gegebenen Rahmen jedoch sprengen, weshalb darauf verzichtet wird.

Immerhin folgt die nachstehende Typenaufzählung den bereits erwähnten Stichworten und damit einem *Ordnungsprinzip der Energievernichtung* mittels:

- plötzlicher Erweiterung und scharfer Umlenkung
- Gegenströmung
- Rauhgerinne
- Wirbelement
- Belüfter
- Versprüher

Dieses Ordnungsprinzip richtet sich nach den auffälligsten Merkmalen der Energievernichter. Dabei ist bei gewissen Typen zusätzlich zu berücksichtigen, ob sie sich für ein *Druck-* oder für ein *Freilaufgerinne* eignen. Es gibt diesbezüglich (trivialerweise) *vier Möglichkeiten*, nämlich Energievernichtung am Übergang von

- Druck- zu Druckgerinne
- Druck- zu Freilaufgerinne
- Freilauf- zu Druckgerinne
- Freilauf- zu Freilaufgerinne

Ein anderes Ordnungsprinzip liesse sich auf der *Hydraulik der Strahlen* aufbauen. Denn in jedem Energievernichter kann der Zufluss als Strahl aufgefasst werden, dessen Energie in einem erzwungenen Mischprozess aufgezehrt wird. Man kann dann beispielsweise folgende Elemente eines Energievernichters als charakteristisch definieren:

- Strahlart*
- freier Strahl
 - teilweise freier Strahl
 - wandnaher Strahl
gerade/gekrümmt
 - aufgespaltener Strahl
 - rotierender Strahl

- eingemischtes Medium*
- Wasser
 - Luft.

Energievernichtung mittels Erweiterung und Umlenkung (Bilder 1 und 2)

Bild 1a zeigt die *einfache Erweiterung* eines Rohrs. Es handelt sich um den in dieser und in abgewandelter Form verbreitetsten Energievernichter. Sein Verlust, der berühmte Borda-Carnot-Verlust, lässt sich leicht berechnen. Er wird auch etwa als Stossverlust bezeichnet: Eine schnelle Strömung stösst gleichsam auf eine langsame und erzeugt Ablösungen und damit Zonen grosser Geschwindigkeitsgradienten.

Bild 1b hält schematisch eine *einfache Blende* fest. Diese erzeugt sowohl eine Verengung als auch eine Erweiterung der Strömung. Dabei wirkt vor allem die Erweiterung als Energievernichter. Die abrupte Verengung resultiert in einer starken Kontraktion und damit praktisch in einer Verstärkung der Erweiterung.

Neben diesen einfachen Formen werden zahlreiche *komplizierte Erweiterungen und Blenden* verwendet. Die Bilder 1c und 1d liefern dafür zwei Beispiele. Solche Formen eignen sich unter anderem dort, wo die Strömungsrichtung ändern kann und wo die Energievernichtung je nach Richtung verschieden sein soll. Dies ist bei gedrosselten Wasserschlossern der Fall (siehe unter anderem *Gardel*[1]).

Bild 2a zeigt den *klassischen Wassersprung* in einem Freilaufgerinne. Er kann als Pendant zur einfachen Erweiterung betrachtet werden. Jedenfalls wirkt er entsprechend und ist ebenso verbreitet. Doch entsteht er bekanntlich nicht durch eine äussere Einwirkung, sondern durch eine Instabilität der Strömung, nämlich durch einen Wechsel von schiessendem zu strömendem Abfluss.

Wo die Instabilität nicht von selbst auftritt, wird sie durch Einbauten aller Art provoziert. Man spricht dann vom *erzwungenen Wassersprung* in einem *Tosbecken*. Bild 2b skizziert die Möglichkeiten im Längsschnitt: Rampen, Gegenswellen, Zahnreihen, Prallwände usw. Es gibt aber auch noch Möglichkeiten im Grundriss: seitliche Erweiterungen oder Verengungen, gerade oder gekrümmte Wände usw. Die Fülle der im Verlauf der Jahre realisierten Formen ist bei diesem Energievernichter überwältigend. Für keinen anderen Typ wurden auch nur annähernd soviel Vorschläge gemacht, Versuche durchgeführt und Bemessungsregeln entwickelt. Hier sei einzig noch der Energievernichter gemäss Bild 2c herausgegriffen, weil er eine Übergangsform vom Tosbecken zur Toskammer zeigt. Es handelt sich um den *Auslass mit Prallwand* (siehe *Peterka* [2]).

Auch der frei ins Wasser fallende Strahl erfährt eine abrupte Erweiterung und wird dadurch stark gebremst. Voraussetzung für eine gute Energievernichtung ist eine im Verhältnis zur Strahldicke genügend grosse Wassertiefe, also ein sogenanntes Wasserpolster. Der Strahl kann wie in Bild 2d senkrecht oder aber auch schräg auf das Wasserpolster auftreffen. Ein zu wenig tiefes Wasserpolster lässt sich mit Schikanen wie Zahnreihen, Schwellen usw. in ein Tosbecken umwandeln und wirksamer gestalten. Im Unterschied zum freifallenden Strahl zeigen die Bilder 2e und 2f einen geführten Strahl, der in einem Toschacht ausmündet. Dort wird er mittels Drosselungen, Erweiterungen und Umlenkungen verwirbelt.

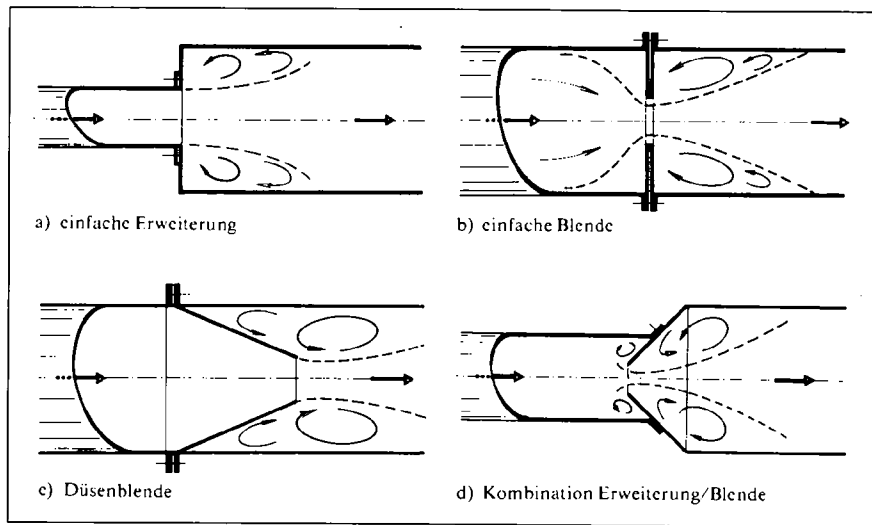


Bild 1. Energievernichtung mittels Erweiterung und Umlenkung. Beispiel: Rohrquerschnitte

