Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 88 (1996)

Heft: 10

Artikel: Aménagements hydroélectriques à accumulation et protection contrle les crues = Speicherkraftwerke und Hochwasserschutz

Autor: Biedermann, Rudolf

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940371

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 12.02.2026

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

Table des matières

page

1. Introduction 221
2. Conditions hydrologiques en cas de crue dans le canton du Valais et tronçons critiques des cours d'eau 221
   2.1 Situation en cas de crue 221
   2.2 Tronçons critiques des cours d'eau 225
   2.3 Résumé 225
3. Contribution des aménagements à accumulation à la protection contre les crues 227
   3.1 Contribution générale 227
      3.1.1 Caractéristiques et fonctionnement d'une retenue 228
      3.1.2 Effet du stockage en cas de crue 229
      3.1.3 Effet du turbinage en cas de crue 236
      3.1.4 Effet des adductions en cas de crue 237
      3.1.5 Résumé 238
   3.2 Contribution apportée lors des crues de 1987 et 1993 240
      3.2.1 Rhône 240
      3.2.2 Doveria 244
      3.2.3 Viège 244
      3.2.4 Résumé 248
4. Stratégies de mise à contribution des aménagements à accumulation en cas de crue 249
   4.1 Stratégie 1: maintien du statu quo 249
   4.2 Stratégie 2: régulation des retenues 250
   4.3 Stratégie 3: conversion en retenues à buts multiples 252
   4.4 Résumé 253
5. Situation juridique 254
6. Coûts 255
   6.1 Pertes de production résultant d'une régulation de retenue 255
   6.2 Réduction de la production résultant d'une conversion en retenue à buts multiples 255
7. Conclusions 257

Appendice: détermination du débit de pointe en un point quelconque à l'aval d'une retenue 260

Liste des barrages suisses
Carte des barrages suisses 262

Inhalt

Seite

1. Ausgangspunkt 221
2. Hochwasserverhältnisse im Kanton Wallis und kritische Gewässerabschnitte 221
   2.1 Hochwasserverhältnisse 221
   2.2 Kritische Gewässerabschnitte 224
   2.3 Zusammenfassung 225
3. Beitrag von Speicherkraftwerken an den Hochwasserschutz 227
   3.1 Beitrag generell 227
      3.1.1 Aufbau und Funktionsweise eines Speichers 228
      3.1.2 Einfluss der Wasserspeicherung im Hochwasserfall 229
      3.1.3 Einfluss des Turbinenbetriebs im Hochwasserfall 233
      3.1.4 Einfluss einer Wasserüberleitung im Hochwasserfall 237
      3.1.5 Zusammenfassung 238
   3.2 Beitrag während der Hochwässer 1987 und 1993 240
      3.2.1 Rhone 241
      3.2.2 Doveria 245
      3.2.3 Vispa 245
      3.2.4 Zusammenfassung 248
4. Strategien für den Einsatz von Speicherkraftwerken im Hochwasserfall 249
   4.1 Strategie 1: Beibehaltung des «status quo» 249
   4.2 Strategie 2: Speicherregulierung 251
   4.3 Strategie 3: Übergang zu einem Mehrzweckspeicher 252
   4.4 Zusammenfassung 253
5. Rechtslage 254
6. Kosten 255
   6.1 Produktionseinbusse als Folge einer Speicherregulierung 255
   6.2 Produktionsschmälerung als Folge des Übergangs zu einem Mehrzweckspeicher 255
7. Schlussfolgerungen 257

Anhang: Ermittlung des Spitzenabflusses an einer beliebigen Stelle unterhalb des Speichers 260

Verzeichnis der Schweizer Talsperren
Karte der Schweizer Talsperren 262

Tiré à part du mensuel «wasser, energie, luft – eau, énergie, air» 10/1996, pages 219–266.

Association suisse pour l'aménagement des eaux, Rütistrasse 3a, CH-5401 Baden.

Peut être obtenu auprès de l'Office fédéral de l'économie des eaux, case postale, Ländtestrasse 20, CH-2501 Bienne.

Sonderdruck aus «wasser, energie, luft – eau, énergie, air», Ausgabe 10/96, Seite 219–266.

Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, Rütistrasse 3a, CH-5401 Baden.

Bezug: Bundesamt für Wasserwirtschaft, Postfach, Ländtestrasse 20, CH-2501 Biel.

Page précédente: Digue de Mattmark

Vorstehende Seite: Staudamm Mattmark

Protection contre les crues dans le canton du Valais

Aménagements hydro-électriques à accumulation et protection contre les crues

Rudolf Biedermann et al.

1. Introduction

Dans la période du 22 au 24 septembre 1993, des pluies torrentielles se sont abattues sur une partie du Haut-Valais, provoquant des crues notamment dans la région du Simplon, dans la vallée de Saas, près de Viège et dans le Rhône. Les débits ont atteint des valeurs proches de la capacité limite des cours d'eau et l'ont parfois même dépassée. Dans l'ensemble, la situation ressemblait fort à celle observée six ans auparavant, les 24 et 25 août 1987. Le fait qu'un nouveau sinistre s'est produit après si peu de temps et l'état extrêmement critique du Rhône expliquent la démarche du Conseil d'Etat du canton du Valais qui, lors de sa séance du 17 novembre 1993, a mis sur pied un groupe de travail chargé d'établir un plan visant à atténuer les conséquences des crues. Dans ce contexte, après les critiques déjà formulées à l'encontre des producteurs d'électricité alors que la crue n'était même pas encore terminée, et selon lesquelles ceux-ci n'auraient pas partout exploité leurs centrales et leurs retenues de manière adéquate, on attend une contribution substantielle de la part des aménagements hydro-électriques à accumulation.

Le présent rapport traite cette question particulière. Il a été élaboré par MM. *R. Biedermann, H. Pougatsch* et *G. Darbre* de l'Office fédéral de l'économie des eaux, M. *P.-B. Raboud,* chef du Service des forces hydrauliques du canton du Valais, ainsi que MM. *Ch. Fux* de Alusuisse-Lonza Energie AG, *B. Hagin* de Grande Dixence S.A. et *B. Sander* de Elektrizitäts-Gesellschaft Laufenburg AG, en tant que représentants des sociétés de forces motrices.

Le rapport se concentre sur les faits concrets qui se sont produits en Valais. Toutefois, les réflexions et les conclusions qui y sont formulées ont une validité tout à fait générale. Les questions relatives aux transports solides ne sont pas abordées.

2. Conditions hydrologiques en cas de crue dans le canton du Valais et tronçons critiques des cours d'eau

2.1 Situation en cas de crue

Si l'on compare la courbe enveloppe approximative des débits spécifiques de pointe centennaux du Valais (bassin du Rhône) avec celles des autres bassins fluviaux suisses (fig. 2.1), on remarque qu'elle est nettement inférieure à celles des bassins du Nord et du Sud des Alpes. Au Nord des Alpes (Aar), les valeurs sont supérieures de l'ordre de 30 %, tandis qu'au Sud des Alpes, elles sont supérieures de près de 100 %. Ceci est sans aucun doute dû au fait que le bassin versant du Rhône en amont de Martigny est totalement entouré de hautes chaînes de montagnes, ce qui le protège des influences météorologiques extérieures (fig. 2.2). Par contre, les vallées du Sud des Alpes (à l'exception du val d'Aoste) sont ouvertes vers le sud. En cas de courant du sud-ouest ou du sud, il peut facilement s'y produire des situations de barrage entraînant des précipitations abondantes et/ou de forte intensité.

Hochwasserschutz im Kanton Wallis

Speicherkraftwerke und Hochwasserschutz

Rudolf Biedermann et al.

1. Ausgangspunkt

In den Tagen vom 22. bis 24. September 1993 wurden Teile des Oberwallis von starken Niederschlägen heimgesucht, die insbesondere im Simplongebiet, im Saastal, bei Visp sowie in der Rhone Abflüsse verursachten, die knapp an der Grenze der Abflusskapazitäten der Gewässer lagen oder diese überschritten. Gesamthaft war die Lage sehr ähnlich wie jene, die sechs Jahre zuvor am 24./25. August 1987 aufgetreten ist. Angesichts dieser kurzfristigen Wiederholung eines Schadenereignisses und eines äusserst kritischen Zustandes in der Rhone ist es verständlich, dass der Staatsrat des Kantons Wallis anlässlich seiner Sitzung vom 17. November 1993 eine Arbeitsgruppe mit dem Auftrag einsetzte, ein Konzept auszuarbeiten, das die Auswirkungen von Hochwässern abzumindern vermag. Ein besonderer Beitrag wird dabei von den Speicherkraftwerken erwartet, nachdem bereits während des Hochwasserereignisses die Meinung aufkam, der Einsatz der Kraftwerke und ihrer Speicher sei nicht überall angemessen erfolgt.

Mit dieser Teilfrage befasst sich der nachfolgende Bericht. Ausgearbeitet wurde er von Dr. *R. Biedermann, H. Pougatsch* und Dr. *G. Darbre* vom Bundesamt für Wasserwirtschaft, Dr. *P.-B. Raboud,* Vorsteher der Dienststelle für Wasserkraft des Kantons Wallis, sowie von *Ch. Fux,* Alusuisse-Lonza Energie AG, *B. Hagin,* Grande Dixence S.A., und *B. Sander,* Elektrizitäts-Gesellschaft Laufenburg AG, als Vertreter der Kraftwerksgesellschaften.

Der Bericht beschränkt sich wohl auf konkrete Ereignisse im Kanton Wallis. Die Überlegungen und Folgerungen sind aber ganz allgemein gültig. Nicht behandelt werden Fragen im Zusammenhang mit dem Geschiebetrieb.

2. Hochwasserverhältnisse im Kanton Wallis und kritische Gewässerabschnitte

2.1 Hochwasserverhältnisse

Vergleicht man den approximativen Grenzwert des 100jährlichen spezifischen Spitzenabflusses im Wallis (Flussgebiet Rhone) mit jenen in anderen Flussgebieten der Schweiz (Bild 2.1), fällt auf, wie niedrig er im Quervergleich mit jenen auf der Alpennord- und der Alpensüdseite ist. Auf der Alpennordseite (Aare) ist er um etwa 30 %, auf der Alpensüdseite (Ticino) um nahezu 100 % grösser. Der Grund ist unzweifelhaft der, dass das Einzugsgebiet der Rhone oberhalb von Martigny vollumfänglich von hohen Gebirgsketten umgeben und damit gegen Wettereinflüsse von aussen gut abgeschirmt ist (Bild 2.2). Auf der Alpensüdseite sind demgegenüber die Täler (mit Ausnahme des Valle d'Aosta) gegen Süden geöffnet. Es können sich dort bei Luftströmungen aus Südwesten oder Süden leicht Staulagen mit ergiebigen und/oder starken Niederschlägen einstellen.