Energievernichtung mittels Gegenströmung (Bilder 3 und 4)

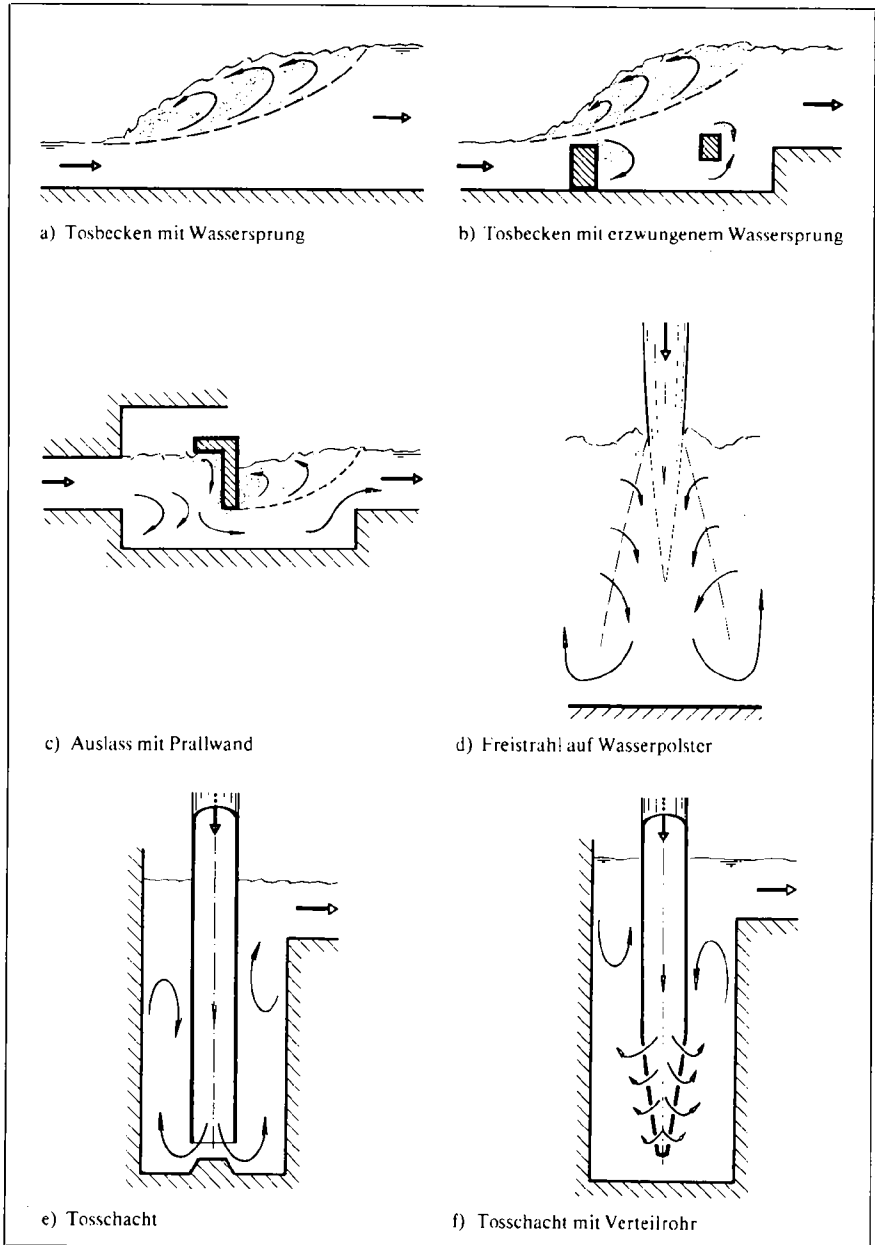
Es ist naheliegend, die Energie eines ankommenden Strahls dadurch zu vernichten, dass man ihn in zwei oder mehr Strahlen aufteilt, die man gegeneinander lenkt. Dieses Vorgehen wird hier als Prinzip der Gegenströmung bezeichnet. Es wird bis zu einem gewissen Grad bereits bei den im vorangehenden Abschnitt geschilderten Typen angewendet, in sichtbarster Form wohl bei den Toschächten der Bilder 2e und 2f.

Doch gibt es Energievernichter, bei denen die Gegenströmung ein Hauptmerkmal ist. Bild 3a zeigt einen Vorschlag von Haindl [3] für eine Toskammer mit Konus. Die Düse kann mit einer Nadel ergänzt werden, um den Durchfluss zu regulieren.

Die in Bild 3b dargestellte Toskammer mit gelochtem Verteilrohr ist das Pendant zum Toschacht von Bild 2f. Sie macht vom Gegenstromprinzip ebenfalls Gebrauch. Doch wird sie diesbezüglich von der Toskammer mit gelochtem Sammelrohr gemäss Bild 3c noch übertroffen. Diese lässt sich mit feinen Löchern sehr wirksam gestalten und wird in Druckleitungen etwa als fester Druckreduzierer eingesetzt. Eine Abart davon, die häufig als regulierbares Druckreduzierventil verwendet wird, zeigt Bild 3d.