Vergleicht man ferner – z.B. für das Hochwasser 1993 – die spezifischen Spitzenabflüsse in drei Teileinzugsgebieten oberhalb von Sion (Bild 2.3), erkennt man erhebliche regio-

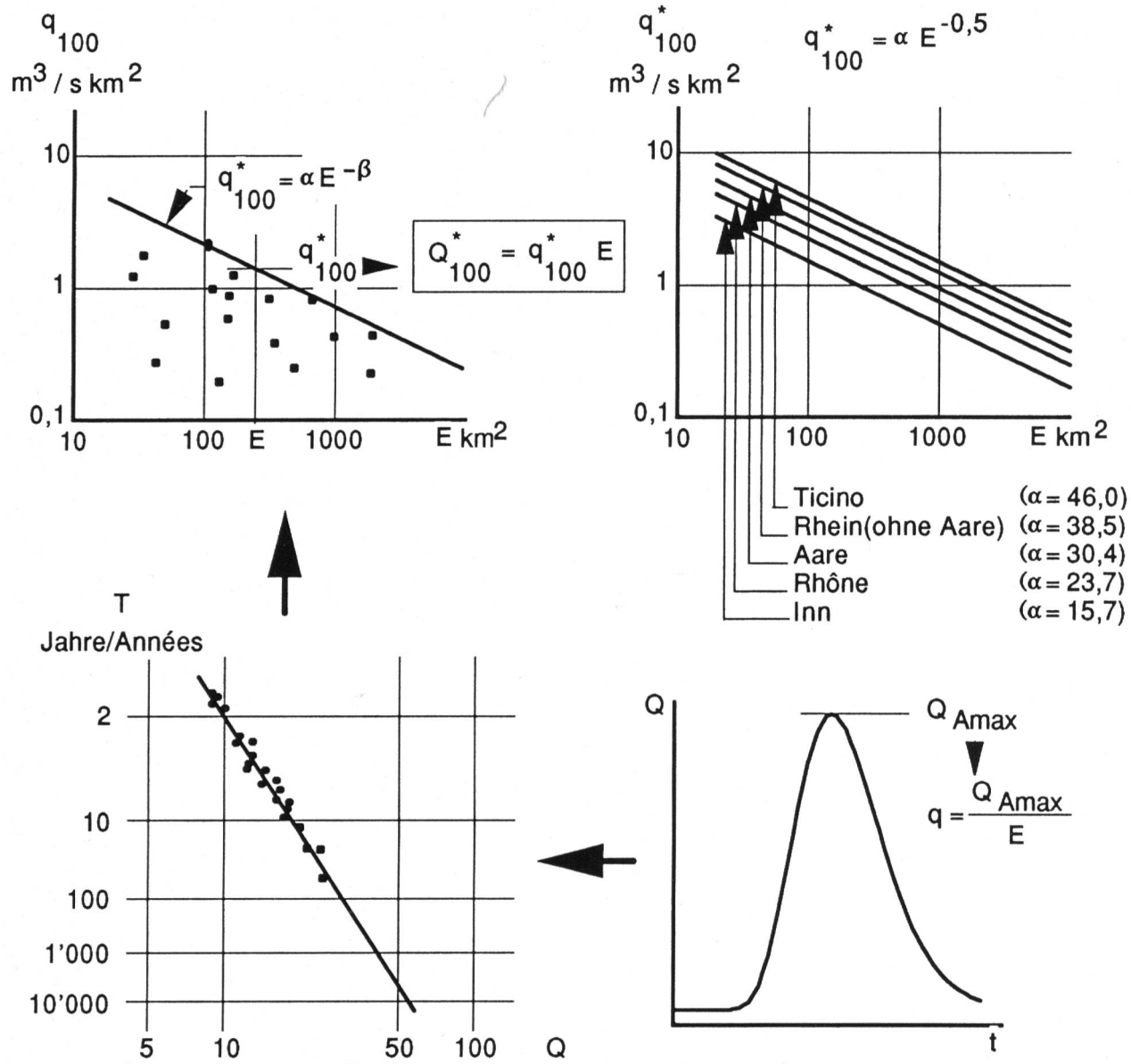


Fig. 2.1. Courbes enveloppes approximatives des débits spécifiques de pointe centennaux des divers bassins fluviaux suisses.

(Source: Office fédéral des routes et des digues; Les débits maximaux des cours d'eau suisses observés jusqu'en 1969; 1974)

Bild 2.1. Approximative Grenzwerte des spezifischen 100jährlichen Spitzenabflusses in den verschiedenen Flussgebieten der Schweiz. *T* = Wiederkehrperiode.
(Quelle: Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau; Die grössten bis zum Jahr 1969 beobachteten Abflussmengen von schweizerischen Gewässern; 1974)

Par ailleurs, la comparaison – pour la crue de 1993 par exemple – des débits spécifiques de pointe de trois bassins versants situés à l'amont de Sion (fig. 2.3) met en évidence de sensibles différences régionales. Ces différences ne peuvent s'expliquer que par le débordement par-dessus la crête sud des Alpes des conditions météorologiques régnant au sud de ces dernières, débordement qui affecte la partie la plus reculée des vallées latérales sud du Valais dans le secteur compris entre le Blinnenhorn à l'est et le Mont-Dolent à l'ouest (fig. 2.2). Des différences subsistent toutefois en ce qui concerne l'intensité des précipitations observées à l'est et à l'ouest. Dans le secteur est (du Blinnenhorn au Mont-Rose), des précipitations de forte intensité sont possibles, car le val d'Ossola est ouvert vers le sud et la crête des Alpes n'y est pas très élevée. Dans le secteur ouest (du Mont-Rose au Mont-Dolent), on ne note pas d'intensités aussi élevées, car le val d'Aoste, tout

nale Unterschiede. Sie sind nur erklärbar, wenn im Bereich des südlichen Alpenkamms Wetterlagen der Alpensüdseite in die südlichen Täler des Wallis hinübergreifen, und zwar vom Blinnenhorn im Osten bis zum Mont Dolent im Westen (Bild 2.2). Unterschiede bestehen allerdings hinsichtlich der Niederschlagsintensitäten im Osten und im Westen. Im Ostabschnitt (Blinnenhorn bis Monte Rosa) sind hohe Intensitäten möglich, weil das Valle d'Ossola gegen Süden hin offen und der Alpenkamm nicht besonders hoch ist. Im Westabschnitt (Monte Rosa bis Mont Dolent) können keine vergleichbar hohen Intensitäten auftreten, weil das Valle d'Aosta, wie das Wallis, vollumfänglich von Gebirgsketten umgeben, also gegen Süden abgeschirmt ist.

Bestätigungen dafür, dass Niederschlagsereignisse auf der Alpensüdseite in die südlichen Täler des Wallis übergreifen, dort aber rasch an Intensität verlieren, liefern einerseits die Karte der Isohyeten[1] der Hochwässer 1987 und 1993

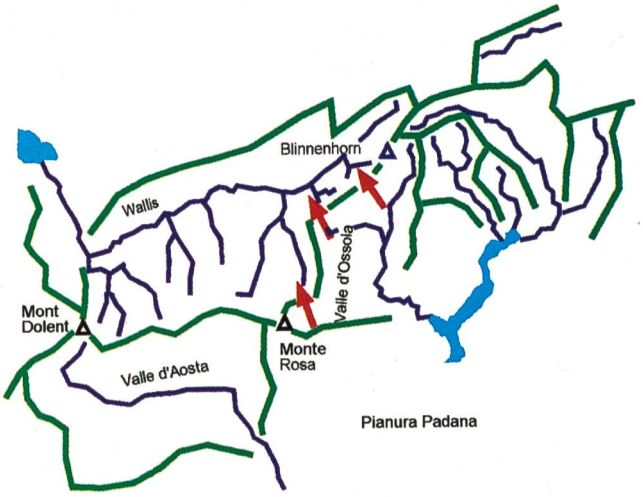


Fig. 2.2. Principales chaînes de montagnes du Valais et de ses régions limitrophes.

Bild 2.2. Gebirgsketten im Wallis und in angrenzenden Gebieten.

comme le Valais, est entouré de chaînes de montagnes, et de ce fait abrité côté sud.

Les cartes des isohyètes[1] afférentes aux crues de 1987 et 1993 (fig. 2.4), d'une part, et l'analyse de Grande Dixence S.A. relative aux débits captés par les différentes prises d'eau de la vallée de Zermatt en 1993 (fig. 2.5), d'autre part, confirment que les précipitations du Sud des

[1] Courbes d'égales hauteurs de précipitation.

(Bild 2.4) und andererseits die Auswertung der Kraftwerksgesellschaft Grande Dixence über die 1993 von den verschiedenen Wasserfassungen im Mattertal gefassten Wassermengen (Bild 2.5).

Einen einigermassen zuverlässigen Hinweis dafür, dass zwischen dem Ost- und dem Westabschnitt ein deutlicher Unterschied besteht, liefern die maximalen natürlichen Zuflüsse zu den Speichern Mattmark (Ostabschnitt) und Mauvoisin (Westabschnitt) während der Hochwässer 1987, 1993 und 1994 (Bild 2.6). Für Mattmark liegen die Spitzenabflüsse verglichen mit dem approximativen Grenzwert des 100jährlichen Hochwassers (q^*_{100}; Bild 2.1) in der Grössenordnung von 58 bis 84 %, für Mauvoisin in der Grössenordnung von 30 bis 33 %.

Es zeigt sich somit, dass im Wallis, d.h. im Teil oberhalb von Martigny, hinsichtlich der Hochwasserverhältnisse drei Zonen zu unterscheiden sind[2]:

1. das Rhonetal (exkl. Goms) sowie die Nordtäler mit relativ geringer Hochwasserbelastung,
2. die Südtäler westlich des Monte Rosa (einschliesslich des Mattertals) mit mittlerer Hochwasserbelastung und
3. die Südtäler östlich des Monte Rosa (einschliesslich des

[1] Kurven gleichen Niederschlags.

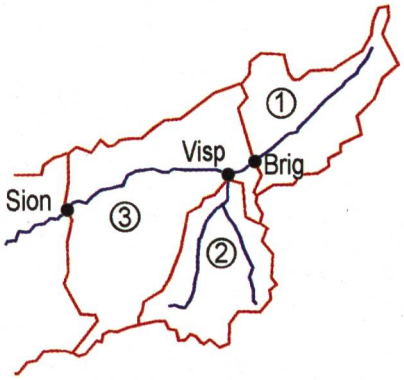
[2] Es müssten folglich für das Wallis drei Grenzlinien für die 100jährlichen spezifischen Spitzenabflüsse q^*_{100} unterschieden werden. Eine solche Differenzierung ist zumindest im Moment nicht möglich. Die Konsequenz ist, dass das 100jährliche Hochwasser in den Südtälern des Oberwallis wahrscheinlich etwas unterschätzt wird.