Beim Gegenstromprinzip ist wichtig, dass die verschiedenen Strahlen etwa gleich gross sind und möglichst frontal aufeinanderprallen. Die dabei entstehenden Stossverluste sind dann besonders gross. Ein Tosbecken nach Bild 3e, wo sich zwei etwa gleich starke und gleich schnelle Strahlen unter einem spitzen Winkel vereinen, bietet natürlich keine Gewähr für eine gute Energievernichtung (siehe Koch [4]). Denn es entstehen dabei ja keine grossen Geschwindigkeitsgradienten. Vielleicht

Bild 2. Energievernichtung mittels Erweiterung und Umlenkung. Beispiel: Tosbecken und Toschächte (Schnitte)



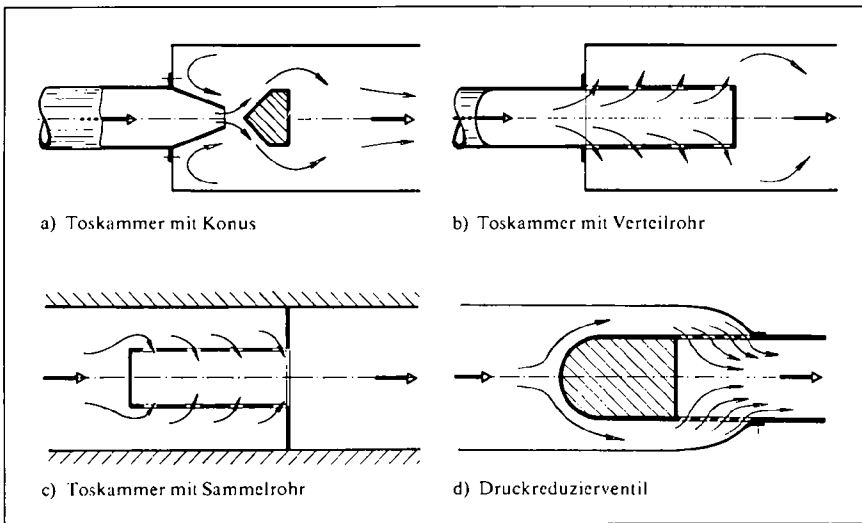


Bild 3a-3d. Energievernichtung mittels Gegenströmung. Beispiel: Toskammern und Druckreduzierventil (Schnitte)

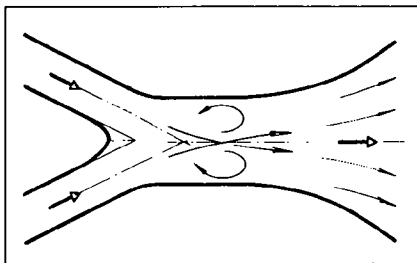


Bild 3e (links). Gegenströmung in Tosbecken mit zwei Zuflüssen (Grundriss)

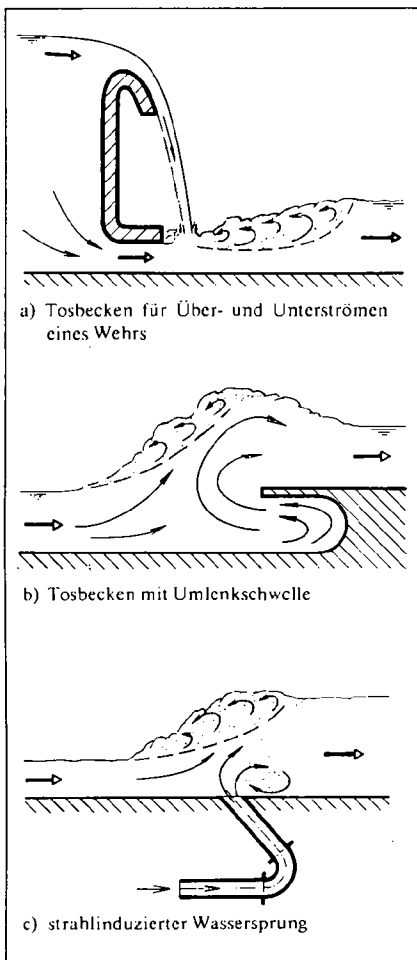
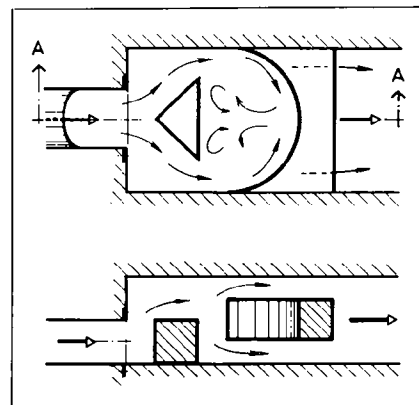


Bild 4a-4c (links). Energievernichtung mittels Gegenströmung (Schnitte)

Bild 4d. Gegenstrom-Tosbecken (Grundriss oben, Schnitt A-A unten)



wird dabei aber eine günstige Versprühung erreicht, ein Vorteil, der weiter unten beschrieben wird.

Etwas wirksamer ist ein Zusammenführen zweier Strahlen gemäss Bild 4a. Diese Konstellation ergibt sich häufig bei Wehren mit Doppelschützen, beispielsweise mit Hub- und Hakenschützen. Der überfallende Strahl stört den abströmenden ähnlich wie die in Bild 2c skizzierte Prallwand und begünstigt die Energievernichtung im anschließenden Tosbecken.

Eine interessante Lösung für feststoffarmes Wasser hält Bild 4b fest. Sie könnte als *Tosbecken mit Umlenkschwelle* bezeichnet werden. Die Funktionsweise entspricht jener des erzwungenen Wassersprungs von Bild 2b. Damit verwandt ist auch die Lösung gemäss Bild 4c mit dem *strahlinduzierten Wassersprung*. Wie es ihr Name anzudeuten versucht, dient die vergleichsweise kleine Gegenströmung nicht primär dazu, Stossverluste zu erzeugen, sondern den Wassersprung zu begünstigen (siehe Kao in [5]).

Von *Vollmer* [6] stammt die in Bild 4d erläuterte Idee des *Gegenstrom-Tosbeckens* bzw. der *Gegenstrom-Toskammer*. Dieser Energievernichter ist sehr kompakt und leistungsfähig.

Energievernichtung mittels Rauherinnen (Bild 5)

Es leuchtet ohne weiteres ein, dass auch extrem raue Gerinne die Energie eines Zuflusses auf einer kurzen Strecke vernichten können. Die erforderliche Rauigkeit lässt sich dabei auf verschiedenste Weise gewährleisten. Naheliegender ist es, die in den vorangehenden beiden Abschnitten vorgestellten Energievernichter in Serie einzusetzen.

Als Beispiel hält Bild 5a fest, wie eine *Kaskade von Blenden* ein Rohr extrem rau macht. Eine solche Lösung wurde schon verschiedentlich für Grundablässe vorgeschlagen, beispielsweise von *Ingerle* [7]. Doch sind entsprechende Ausführungen im Wasserbau selten. Das Bedürfnis nach Kaskaden entsteht eher in der Industrie. Dort wurden nach *Hutarew* [8] auch schon Serien des Druckreduzierers von Bild 3c eingesetzt, um Drucküberschüsse bis zu 400 bar bzw. 4000 m Wassersäule abzudrosseln.