Bassin partiel No	Bassin versant E km²	Crue 1993 Débit de pointe 1) Q m³/s	q = Q / E m³/s km²
1	913	462	0,51
2	778	494	0,63
3	1658	249	0,15

1) naturel, c.-à-d. sans effet des retenues

Teilgebiet Nr.	Einzugs-gebiet E km²	Hochwasser 1993 Spitzenabfluss 1) Q m³/s	q = Q / E m³/s km²
1	913	462	0,51
2	778	494	0,63
3	1658	249	0,15

1) natürlich, d.h. ohne Einfluss der Speicherkraftwerke



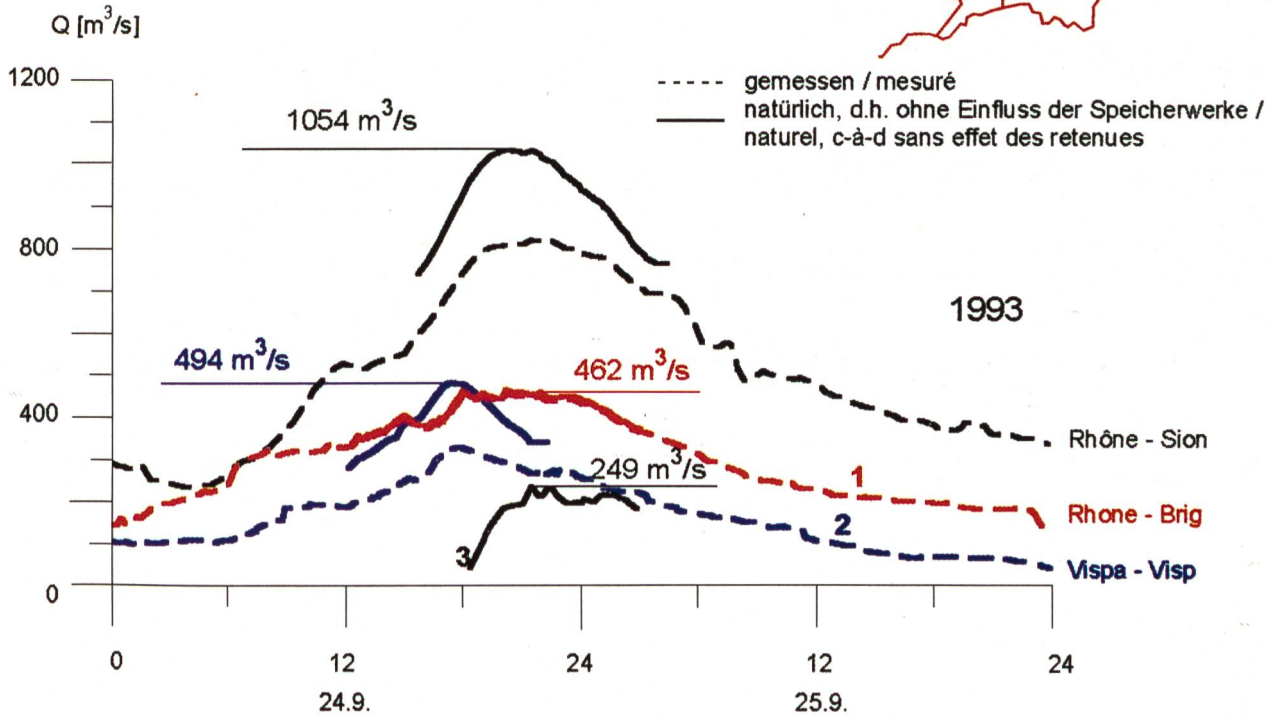


Fig. 2.3. Débits spécifiques de pointe observés dans trois régions du Haut-Valais lors de la crue de 1993.

Bild 2.3. Spezifische Spitzenabflüsse in drei Regionen des Oberwallis anlässlich des Hochwassers 1993.

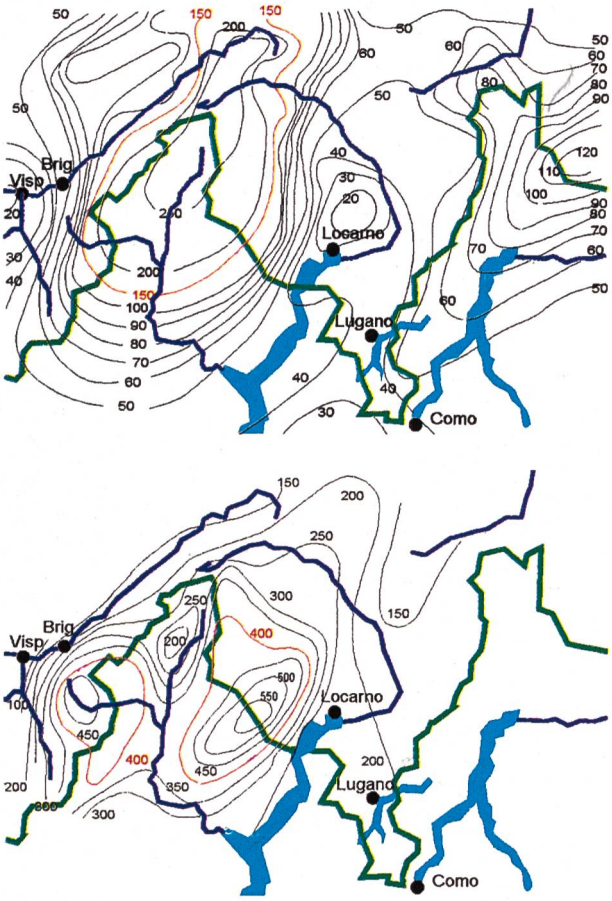


Fig. 2.4. Distribution des précipitations lors des crues de 1987 et 1993 (en mm).
en haut: 24 août 1987 (1 jour)
en bas: 22–24 septembre 1993 (3 jours)

Bild 2.4. Niederschlagsverteilung während der Hochwässer 1987 und 1993 (in mm).
oben: 24. August 1987 (1 Tag)
unten: 22. bis 24. September 1993 (3 Tage)

Alpes débordent dans les vallées latérales sud du Valais, mais en perdant rapidement de leur intensité.

Les apports naturels maximums qui ont alimenté les retenues de Mattmark (secteur est) et de Mauvoisin (secteur ouest) lors des crues de 1987, 1993 et 1994 (fig. 2.6) prouvent de manière relativement fiable qu'il existe une différence tangible entre les secteurs est et ouest. Comparés à la courbe enveloppe approximative des crues centennales (q^*_{100}; fig. 2.1), les débits de pointe de Mattmark sont de l'ordre de 58 à 84 %, ceux de Mauvoisin de l'ordre de 30 à 33 %.

On remarque donc qu'en ce qui concerne les conditions en cas de crue dans le Valais à l'amont de Martigny, il faut distinguer trois zones[2]:

1. La plaine du Rhône ainsi que les vallées latérales nord, qui produisent des crues relativement faibles
2. Les vallées latérales sud situées à l'ouest du Mont-Rose (y compris la vallée de Zermatt), dont les crues sont d'intensité moyenne
3. Les vallées latérales sud situées à l'est de Mont-Rose (y compris la vallée de Saas), la vallée de Conches et la Saastals), das Goms sowie das Tal der Doveria mit relativ hoher Hochwasserbelastung.

Diese Dreiteilung wird auch sehr gut im Bild 2.7 ersichtlich, wo die stündlichen Niederschläge für ausgewählte Messstationen aufgezeichnet sind.

Eine Bestätigung, dass die Südtäler östlich des Monte Rosa besonders hochwassergefährdet sind, liefert «Die Hochwasserchronik» (für das Wallis) von *Otto Lütschg* aus dem Jahr 1926[3], wo ausser den Namen Rhone, Drance/Martigny, Vièze sehr oft die Namen Saastal, Visp, Brig/Saltina/Simplon und Goms auftauchen.

Die Spitzenabflüsse der Hochwässer 1987, 1993 und 1994 sind für die wichtigsten Abflussmessstationen in der Tabelle 2.1 zusammengestellt.

2.2 Kritische Gewässerabschnitte

Die Hochwässer 1987, 1993 und 1994 zeigen, dass die Doveria (auf der Südseite des Simplonpasses) und die Saaser Vispa zwischen dem Speicher Mattmark und Saas Balen die kritischsten Gewässerabschnitte waren. Dort hat es 1993 nennenswerte Ausuferungen gegeben[4], und dies für ein Hochwasserereignis, das (zumindest für das Saastal) nur etwa ein 50- bis 80jährliches gewesen sein dürfte[5]. Nahe an der Grenze der Abflusskapazität befand man sich 1993 auch im Mattertal und bei Visp. Wären vom Kraftwerk Grande Dixence nicht gegen 50 m³/s Wasser in den Speicher Grande Dixence übergeleitet und vom Speicher Mattmark zum Zeitpunkt der Hochwasserspitze nicht etwa 115 m³/s zurückgehalten worden, hätte es im Mattertal möglicherweise und bei Visp sicher starke Ausuferungen gegeben.

Randvoll war 1993 auch die Rhone unterhalb von Visp (und ganz besonders zwischen Riddes und Martigny). Ober-

[2] Pour le Valais, on devrait donc distinguer 3 courbes enveloppes pour les débits spécifiques de pointe centenaux q^*_{100}, ce qui n'est, à l'heure actuelle tout au moins, pas possible. Par conséquent, la crue centennale des vallées latérales sud du Valais est vraisemblablement quelque peu sous-estimée.

[3] *Otto Lütschg,* Über Niederschlag und Abfluss im Hochgebirge, Sonderdarstellung des Mattmarkgebietes, Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband – Verbandsschrift Nr. 14, 1926.

[4] Die Ausuferung der Saltina in Brig hatte eine spezielle Ursache.

[5] Für die Doveria, die auf der Alpensüdseite liegt, wurden keine Abklärungen vorgenommen.

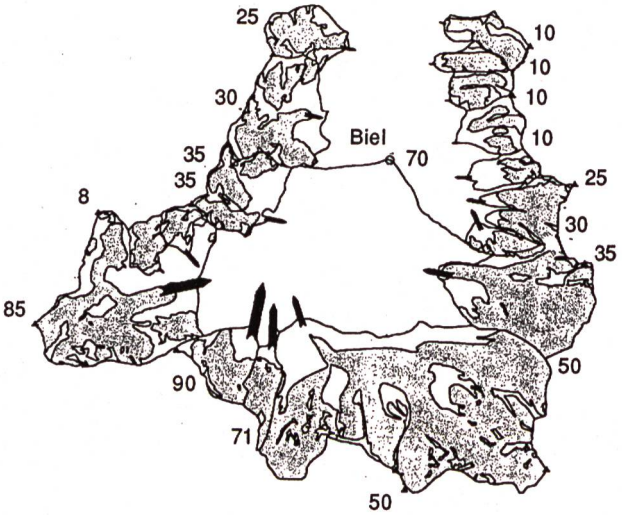


Fig. 2.5. Apports captés dans la vallée de Zermatt supérieure et dérivés par l'aménagement de la Grande Dixence lors de la crue du 22 au 26 septembre 1993 (5 jours; en mm) (*Bonvin*, Grande Dixence S.A.).

Bild 2.5. Vom Kraftwerk Grande Dixence im oberen Mattertal gefasstes und abgeleitetes Wasser während des Hochwassers vom 22. bis 26. September 1993 (5 Tage; in mm). (*Bonvin,* Grande Dixence).

vallée de la Doveria, où les crues sont relativement fortes.

Cette répartition apparaît très distinctement dans la figure 2.7, qui représente la distribution des précipitations horaires enregistrées par des stations de mesure choisies.

La publication relative à la chronique des crues (en Valais) écrite par *Otto Lütschg* en 1926[3] confirme que les vallées latérales sud situées à l'est du Mont-Rose sont particulièrement menacées par les crues, car, outre les noms du Rhône, de la Drance/Martigny et de la Vièze, les noms de Saastal, Visp, Brig/Saltina/Simplon et Goms y apparaissent fréquemment.

Les débits de pointe des crues de 1987, 1993 et 1994 relevés au droit des principales stations hydrométriques sont reportés dans le tableau 2.1.

2.2 Tronçons critiques des cours d'eau

Les crues de 1987, 1993 et 1994 montrent que la Doveria (sur le versant sud du col du Simplon) et la Viège de Saas entre la retenue de Mattmark et Saas Balen constituaient les tronçons de cours d'eau les plus critiques. En 1993, d'importants débordements s'y sont produits[4], et ce pour un événement dont le temps de retour ne dépasse pas 50 à 80 ans[5]. Dans la vallée de Zermatt ainsi qu'à Viège, les débits ont également approché la capacité limite de la rivière en 1993. De graves débordements se seraient vraisemblablement aussi produits dans la vallée de Zermatt et certainement à Viège si Grande Dixence S.A. n'avait pas dérivé un débit de l'ordre de 50 m³/s vers la retenue de la Grande Dixence et si la retenue de Mattmark n'avait pas retenu 115 m³/s au moment de la pointe de la crue.