Sehr verbreitet sind hingegen kurze *Schussrinnen mit Höckern, Rippen und Schwellen* nach Bild 5b. Auch die heute im Flussbau so beliebten Blockrampen gehören zu dieser Gattung von Energievernichtern. Für Schussrinnen bis 50% Gefälle schlägt *Peterka* [2] Höcker vor, deren Höhe 80% der kritischen Tiefe beträgt. Dies zeigt, wie bedeutend diese

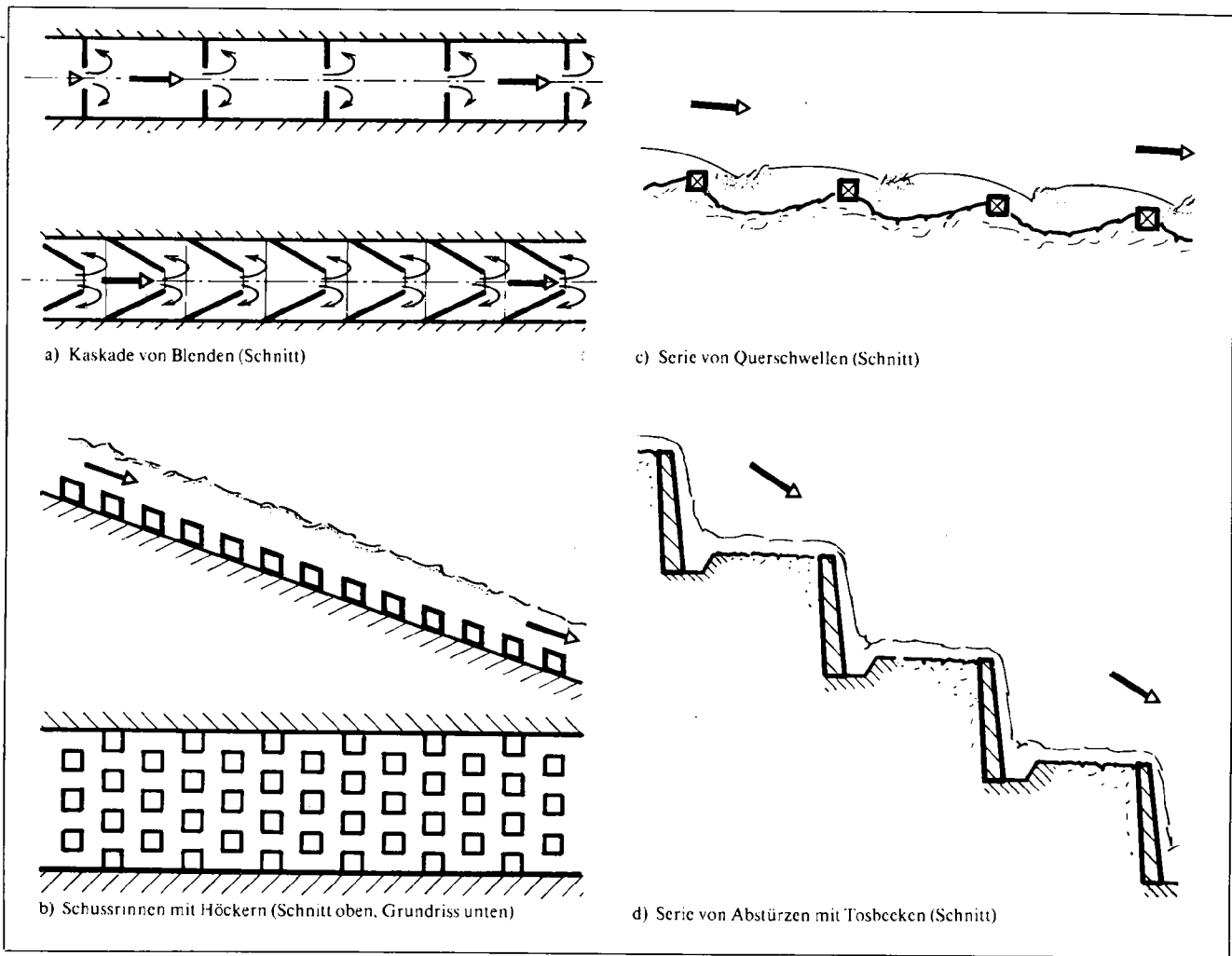


Bild 5. Energievernichtung mittels Rauherinnen

Störkörper und Rauigkeitselemente sein können.

Schliesslich seien hier noch die *tatsächlichen Kaskaden* erwähnt, wie sie im Flussbau und Wildbachverbau als Erosionsschutz verwendet werden. Bild 5c zeigt eine Lösung für geringes Gefälle mit Querschwellen, Bild 5d eine solche für grosses Gefälle mit Absturzbauwerken.

Energievernichtung mittels Wirbel-elementen (Bild 6)

Während die meisten der bisher vorgestellten Energievernichter seit langem bekannt und verbreitet sind, handelt es sich bei den Wirbelelementen um Entwicklungen, die zwar auf alten Ideen beruhen (siehe Thoma [9]), aber erst in neuerer Zeit Beachtung finden.

Bild 6a hält gleichsam den Grundtyp fest, der in Europa als *Wirbelkammerdiode* oder *Wirbeldrossel* bezeichnet und erfolgreich von Brombach [10] propagiert wird. In Amerika ist der gleiche Typ unter dem Namen *Hydrobrake* bekannt. Der Zufluss tritt tangential in einen flachen Zylinder ein und be-

schreibt dort annähernd eine logarithmische Spirale, bis er den axialen Ausgang erreicht und als rotierender Strahl abfliest. Dabei wird ein Teil seiner Energie vernichtet. Wenn der Abfluss von unten her eingestaut wird, empfiehlt sich eine axiale Belüftungsöffnung. Solche Wirbeldrosseln bzw. Hydrobrakes werden zumeist in der Kanalisationstechnik als selbsttätige Abflussorgane von Regenüberläufen und kleinen Regenbecken eingesetzt.