En 1993, les eaux du Rhône coulaient aussi à ras bords à l'aval de Viège (surtout entre Riddes et Martigny). Ce fut aussi le cas en 1987, mais à l'amont. Compte tenu de l'ampleur des apports stockés dans les bassins d'accumulation tant en 1987 qu'en 1993 (voir paragraphe 3.2), on peut affirmer que la capacité hydraulique du Rhône est globalement insuffisante à l'aval de Reckingen et tout particulièrement à l'aval de Brigue/Naters.

2.3 Résumé

1. En Valais, les précipitations qui engendrent des crues sont plus faibles que celles du Nord des Alpes, et nettement plus faibles que celles du Sud des Alpes. La raison est que le Valais est entouré de hautes chaînes de montagnes.
2. Les précipitations intenses du Sud des Alpes débordent par-dessus la crête sud de ces dernières et provoquent, spécialement dans les zones reculées des vallées latérales sud, des débits spécifiques plus importants que dans les autres régions du Valais. Cet effet est plus marqué à l'est du Mont-Rose qu'à l'ouest de celui-ci. De ce fait, on doit s'attendre à de gros apports de crue dans le Binntal, la région du Simplon (versants nord et sud), la vallée de Saas, ainsi qu'à Viège.
3. Les gros apports de crue des vallées latérales sud situées à l'est peuvent aussi faire croître fortement le débit du Rhône à l'aval de Brigue/Naters.

[3] *Otto Lütschg,* Über Niederschlag und Abfluss im Hochgebirge, Sonderdarstellung des Mattmarkgebietes, Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband – Verbandsschrift Nr. 14, 1926.

[4] Le débordement de la Saltina à Brigue est lié à des causes spéciales.

[5] En ce qui concerne la Doveria, qui coule au sud des Alpes, on n'a procédé à aucune analyse.

Speicher Retenue	E[1)]	maximaler Zufluss am / Débit entrant maximum le [2)]					
		24.8.87		24.9.93		24.9.94	
		Q	q	Q	q	Q	q
	km²	m³/s	m³/s km²	m³/s	m³/s km²	m³/s	m³/s km²
Mattmark	37,1	102,5	2,76	121,5	3,27	83,5	2,25
Mauvoisin	113,5	84	0,74	77	0,68	86	0,76

1) direktes Einzugsgebiet des Speichers / Bassin versant naturel de la retenue
2) abzüglich der zugeleiteten Wassermengen / sans les adductions

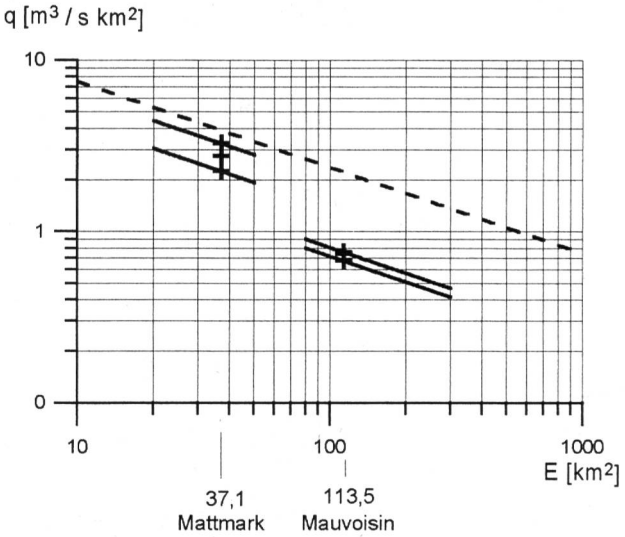


Fig. 2.6. Apports naturels maximums aux retenues de Mattmark (secteur est) et de Mauvoisin (secteur ouest) lors des crues de 1987, 1993 et 1994.
------- courbe enveloppe approximative des débits spécifiques de pointe centennaux du bassin du Rhône (q^*_{100} ; fig. 2.1).

Bild 2.6. Maximale natürliche Zuflüsse zu den Speichern Mattmark (Ostabschnitt) und Mauvoisin (Westabschnitt) während der Hochwässer 1987, 1993 und 1994.
------- approximativer Grenzwert des spezifischen 100jährlichen Spitzenabflusses des Flussgebiets Rhone (q^*_{100}; Bild 2.1).

halb war dies 1987 der Fall. Generell hat also auch die Rhone unterhalb von Reckingen, besonders aber unterhalb von Brig/Naters eine Abflusskapazität, die als ungenügend zu bewerten ist, wenn man bedenkt, dass die vorhandenen Speicher sowohl 1987 als auch 1993 viel Wasser zurückgehalten haben (siehe Abschnitt 3.2).

2.3 Zusammenfassung

1. Die Niederschläge, die Hochwässer verursachen, sind im Wallis schwächer als auf der Alpennordseite und erheblich schwächer als auf der Alpensüdseite. Der Grund ist, dass das Wallis von hohen Gebirgszügen umgeben ist.
2. Starkniederschläge auf der Alpensüdseite greifen über den Alpenkamm hinüber und bewirken vor allem in den obersten Bereichen der Südtäler höhere Abflussspenden als im übrigen Wallis. Die Wirkung ist östlich des Monte Rosa grösser als westlich davon. Bedeutende Hochwasserabflüsse sind deshalb im Binntal, im Gebiet des Simplonpasses (Süd- und Nordseite), im Saastal und in Visp zu erwarten.
3. Die bedeutenden Hochwasserabflüsse in den östlichen Südtälern können auch hohe Belastungen der Rhone unterhalb von Brig/Naters bewirken.

Abflussmessstation Station de mesure hydrométrique	gemessene Spitzenabflüsse [m3/s] Débit de pointe mesuré [m3/s]			
	E (km²)	24.8.1987	24.9.1993	24.9.1994
Rhône - Brig	913	495 [3]	460	208
Rhône - Sion	3349	775 [3]	830	546
Rhône - Branson	3728	820 [3]	930	614
Saaser Vispa - Mattmark	37,1	119 [1]	138 [1]	100 [1]
Saaser Vispa - Saas Balen	202		190 [4]	
Vispa - Visp	778	285	330	161
Drance - Mauvoisin	166,8	108 [2]	101 [2]	110 [2]
Drance - Martigny	678		86	43

Tableau 2.1. Débits de pointe observés en Valais lors des crues de 1987, 1993 et 1994.

Tabelle 2.1. Gemessene Spitzenabflüsse im Wallis während der Hochwässer 1987, 1993 und 1994.

[1] inklusive Wasserzuleitung von 16,5 m³/s
y compris adduction de 16,5 m³/s

[2] inklusive Wasserzuleitung von 24 m³/s
y compris adduction de 24 m³/s

[3] am 25. August 1987
le 25 août 1987

[4] rekonstruiert anhand Hochwasserspuren
calculé sur la base des traces de crue

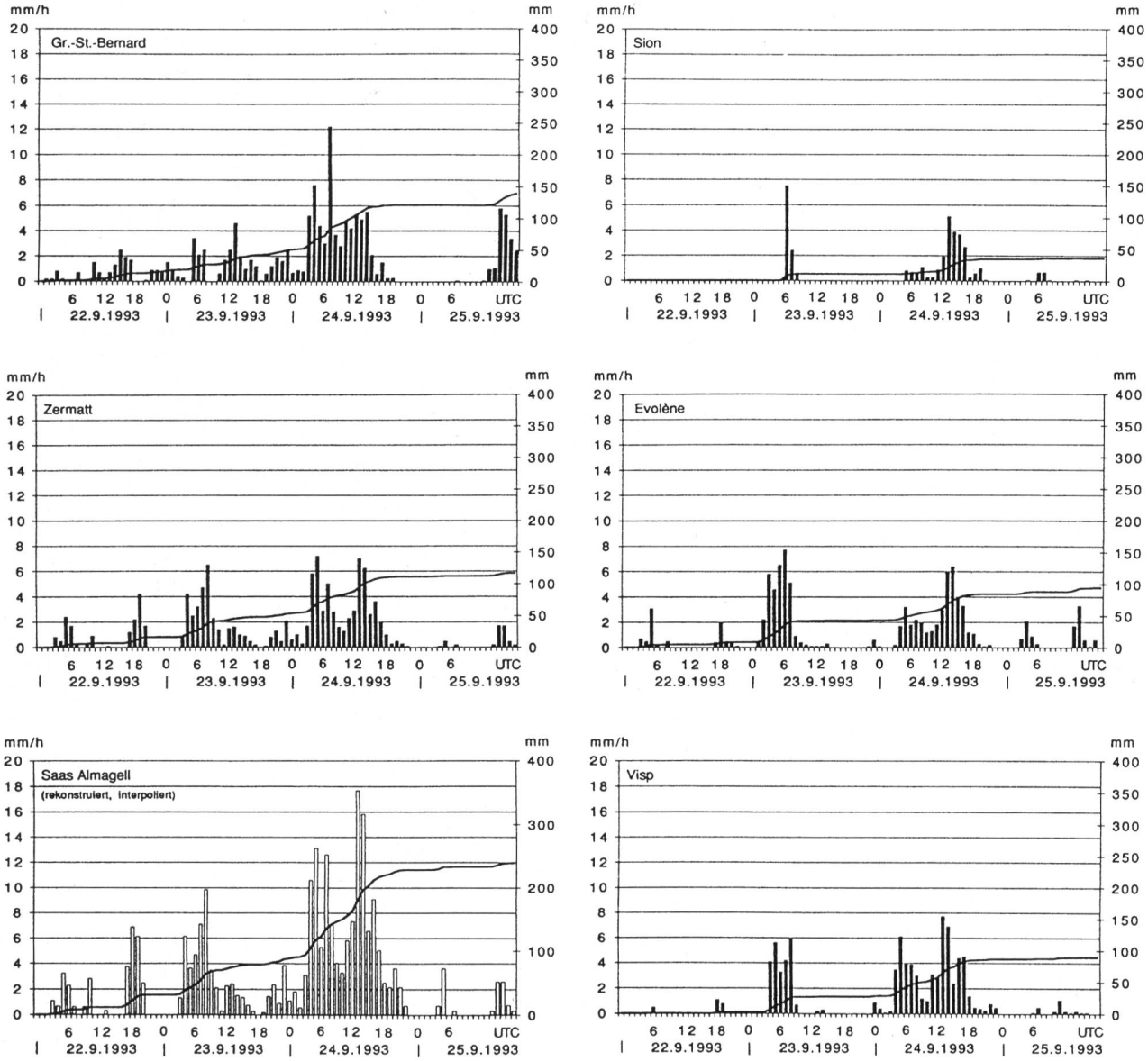
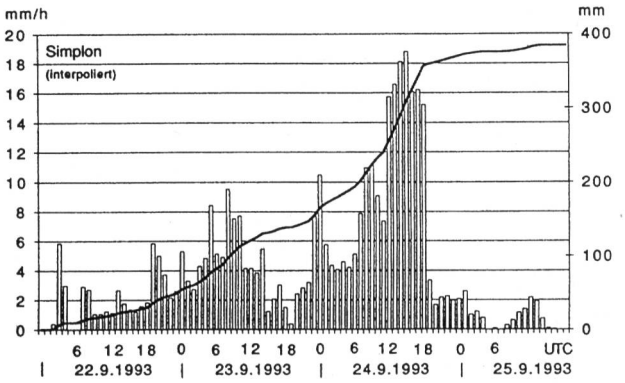
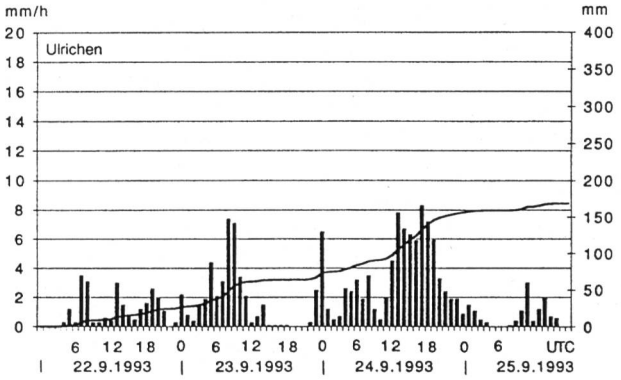
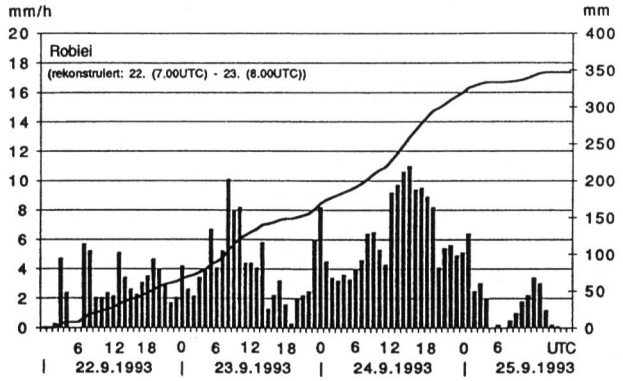