Eine interessante Anwendung der Wirbeldrossel ist die sogenannte *Rückstromdrossel* gemäss Bild 6b. Sie wird in Österreich seit etwa 10 Jahren als Drossel für Wasserschlösser von Speicherkraftwerken eingesetzt. Ihre Aufgabe ist es, dort dem Aufschwung des Wasserschlossspiegels einen geringen, dem Abschwung aber einen grossen Widerstand entgegenzusetzen. Das Verhältnis der zugehörigen Verlustbeiwerte beträgt nach Gspan [11] 1:10 bis 1:40, je nach Ausführung. Beim Rückstrom vernichtet die Rückstromdrossel also 10- bis 40mal mehr Energie.

Unter anderem konstruiert die Firma *Hydro-Progress* (Schweiz) schon seit

längerer Zeit Energievernichter in Form von *Wirbelrohren* oder *Wirbeltrommeln* gemäss Bild 6c. Der Zufluss wird tangential in die belüftete Trommel geleitet und durchströmt diese ohne besondere Vorkehrungen schraubenförmig. Seine Energie wird dabei vornehmlich durch Reibung vernichtet. Diese Art von Energievernichtern gelangt beim Entleeren von Druckschächten und Druckleitungen von Wasserkraftanlagen zum Einsatz.

Am Kongress der International Association for Hydraulic Research (IAHR) vom September 1983 in Moskau stellten einige Mitarbeiter von *Hydroprojekt* (UdSSR) einen von ihnen entwickelten Energievernichter vor. Leider sind ihre Beiträge (Seminar 3) noch nicht veröffentlicht worden, so dass sich der Verfasser auf sein Gedächtnis verlassen muss: Der Energievernichter soll in den Leerschuss eines Hochdruckkraftwerkes eingebaut werden. Er erzeugt in einem Rohr eine schraubenförmige Strömung, indem er den Zufluss aufspaltet und dann in mehreren Leitungen tangential wieder einleitet. Bild 6d versucht dies anzudeuten. Die

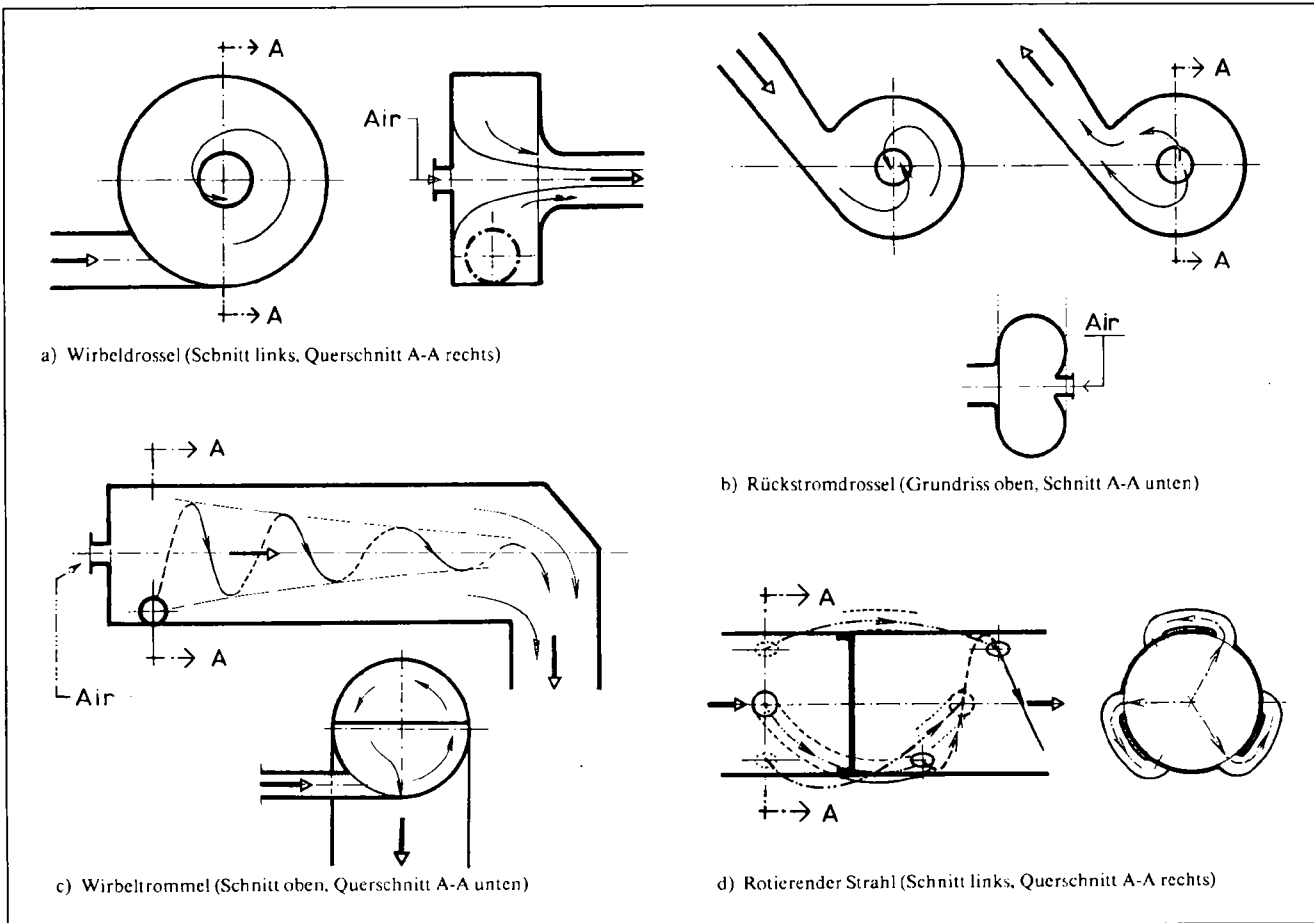


Bild 6a-6d. Energievernichtung mittels Wirbelelementen

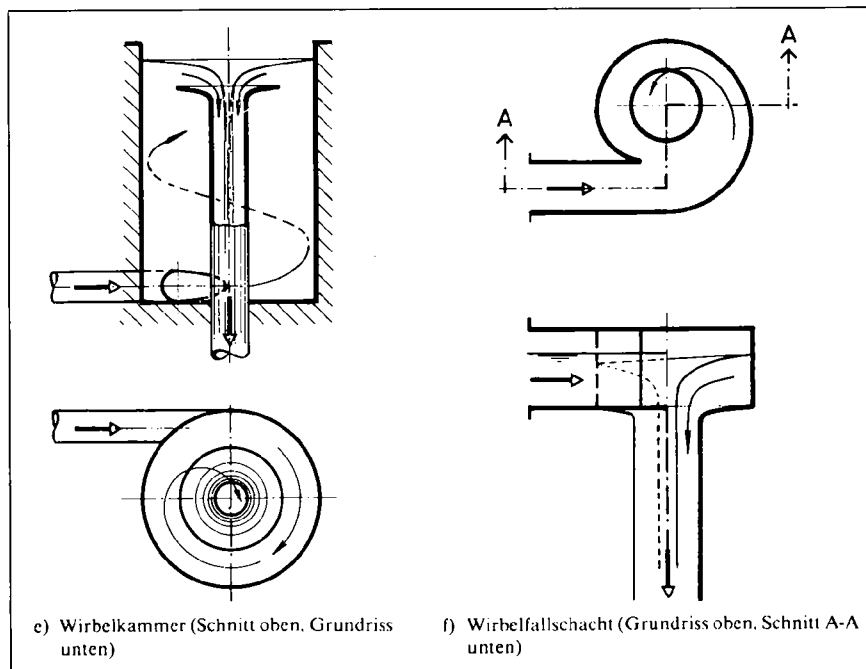


Bild 6e und 6f. Energievernichtung mittels Wirbelelementen

Energievernichtung erfolgt aufgrund einer starken Verzögerung und Rotation. Auf die näheren Einzelheiten darf man gespannt sein.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit der Wirbeldrossel ist die in Bild 6e skiz-

zierte *Wirbelkammer* mit freiem Spiegel. Sie stellt gleichsam eine Übergangsform zum heute in Europa sichtlich beliebt gewordenen *Wirbelfallschacht* dar. Dieser besteht gemäss Bild 6f aus einem Spiraleinlauf und einem vertikalen Schacht. Der Spiraleinlauf sorgt da-

für, dass sich der Zufluss an die Schachtwand legt, von der er sich infolge des Atmosphärendruckes nicht mehr ablöst. Er beschreibt folglich im Schacht eine schraubenförmige Bahn mit zunehmendem Vorschub. Bei längeren Schächten fliesst er schliesslich vertikal ab, gleichsam als Freilaufabfluss mit dem Gefälle 1 (als Sinus ausgedrückt). Die Energievernichtung geschieht vor allem durch Wandreibung und ist eher bescheiden. Deshalb muss am Schachtfuss eine Toskammer vorgesehen werden. Der Wirbelfallschacht wurde ursprünglich für Zuleitungen zu Druckstollen von Wasserkraftanlagen entwickelt und wird heute vornehmlich für Entlastungsbauwerke in Kanalisationen verwendet.

Energievernichtung mittels Lufteintrag (Bild 7)

Weiter oben wurde unterstrichen, dass die Energievernichtung in einer Strömung einem Mischprozess gleicht. Anschliessend wurden Typen von Energievernichtern vorgestellt, bei denen gleichsam schnelles Wasser mit langsamem oder mit entgegenströmendem Wasser vermischt und dadurch abgebremst wird. Es stellt sich deshalb die Frage, ob auch ein Vermischen mit Luft energieverzehrend wirkt.