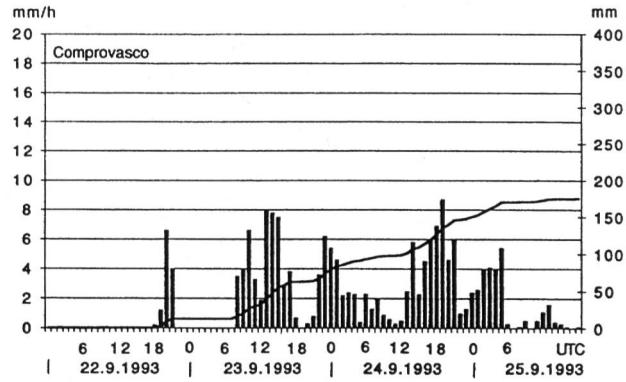
Fig. 2.7. Précipitations horaires et précipitations cumulées observées à différentes stations entre le 22 et le 25 septembre 1993 (*D. Grebner;* «eau, énergie, air», no 1/2, 1994).

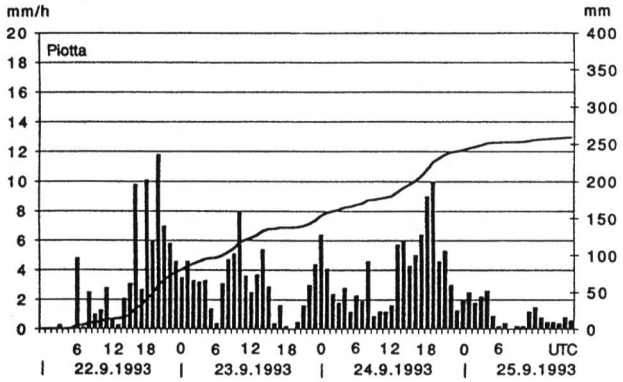
Bild 2.7. Stündlicher und aufsummierter Niederschlag an verschiedenen Messstationen vom 22. bis 25. September 1993 (*D. Grebner*; «wasser, energie, luft», Heft 1/2, 1994).

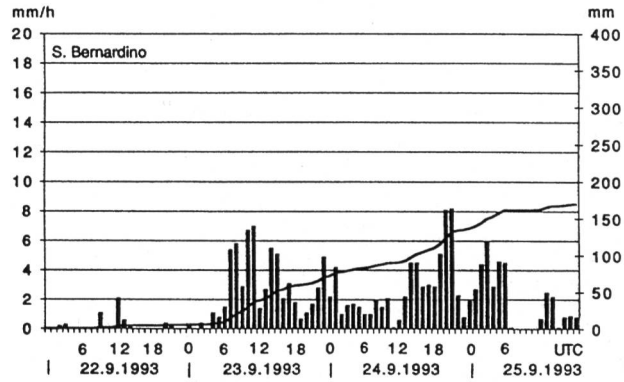












3. Contribution des aménagements à accumulation à la protection contre les crues

3.1 Contribution générale

La forme la plus simple d'un aménagement à accumulation consiste en une retenue et en une galerie d'amenée qui conduit l'eau aux turbines assurant la production d'énergie (fig. 3.1, à gauche). Au moyen d'adductions, certains amé-

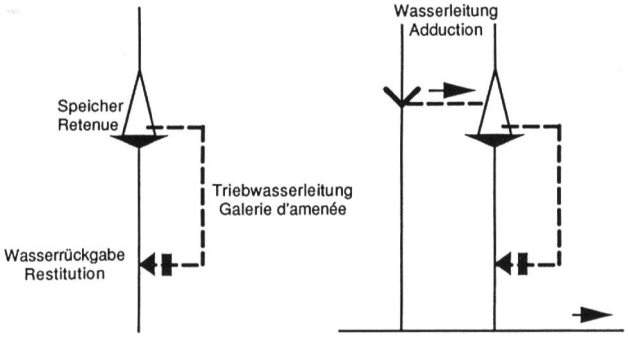


Fig. 3.1. Aménagement hydro-électrique à accumulation – schéma de principe.

3. Beitrag von Speicherkraftwerken an den Hochwasserschutz

3.1 Beitrag generell

Ein Speicherkraftwerk besteht in der einfachsten Ausführung aus einem Speicher und einer Triebwasserleitung, die das Wasser den Turbinen zur Stromproduktion zuführt (Bild 3.1 links). Bei einzelnen Anlagen wird dem Speicher zusätzlich Wasser aus einem anderen Einzugsgebiet zugeleitet (Bild 3.1 rechts).

Alle diese Elemente (Speicher, Triebwasserleitung und Wasserüberleitung) können mehrfach vorhanden sein. Es sind gegebenenfalls auch Pumpen eingegliedert, wenn Wasser von einem tieferen (Fassungs-)Horizont in den Speicher hochgefördert werden soll.

Zweck des Speichers ist es, Wasser temporär zu speichern, um die Wassernutzung sowohl zeitlich als auch hinsichtlich der Menge vom Wasserdargebot zu entkoppeln.

Die Einrichtungen und der Betrieb eines Speicherkraftwerks beeinflussen die Abflussverhältnisse in den genutzten

Bild 3.1. Speicherkraftwerk – generelle Disposition.

nagements utilisent également les eaux de bassins autres que leur bassin versant naturel (fig. 3.1, à droite).

Un même aménagement peut comporter plusieurs de ces éléments (retenue, galerie d'amenée, adduction). Parfois, des pompes sont intégrées à l'aménagement pour refouler les eaux captées à un niveau inférieur à celui de la retenue.

Le but de la retenue est de stocker temporairement les eaux afin de pouvoir les utiliser indépendamment du régime des apports, aussi bien dans le temps que quantitativement.

Les ouvrages et l'exploitation d'un aménagement à accumulation influencent le régime des cours d'eau exploités, et ceci jusqu'à l'embouchure de l'émissaire dans la mer. Il faut distinguer les effets résultant
- du stockage,
- du turbinage,
- de l'adduction.

3.1.1 Caractéristiques et fonctionnement d'une retenue

Le volume d'eau ΔV_Z entrant dans une retenue durant un intervalle de temps ΔT (par exemple 1 jour) se divise en deux parties: le volume ΔV_A, qui est lâché en aval par un ou plusieurs organes de soutirage, d'évacuation ou de vidange, et le volume ΔV_R, qui est stocké dans la retenue (fig. 3.2):

$\Delta V_Z = \Delta V_A + \Delta V_R$ [m³]

Ce bilan peut aussi s'exprimer sous forme instantanée:

$Q_Z = Q_A + Q_R$ [m³/s]

Cette expression est l'équation du régime d'un lac, équation valable tant pour un lac naturel que pour une retenue artificielle. Pour un lac naturel non régularisé, le débit Q_A est déterminé par le niveau H du plan d'eau (fig. 3.3, en haut); pour une retenue ou un lac régularisé, le débit lâché peut être choisi librement entre certaines limites (fig. 3.3, en bas).

Cette flexibilité en ce qui concerne le débit lâché en aval permet l'exploitation de la retenue, exploitation restreinte cependant au volume compris entre le niveau minimal d'exploitation et le niveau normal de retenue, c'est-à-dire au volume utile (fig. 3.4). Le volume situé au-dessous du niveau minimal d'exploitation – le volume mort – n'est pas utilisable et le volume au-dessus du niveau de retenue normale – le volume de la tranche d'écrêtement – ne peut être utilisé sous aucun prétexte pour l'exploitation normale. Ce volume est nécessaire pour assurer la sécurité de l'ouvrage lors des crues.

Lorsque le niveau du plan d'eau se situe au-dessous du niveau normal de retenue, les organes à disposition pour l'exploitation ou pour l'abaissement en cas de détection d'un danger pouvant porter atteinte à la sécurité de l'ouvrage sont en premier lieu la galerie d'amenée à la centrale, puis la vidange de fond, et enfin, lorsqu'ils existent, la vidange intermédiaire et la prise d'eau de dotation (fig. 3.5). En principe, l'utilisation de tous ces organes n'est soumise à aucune restriction[6]. Tel n'est plus le cas lorsque le niveau normal de retenue est dépassé. Priorité absolue doit alors être accordée à la sécurité de l'ouvrage vis-à-vis des crues. Ceci signifie que les différents organes, à l'excep-

[6] A moins qu'il ne s'agisse d'une urgence, on ne doit cependant pas créer de crue artificielle en aval de la retenue.

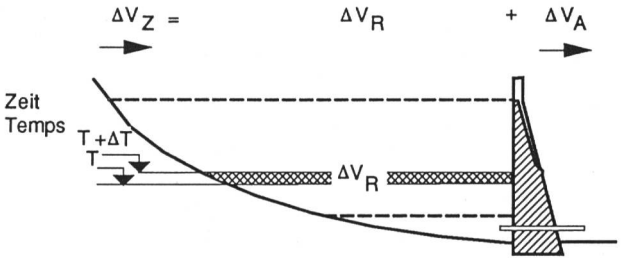


Fig. 3.2. Régime d'une retenue.

Bild 3.2. Seeregime eines Speichers.

Gewässern, und dies bis zur Einmündung des Vorfluters in ein Meer. Zu unterscheiden gilt es dabei die Einflüsse infolge
- Wasserspeicherung,
- Turbinenbetrieb,
- Wasserüberleitung.

3.1.1 Aufbau und Funktionsweise eines Speichers

Das Wasservolumen ΔV_Z, das einem Speicher während des Zeitintervalls ΔT (z.B. 1 Tag) zufliesst, teilt sich auf zwei Anteile auf: den Anteil ΔV_A, der über ein oder mehrere Ablassorgane aus dem Speicher abfliesst, und den Anteil ΔV_R, der im Speicher zurückgehalten wird (Bild 3.2):

$\Delta V_Z = \Delta V_A + \Delta V_R$ [m³]

Diese Bilanz gilt auch momentan:

$Q_Z = Q_A + Q_R$ [m³/s]

Es ist dies die Seeregimegleichung, die gleichermassen für natürliche Seen und künstliche Speicher gilt. Bei natürlichen, unregulierten Seen wird die Abflusswassermenge Q_A durch die Wasserspiegellage H im See bestimmt (Bild 3.3 oben), bei einem Speicher oder einem regulierten See ist sie innerhalb gewisser Grenzen frei wählbar (Bild 3.3 unten).