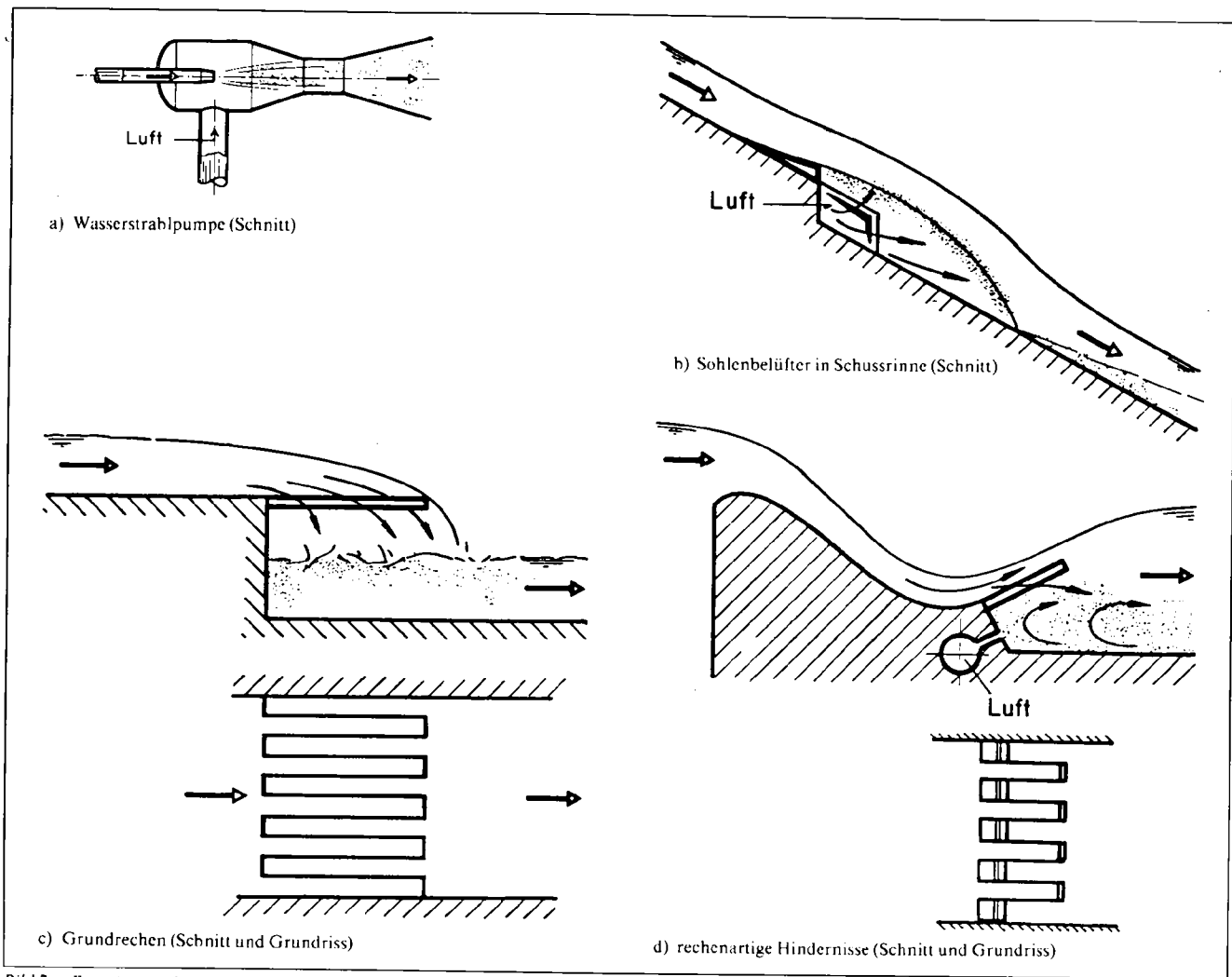


Bild 7. Energievernichtung mittels Lufteintrag

Bild 7a zeigt eine *Wasserstrahlpumpe* als Beispiel für ein industriell genutztes Mischrohr: Das Antriebswasser schießt als Strahl mit hoher Geschwindigkeit in die Mischkammer, versprüht dort und saugt Luft an. Aus dem Mischrohr tritt dementsprechend ein Wasser-Luft-Gemisch. Genau nach diesem Prinzip arbeiten auch die *Sohlen-Belüfter*, die neuerdings auf Schussrinnen als Massnahme gegen die Kavitation eingesetzt werden. Bild 7b hält ein Beispiel fest, das schon mehrfach verwirklicht worden ist und heute für Schussrinnen mit spezifischen Abflüssen bis $260 \text{ m}^3/\text{sm}$ und Fließgeschwindigkeiten bis 50 m/s vorgesehen wird. Dabei werden sohlennahe Luftkonzentrationen in der Größenordnung von 50% (gleichviel Luft wie Wasser) erreicht.

Leider ist die Energiebilanz eines solchen Sohlen-Belüfters nicht bekannt. Jedenfalls hat der Verfasser noch keine einschlägigen Angaben gesehen. Er vermutet aber, dass die resultierende Energievernichtung unbedeutend ist. Zwar fließt das Wasser-Luft-Gemisch langsamer ab als das reine Wasser, weist aber eine grössere Tiefe auf. Die hydraulische

Energie der Strömung dürfte sich folglich im Bereich des Belüfters nur wenig verändern. Dabei ist es selbstverständlich, dass sich die Änderung grundsätzlich als Energieverlust manifestiert, weil jeder solche Mischprozess als unelastischer Stoss verlustbehaftet ist. Bei diesem Mischprozess wird aber in das vorbeischießende Wasser ein pro Volumeneinheit rund 1000mal leichteres Medium, nämlich Luft, eingemischt, so dass selbst bei hohen Luftkonzentrationen keine grossen Stossverluste entstehen können.

Luft eintrag allein gewährleistet demnach wahrscheinlich keine genügende Energievernichtung. Er kann aber vielleicht andere Energievernichtungsmassnahmen unterstützen. Die Aussagen von *Herbrand* [12] klingen allerdings nicht ermutigend. Er sagt aus, dass der natürliche Lufteintrag in ein Tosbecken mit Wassersprung für dessen Wirksamkeit praktisch bedeutungslos ist. Vielleicht gibt es aber Belüfter, die hinsichtlich Energievernichtung wesentlich mehr bringen als der in Bild 7b gezeigte Sohlen-Belüfter oder irgendein natürlicher Lufteintrag.

Zwei Möglichkeiten, gegebenenfalls einen Belüfter mit einem gewöhnlichen Energievernichter zu kombinieren, sind in den Bildern 7c und 7d skizziert. Die erste wurde von *Peterka* [2] für kleine Tosbecken beschrieben und gleicht dem *Grundrechen* der Tiroler Fassungen. Sie wirkt vor allem durch die Auffächerung und Ablenkung des Überfallstrahls energiezehrend. Die zweite entspricht einem Vorschlag der *Sogreah* (Frankreich) [13] und ist primär als *Belüfter mit Schikanen* gedacht und erst sekundär als Energievernichter. Ähnliche Lösungen sind in Italien seit längerer Zeit unter dem Namen *Dissipatori a griglia di fondo* bekannt (siehe *Viparelli* [14]).

Energievernichtung mittels Versprühen

Wenn vorhin vermutet wurde, dass Lufteintrag nicht stark energiezehrend wirke, so bedarf dies einer Ergänzung: Erreicht der Lufteintrag nämlich ein Ausmass, bei dem die Strömung versprüht wird, so kann die Energievernichtung sehr bedeutend werden. Dies hängt damit zusammen, dass das Medium wechselt. Im einen Fall handelt es

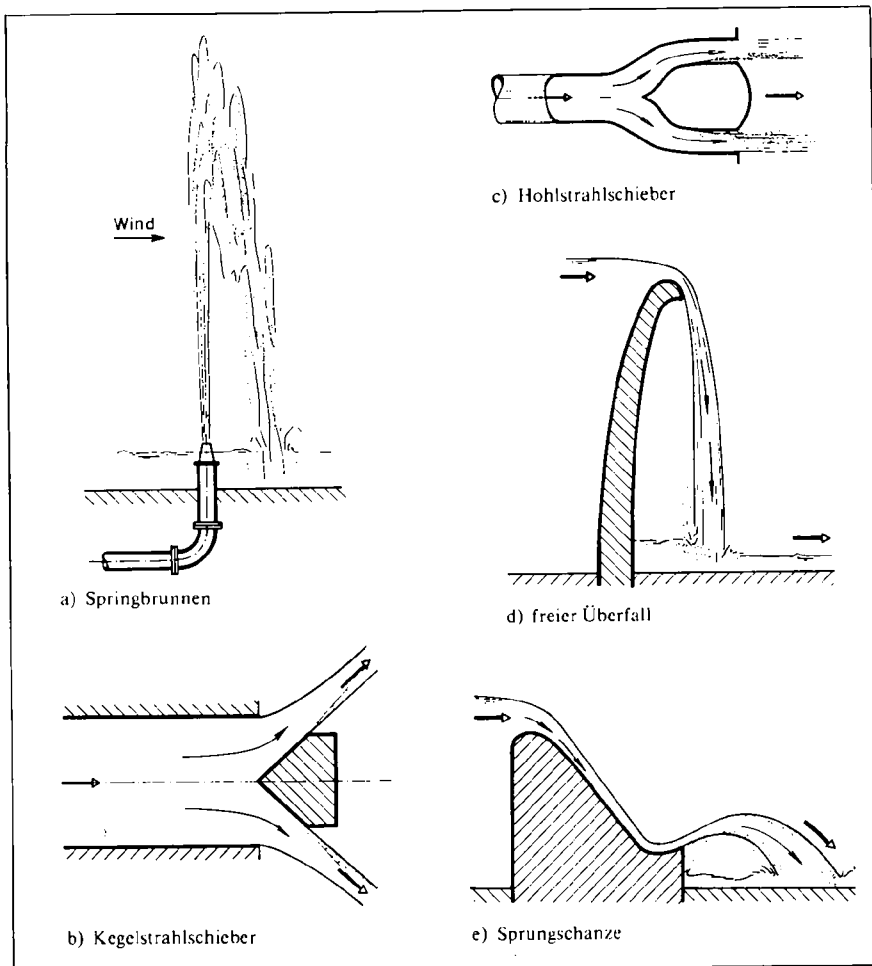


Bild 8. Energievernichtung mittels Versprühen (Schnitte)