Der Freiheitsgrad hinsichtlich des Abflusses erlaubt es, den Speicher zu bewirtschaften, wobei dies allerdings nur für den Stauraum zwischen der Absenkgrenze und dem Stauziel, d.h. für das Nutzvolumen gilt (Bild 3.4). Das Volumen unterhalb der Absenkgrenze – der tote Raum – ist nicht nutzbar, und der Raum oberhalb des Stauziels – der Hochwasserschutzraum – darf unter keinen Umständen frei bewirtschaftet werden. Er wird benötigt, um die Sicherheit der Stauanlage im Hochwasserfall sicherzustellen.

Befindet sich der Wasserspiegel im Speicher unterhalb des Stauziels, stehen als Ablassorgane zur Bewirtschaftung oder zur Absenkung im Falle einer erkannten Gefährdung der Sicherheit der Stauanlage primär die Triebwasserleitung,

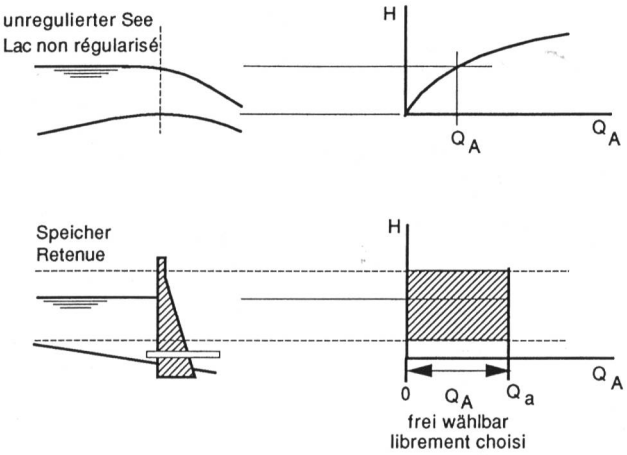
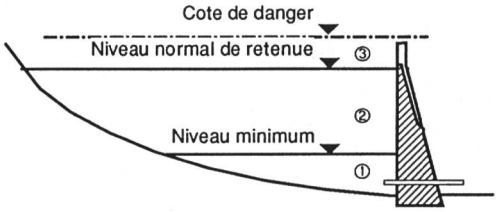


Fig. 3.3. Débit sortant d'un lac naturel (en haut) et d'une retenue artificielle (en bas).
Q_A = débit sortant
Q_a = débit équipé (capacité des organes de soutirage et d'évacuation utilisables)

Bild 3.3. Abfluss aus einem natürlichen See (oben) und einem künstlichen Speicher (unten).
Q_A = Abflusswassermenge
Q_a = Ausbauwassermenge, d.h. Leistungsgrenze der einsetzbaren Ablassorgane



① Volume mort
② Volume utile
③ Tranche d'écrêtement

① toter Raum
② Nutzvolumen
③ Hochwasserschutzraum

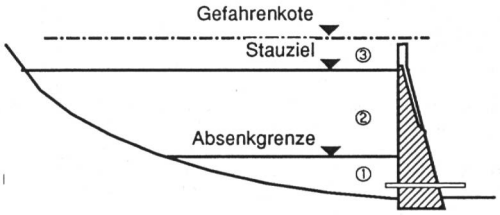


Fig. 3.4. Subdivisions d'une retenue.

Bild 3.4. Gliederung eines Speichers.

tion de la galerie d'amenée, doivent être mis en service conformément aux instructions impératives de la consigne de manœuvre des vannes. Celle-ci a été établie de façon à

a) maintenir, même en cas d'occurrence de la plus grande crue possible, le niveau du plan d'eau au-dessous de la cote de danger, cote au-delà de laquelle des dégâts mettant en péril la sécurité du barrage se produiraient (fig. 3.4) et
b) ne pas provoquer en aval de la retenue des variations de débit $\Delta Q/\Delta T$ dépassant celles qui surviendraient si la retenue n'existait pas (fig. 3.6)[7].

3.1.2 Effet du stockage en cas de crue

Au passage d'une crue, une retenue provoque toujours une transformation de l'hydrogramme, puisqu'une partie des apports est stockée temporairement (Q_R, fig. 3.7). Tant que le niveau normal de retenue n'est pas atteint, les apports sont entièrement stockés.

$Q_R = Q_Z \rightarrow Q_A = Q_Z - Q_R = 0$

Dès que le niveau normal de retenue est dépassé, l'évacuation de la crue commence conformément à la consigne de manœuvre des vannes. Pour augmenter les déversements Q_A vers l'aval, une élévation du plan d'eau H de la retenue est nécessaire (en règle générale), élévation qui correspond au stockage d'un volume ΔV_R[8] (fig. 3.8).

$Q_A = Q_Z - Q_R$

Lorsque la retenue est remplie jusqu'au niveau normal à l'arrivée de la crue (temps T_0), l'hydrogramme de crue subit la transformation représentée à la figure 3.9: la pointe est réduite du débit ΔQ et décalée de ΔT dans le temps. Si le plan d'eau se situe au-dessous du niveau normal à l'arrivée de la crue (fig. 3.10), le volume utile ΔV_{R1} qui est encore libre doit tout d'abord se remplir avant que ne s'amorce un déversement. Ce stockage additionnel renforce d'une part la réduction du débit de pointe et d'autre part son décalage dans le temps.

La figure 3.11 montre l'effet du degré de remplissage de la retenue à l'arrivée de la crue sur la transformation de l'hydrogramme. L'étude paramétrique – comme d'ailleurs les autres exemples présentés plus loin – se réfère à la retenue de Mattmark et à une crue qui correspond approxi-

[7] Le canton peut accorder ou exiger des dérogations.

[8] Dans le cas de siphons et d'organes d'évacuation des crues équipés de vannes, ce principe ne s'applique pas (ou seulement partiellement).

sekundär der Grundablass und, sofern vorhanden, der Mittelablass sowie die Dotierwasserabgabe zur Verfügung (Bild 3.5). Ihr Einsatz unterliegt grundsätzlich keinen Einschränkungen[6]. Dies ändert sich, wenn der Wasserspiegel über das Stauziel ansteigt. Von diesem Moment an hat die Gewährleistung der Hochwassersicherheit der Stauanlage absolute Priorität. Dies bedeutet, dass die Ablassorgane mit Ausnahme der Triebwasserleitung gemäss verbindlichen Vorschriften, dem Wehrreglement, eingesetzt werden müssen. Dieses ist darauf ausgerichtet, dass

a) der Wasserspiegel auch beim grösstmöglichen Hochwasser die Gefahrenkote, d. h. jene Kote, ab der Schäden auftreten, die die Standsicherheit der Talsperre gefährden, nicht übersteigt (Bild 3.4) und dass
b) unterhalb des Speichers keine Abflussveränderungen $\Delta Q/\Delta T$ auftreten, die grösser sind als jene, die ohne Speicher auftreten würden (Bild 3.6)[7].

3.1.2 Einfluss der Wasserspeicherung im Hochwasserfall

Im Hochwasserfall bewirkt ein Speicher immer eine Transformation der Hochwasserwelle, weil ein Teil des Zuflusses im Speicher temporär zurückgehalten wird (Q_R; Bild 3.7). Solange die Staukote nicht erreicht ist, wird alles zufliessende Wasser zurückgehalten.

$Q_R = Q_Z \rightarrow Q_A = Q_Z - Q_R = 0$

Sobald die Staukote überschritten wird, beginnt die Hochwasserentlastung gemäss Wehrreglement, wobei zur Steigerung der Abflusswassermenge Q_A (in der Regel) ein Ansteigen des Wasserspiegels H, also ein Wasserrückhalt ΔV_R, erforderlich ist[8] (Bild 3.8).

$Q_A = Q_Z - Q_R$

Ist der Speicher zu Beginn des Hochwassers (Zeit T_0) bis zum Stauziel gefüllt, resultiert die in Bild 3.9 dargestellte Transformation der Hochwasserganglinie: der Spitzenabfluss verkleinert sich um ΔQ und verschiebt sich um ΔT. Liegt der Wasserspiegel zu Beginn des Hochwassers unter dem Stauziel (Bild 3.10), muss zuerst der noch freie Anteil ΔV_{R1} des Nutzvolumens aufgefüllt werden, ehe der Überlauf einsetzen kann. Dieser zusätzliche Wasserrückhalt bewirkt

[6] Es dürfen allerdings im Vorfluter ausser in einem Notfall keine künstlichen Hochwasserwellen erzeugt werden.

[7] Der Kanton kann Ausnahmen bewilligen oder verlangen.

[8] Mit Saughebern und mit Hochwasserentlastungsorganen, die mit Schützen ausgerüstet sind, kann dieses Prinzip (teilweise) umgangen werden.

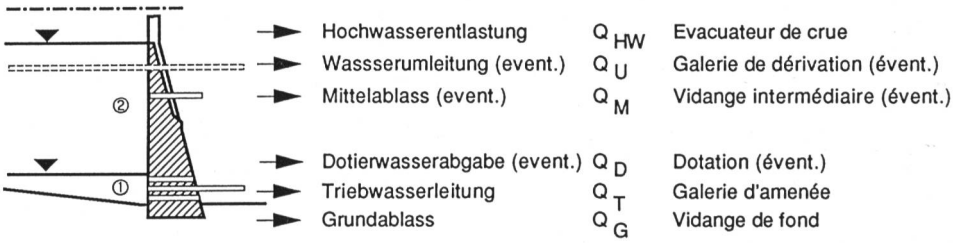


Fig. 3.5. Organes permettant de soutirer ou d'évacuer l'eau d'une retenue.

Bild 3.5. Ablassorgane eines Speichers.

Fig. 3.6. Débit lâché de la retenue.
à gauche: souhaitable
à droite: à éviter (ouverture exagérée d'une vanne)
..... apports à la retenue
———— débit sortant de la retenue

mativement à celle qui atteignit cette retenue en 1993 (fig. 3.12).

Dans la figure 3.11, l'évolution du débit stocké Q_R est plus révélatrice que celle des apports et des déversements. Elle montre comment, en un point quelconque de l'émissaire, le régime de la retenue transforme l'onde naturelle de crue. Une valeur positive de Q_R indique une réduction, une valeur négative, une augmentation du débit. Le débit emmagasiné au temps T^*, c'est-à-dire à l'instant de la pointe de la crue, revêt une importance particulière. Il détermine (en règle générale) l'écrêtement maximum de la crue à l'aval du barrage.

La figure 3.13 montre l'effet que la retenue de Mattmark a eu sur les débits de la Viège de Saas à Saas Balen lors de la crue (effective) de 1993, dont le débit maximum a été estimé à 190 m³/s sur la base des traces de crue[9]. Il convient de relever que l'écrêtement déterminant a atteint non pas 138–79 = 59 m³/s, mais bien 138–23 = 115 m³/s (au temps T^*). Cette différence est à mettre au compte du régime de la retenue, dont l'effet se traduit non seulement par un écrêtement de la crue mais aussi par un décalage de la pointe dans le temps (fig. 3.9).

L'effet d'une retenue sur le débit de crue de l'émissaire ne dépend pas uniquement du degré de remplissage de cette retenue à l'arrivée de la crue. La pointe des apports, leur volume, la superficie de la retenue et les caractéristiques de l'évacuateur de crue jouent également un rôle.

[9] Valeur estimée par Electrowatt Ingénieurs-Conseils S.A. et qui a été reprise par le Service hydrologique et géologique national. Différentes comparaisons tendent à montrer que ce débit a vraisemblablement été surestimé; il devrait être plutôt de l'ordre de 170 m³/s.

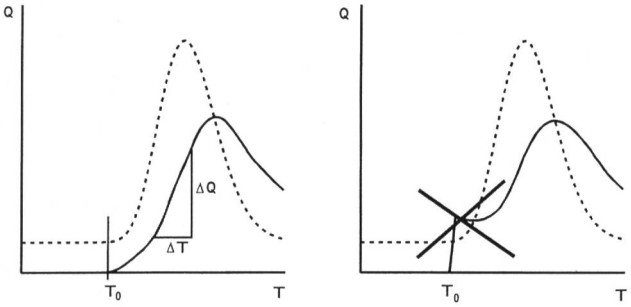


Bild 3.6. Abfluss aus dem Speicher.
links: anzustreben
rechts: unerwünscht, d.h. zu starkes Öffnen eines Ablassorgans
..... Zufluss zum Speicher
———— Abfluss aus dem Speicher

sowohl eine verstärkte Abminderung als auch eine grössere zeitliche Verschiebung des Spitzenabflusses.

Bild 3.11 zeigt, wie sich der Füllungsgrad zu Beginn des Hochwassers auf die Verformung des Hochwassers auswirkt. Der Parameterstudie zugrunde gelegt ist – wie auch bei später dargestellten Beispielen – der Speicher Mattmark und ein Hochwasser, das näherungsweise jenem entspricht, das 1993 dem Speicher zufloss (Bild 3.12).

Bedeutsamer als die Darstellung des Zu- und Abflusses in Bild 3.11 ist der zeitliche Verlauf des Wasserrückhalts Q_R. Er gibt an, wie die natürliche Hochwasserwelle an einer beliebigen Stelle des Vorfluters durch das Seeregime verändert wird. Ein positiver Wert von Q_R bewirkt eine Abminderung, ein negativer Wert eine Vergrösserung des Abflusses. Von besonderer Bedeutung ist der Wasserrückhalt zum Zeitpunkt T^*, d.h. zum Zeitpunkt der Hochwasserspitze. Er bestimmt (in der Regel) die maximale Abminderung der Hochwasserspitze im Vorfluter.

In Bild 3.13 ist für das (effektive) Hochwasser 1993 die Wirkung des Speichers Mattmark auf den Abfluss der Saaser

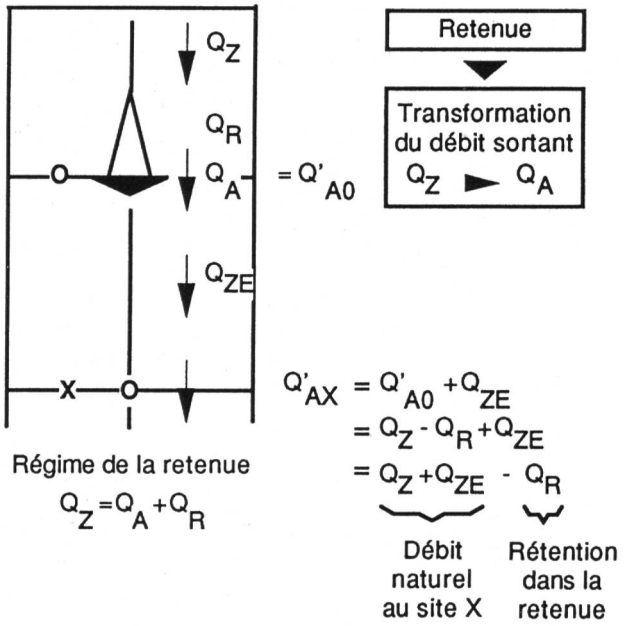


Fig. 3.7. Transformation des débits par une retenue implantée sur un cours d'eau.
Q_Z = apports à la retenue
Q_R = débit stocké dans la retenue
Q_A = débit sortant de la retenue
ΔQ_{ZE} = apports du bassin versant intermédiaire à l'aval de la retenue

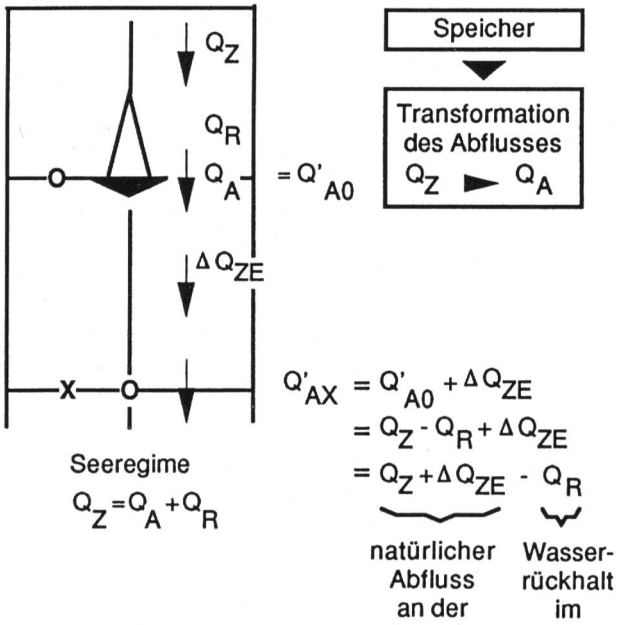


Bild 3.7. Transformation des Abflusses durch einen in das Gewässer eingegliederten Speicher.
Q_Z = Zufluss zum Speicher
Q_R = Wasserrückhalt im Speicher
Q_A = Abfluss aus dem Speicher
ΔQ_{ZE} = Wasseraufkommen im Zwischeneinzusgebiet unterhalb des Speichers

Tableau 3.1. Degrés de remplissage des retenues situées dans le bassin versant du Rhône, à l'amont de St-Maurice, enregistrés durant la période 1984–1993.

Tabelle 3.1. Füllungsgrade der Stauanlagen im Einzugsgebiet der Rhone oberhalb von St-Maurice während der Jahre 1984–1993.

Stauanlage Retenue		Füllungsgrad in % am / Degré de remplissage en % le 15.8	31.8	15.9	30.9	15.10
Cleuson	Mittel/Moy	80.5	90.2	93.2	94.7	93.6
	Minimum	57	71	76	81	83
	Maximum	91	97	98	98	98
Gebidem **)	Mittel/Moy	79.1	77.2	76.4	82.6	91.7
	Minimum	54	66	48	77	82
	Maximum	100	92	99	98	98
Grande Dixence	Mittel/Moy	84.9	94.8	96.1	97.1	96.3
	Minimum	75	89	91	92	87
	Maximum	93	98	98	99	98
Emosson	Mittel/Moy	77.7	90	92.5	94.5	93.1
	Minimum	63	79	81	83	80
	Maximum	85	96	98	98	98
Ferden **)	Mittel/Moy	63.3	62.8	52.5	56.4	62.5
	Minimum	48	43	11	21	25
	Maximum	76	86	87	87	93
Gries	Mittel/Moy	77.6	93	94.8	95.3	93.9
	Minimum	57	70	77	79	80
	Maximum	88	100	100	99	99
Moiry	Mittel/Moy	87.2	96.8	98.2	98.6	96.8
	Minimum	74	85	92	96	87
	Maximum	94	100	100	100	99
Mattmark	Mittel/Moy	84.9	92.4	92.4	93.8	93
	Minimum	65	74	79	82	84
	Maximum	97	98	98	98	98
Mauvoisin	Mittel/Moy	86	93.3	94.3	95.5	94.8
	Minimum	73	85	88	88	85
	Maximum	94	96	99	98	98
Salanfe ***)						
Les Toules	Mittel/Moy	92.2	95.6	96.4	94.5	96.3
	Minimum	82	91	93	95	94
	Maximum	98	99	99	99	99
Zeuzier *)	Mittel/Moy	93.9	96.2	97.3	97.8	95.5
	Minimum	89	92	96	94	87
	Maximum	98	100	99	100	99

* à partir de 1989 (auparavant exploitation exceptionnelle)
** n'est pas une retenue saisonnière
*** n'a jamais complètement pu être mis en eau avant 1994 en raison de pertes d'eau.

* ab 1989 (vorher ausserordentlicher Betrieb)
** kein Jahresspeicher
*** wegen Sickerwasserverlusten bis 1994 nur partiell einstaubar.

Tableau 3.2. Effet de la retenue hebdomadaire de Ferden lors des crues de 1987, 1993 et 1994.

Tabelle 3.2. Wirkung des Wochenspeichers Ferden während der Hochwässer 1987, 1993 und 1994.

	Q_{Zmax} m³/s	Q^*_{Amax} m³/s	ΔQ m³/s	ΔT Stunden Heures	zur Zeit T* au temps T* Q_T m³/s	Q_R 2) m³/s
HW 1987	45.2	20.9	- 24.3	6	21.9	23.3
HW 1993	58.9	0	- 58.9	--	21.9	37.0
HW 1994	27.8 1)	0	- 27.8	--	10.2	17.6

1 Ne peut pas être considéré comme crue.
Kann nicht als Hochwasser gewertet werden.
2 Réduction maximale du débit sortant à l'aval de la centrale de Steg.
Maximale Abflussminderung unterhalb der Wasserrückgabe der Zentrale Steg.

Tableau 3.3. Effet de la retenue de Mattmark sur les débits de la Viège lors de la crue de 1993.

Station de mesure	au temps T* Débit sortant effectif Q'_A m³/s	Débit sortant réduit $\Delta Q = Q_R + Q_{Trans}$ m³/s	Débit sortant naturel $Q_A = Q'_A + \Delta Q$ m³/s	Effet de la réduction $\Delta Q / Q_A$ %
Saaser Vispa - Mattmark	23	115 1)	138	83
Saaser Vispa - Saas Balen 3)	190	115 1)	305	38
Vispa - Visp	330	164 2)	494	--
		115 1)	494	23

1 Rétention dans le retenue de Mattmark.
2 Rétention dans la retenue de Mattmark et débit dérivé de la vallée de Zermatt vers la retenue de Grande Dixence.
3 Voir figure 3.13.

Tabelle 3.3. Wirkung des Speichers Mattmark auf die Abflüsse der Vispa während des Hochwassers 1993.

Gewässer - stelle	zur Zeit T* effektiver Abfluss Q'_A m³/s	Abfluss - abminderung $\Delta Q = Q_R + Q_{Trans}$ m³/s	natürlicher Abfluss $Q_A = Q'_A + \Delta Q$ m³/s	Wirkung der Abminderung $\Delta Q / Q_A$ %
Saaser Vispa - Mattmark	23	115 1)	138	83
Saaser Vispa - Saas Balen 3)	190	115 1)	305	38
Vispa - Visp	330	164 2)	494	--
		115 1)	494	23

1 Wasserrückhalt im Speicher Mattmark.
2 Wasserrückhalt im Speicher Mattmark und Wasserüberleitung vom Mattertal in den Speicher Grande Dixence.
3 Siehe Bild 3.13.

Vispa in Saas Balen dargestellt, wo aufgrund der Hochwasserspuren im Maximum etwa 190 m³/s Wasser abgeflossen sind[9]. Hervorzuheben ist, dass die massgebende Abflussminderung nicht nur 138 – 79 = 59 m³/s, sondern 138 – 23 = 115 m³/s (Zeitpunkt *T**) betrug. Verantwortlich für diese verstärkte Wirkung ist der Umstand, dass das Seeregime die Abflussspitze nicht nur vermindert, sondern auch zeitlich verschiebt (Bild 3.9).