sich um Wasser mit Luftblasen, im anderen um Wassertropfen in Luft. Und diese Wassertropfen werden, sofern sie klein sind und gegenüber der benachbarten und eingemischten Luft eine genügende Relativgeschwindigkeit aufweisen, durch den Luftwiderstand stark gebremst.

Das klassische Beispiel eines Versprühers ist der *Springbrunnen* (Bild 8a). Er wird aber gewöhnlich zur Zierde und nicht als Energievernichter eingesetzt. Es ist jedoch interessant zu vermerken, dass der bekannte Springbrunnen von Genf, der heute einen Hohlstrahl von $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ rund 140 m hoch fördert, im letzten Jahrhundert als Energievernichter der städtischen Druckwasserversorgung konzipiert wurde.

Im Grunde genommen wird dasselbe Prinzip heute mit den *Kegelstrahlschiebern* (Bild 8b) und *Hohlstrahlschiebern* (Bild 8c) verwirklicht, nur dass der entstehende Hohlstrahl stärker aufgefächert, meist horizontal gerichtet und eventuell in ein Tosbecken gelenkt wird. Diese Schieber sind so konstruiert, dass sie die Oberfläche des Strahls vervielfachen und damit den Lufteintrag bzw. das Versprühen fördern. Sie werden vor allem in Grundablässen und Leerschüssen eingesetzt.

Bei Hochwasserentlastungen dienen der *freie Überfall* (Bild 8d) und die *Sprungschanze* (Bild 8e) dazu, den Zufluss zu versprühen. Der Erfolg ist jedoch meist unvollständig, weil die Strahlen zu mächtig sind und bis zu ihrem Auftreffen im Unterwasser nicht ganz aufgelöst werden, sondern gleichsam einen harten Kern aus Wasser behalten. Die Auflösung lässt sich aber stark fördern, indem die Überfallkrone und der Sprungschanzentisch mit Störkörpern, sogenannten Strahlaufreissern, bestückt werden.

Selbstverständlich gibt es noch zahlreiche andere Möglichkeiten, um einen Strahl zu versprühen. Diese erheischen im allgemeinen nur kleine Aggregate oder Bauwerke, beanspruchen aber für die eigentliche Energievernichtung verhältnismässig viel Raum.

Schlussbemerkung

Die vorliegende Typologie der Energievernichter ist sicher mit gewissen Mängeln behaftet. So sind die Abschnitte über Energievernichtung mittels Rauherinnen und Versprühern etwas kurz geraten. Auch hätten neben den 38

Literatur

- [1] Gardel, A.: «Perte de charge dans un étranglement conique». Bulletin Technique de la Suisse Romande 88 (1962) 21, 313-337.
- [2] Peterka, A.J.: «Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators». Engineering Monograph No. 25, USBR, Washington: US Printing Office 1964
- [3] Haindl, K.: «Stilling device of mechanical energy of water jet discharging from a high pressure conduit». Proc. ICOLD-Congress New Delhi 1979, Q. 50, R. 34, 577-590
- [4] Koch, K.: «Die gegenseitige Strahlablenkung auf horizontaler Sohle». Bericht Nr. 18, Versuchsanstalt für Wasserbau, Universität München, 1968
- [5] Kao, T.K.: «Hydraulic jump assisted by cross jet». Proc. ASCE HY 12 (Dec. 1971), 2037-2050
- [6] Vollmer, E., Khader, M.H.A.: «Counter-current energy dissipator for conduit outlets». Water Power and Dam Construction (July 1971), 260-263
- [7] Ingerle, K.: «Ein neuartiger Grundablass mit der Energieumwandlung im Stollen». Die Wasserwirtschaft 9 (1971), 271-275
- [8] Hutarew, G.: Technische Hydraulik, Auflage 2, Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1973
- [9] Thoma, D.: «Die Rückstromdrossel». VDI-Zeitschrift 74 (1930/31), 1098
- [10] Brombach, H.: «Mehr als 500 Wirbeldrosseln im Einsatz». Wasserwirtschaft 72 (1982) 1, 25-26
- [11] Gspan, J.: «Untersuchungen an der hydraulischen Rückstromdrossel von Wasserschlössern». Wasserwirtschaft 69 (1979) 12, 376-379
- [12] Herbrand, K.: «Der Wechselsprung unter dem Einfluss der Luftbeimischung». Die Wasserwirtschaft 59 (1969) 9, 1-7
- [13] Comité Français des Grands Barrages, Groupe de Travail: «Quelques problèmes particuliers posés par les déversoirs à grande capacité». Proc. ICOLD-Congress New Delhi 1979, Q. 50, R. 38, 649-673
- [14] Viparelli, C.: «Dissipatori a griglia di fondo». Bericht Nr. 148 des Istituto di Idraulica e costruzioni idrauliche della Università di Napoli (ohne Jahrzahl, schätzungsweise 1960)

skizzierten Beispielen noch zahlreiche weitere angegeben werden können. Vielleicht wurden gar einige Lösungen übersehen, die sich im Wasserbau bereits bewährt haben oder die in anderen Fachgebieten - etwa in der Aerodynamik oder Flüssigkeitstechnik - üblich sind und im Wasserbau Eingang finden sollten. Der Verfasser, der seine Typologie ergänzen möchte, bittet um entsprechende Hinweise.

An sich erlaubt aber schon diese unvollkommene Darstellung einen interessanten Einblick in die Vielfalt der verwendeten Formen und zeigt eine faszinierende Seite des Wasserbaus: *den unablässigen Kampf mit den überschüssigen Kräften des Wassers!*

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. D. Vischer, Direktor der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH, 8092 Zürich.