Der Einfluss eines Speichers auf den Hochwasserabfluss im Vorfluter ist nicht nur vom Füllungsgrad des Speichers zu Beginn des Hochwassers abhängig. Mitbestimmend sind auch die Spitze des Zuflusses, die Fülle des Zuflusses, die Grösse der Oberfläche des Speichers und die Gestaltung der Hochwasserentlastung. Die Wirkungen der drei erstgenannten Parameter sind in den Bildern 3.14, 3.15 und 3.16 dargestellt. Man erkennt, dass sich diese nicht beeinflussbaren Parameter[10] weniger stark auswirken als der Füllungsgrad zu Beginn des Hochwassers. Weil hinsichtlich des Ein-

[9] Wert, der von der Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG abgeschätzt und von der Landeshydrologie und -geologie übernommen wurde. Er dürfte aber aufgrund von Quervergleichen wahrscheinlich zu hoch eingeschätzt sein (eher etwa 170 m³/s).

[10] Jedes Hochwasser hat bestimmte (zufällige) Charakteristiken (Spitzenabfluss, Fülle, ...), und jeder Speicher hat vorgegebene (feste) Abmessungen.

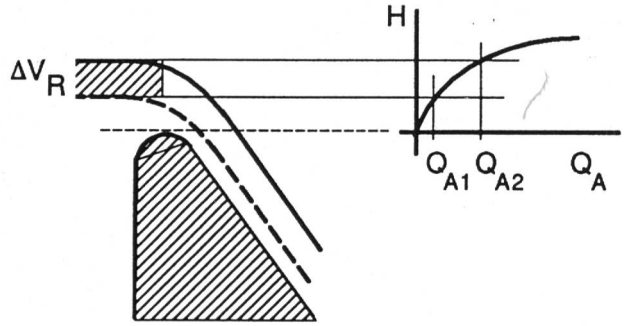
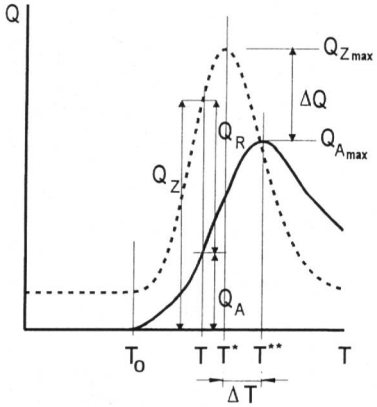


Fig. 3.8. Déversoir libre.
------ plan d'eau au temps $T1 = T$
——— plan d'eau au temps $T2 = T + \Delta T$

Bild 3.8. Freier Hochwasserüberfall.
------ Wasserstand zur Zeit $T1 = T$
——— Wasserstand zur Zeit $T2 = T + \Delta T$



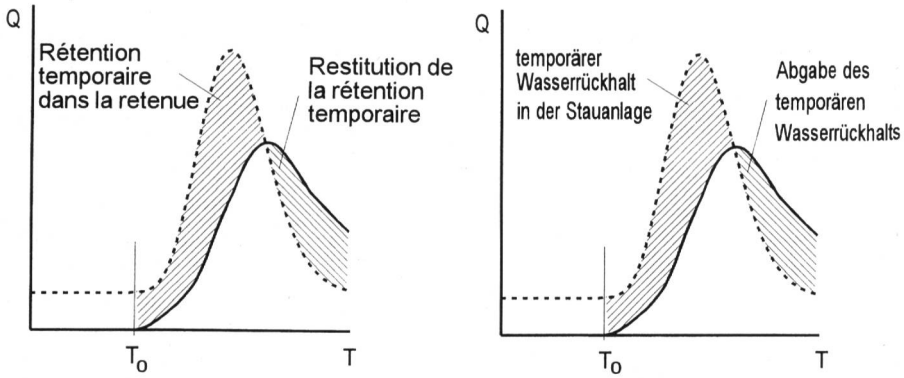


Fig. 3.9. Transformation de la crue en cas de retenue entièrement remplie au début de la crue.
------- hydrogramme des apports
——— hydrogramme du débit sortant
T_0 = début de la crue
T^* = temps correspondant à la pointe de la crue
T^{**} = temps correspondant au débit sortant maximum

Bild 3.9. Transformation des Hochwassers in einem Speicher, wenn dieser zu Beginn voll gefüllt ist.
------- Ganglinie des Zuflusses
——— Ganglinie des Abflusses
T_0 = Beginn des Hochwassers
T^* = Zeitpunkt der Hochwasserspitze
T^{**} = Zeitpunkt des grössten Abflusses aus dem Speicher

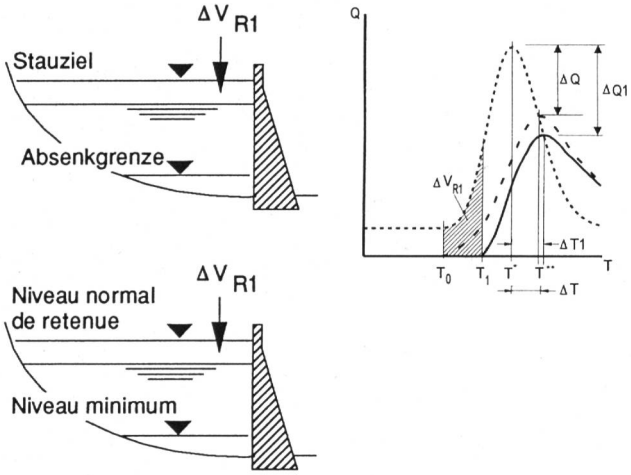


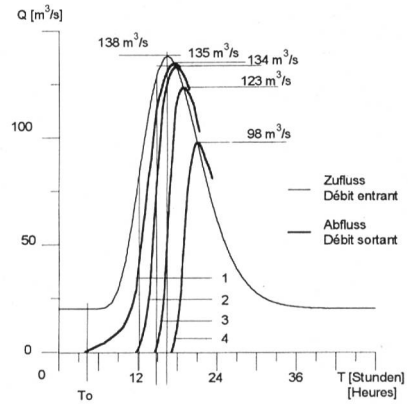
Fig. 3.10. Transformation de la crue en cas de retenue partiellement remplie au début de la crue.
--------- hydrogramme des apports
------- hydrogramme du débit sortant selon fig. 3.9
——— hydrogramme du débit sortant
T_0 = début de la crue
T_1 = début des déversements
T^* = temps correspondant à la pointe de la crue
T^{**} = temps correspondant au débit sortant maximum

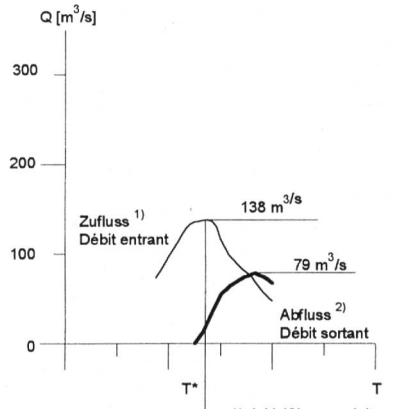
Bild 3.10. Transformation des Hochwassers in einem Speicher, wenn dieser zu Beginn nicht voll gefüllt ist.
--------- Ganglinie des Zuflusses
------- Ganglinie des Abflusses gemäss Bild 3.9
——— Ganglinie des Abflusses
T_0 = Beginn des Hochwassers
T_1 = Beginn des Abflusses aus dem Speicher
T^* = Zeitpunkt der Hochwasserspitze
T^{**} = Zeitpunkt des grössten Abflusses aus dem Speicher

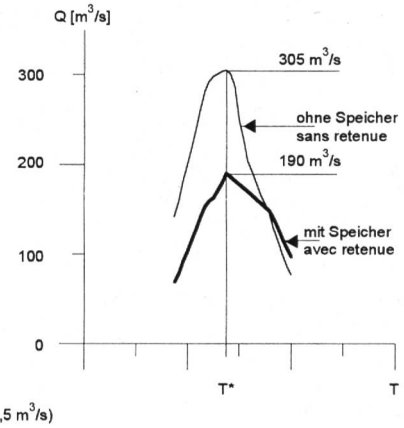
flusses eines Speichers auf den Abfluss im Vorfluter immer verschiedene Parameter massgebend sind, wird ersichtlich, dass er jedes ihm zufliessende Hochwasser anders transformiert und den Vorfluter unterschiedlich beeinflusst.

Bei Jahresspeichern, d.h. bei Speichern, die während des Sommers gefüllt und während des Winters genutzt werden, ist der Füllungsgrad im Mai sehr klein und nimmt bis gegen Ende September sukzessive zu. Die Wirkung auf ein Hochwasser nimmt folglich gegen den Herbst hin ab und erreicht ihr Minimum zu einer Zeit, da das Hochwasserrisiko noch voll besteht, wie die Hochwässer vom 24. September 1993 und vom 24. September 1994 gezeigt haben. Die Kraftwerksbetreiber halten deshalb im Spätsommer mit der Füllung der Stauanlagen in der Regel etwas zurück (Tabelle 3.1 und Bild 3.17). Sie möchten bei Hochwasser möglichst wenig Wasser durch Überlauf verlieren. Bestimmend für den effektiven Füllungsgrad zu einem bestimmten Zeitpunkt sind aber letztlich energie- und marktwirtschaftliche Gesichtspunkte. Änderungen der bisherigen Praxis sind deshalb nicht auszuschliessen.

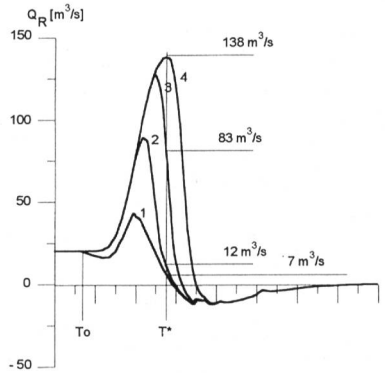
Bei Wochenspeichern, wie z.B. dem Speicher Ferden des Kraftwerks Lötschen, sind niedrige Füllungsgrade am Freitag vorhanden, weil der Speicher während der Arbeitstage zur Stromproduktion eingesetzt und während des Wochenendes wieder aufgefüllt wird. Das Ausmass der Abminderung eines Hochwassers ist deshalb auch vom Wochentag abhängig, an dem es auftritt. Ganz allgemein wird aber auch bei Wochenspeichern versucht, Wasserverluste infolge Überlaufs bestmöglich zu minimieren. Dies geschieht dadurch, dass bei überdurchschnittlichem Zufluss auch nachts und an Wochenenden turbiniert und bei erwarteten Starkniederschlägen soweit möglich eine Vorabsenkung des







1) inkl. Wasserzuleitung (16,5 m³/s)
y compris adductions
2) exkl. Turbinenbetrieb
sans turbinage



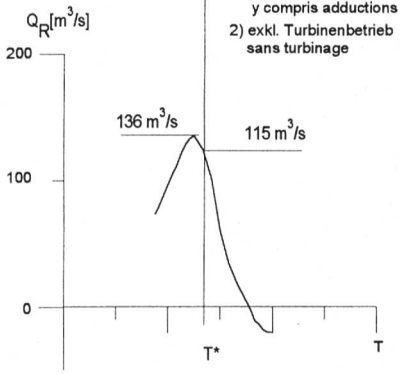


Fig. 3.13. Influence de la retenue de Mattmark sur le débit de son émissaire.
A gauche: débit de la Viège de Saas à l'aval immédiat de la retenue.
A droite: débit de la Viège de Saas à la station hydrométrique de Saas Balen.

Bild 3.13. Hochwasser 1993 – Einfluss des Speichers Mattmark auf den Abfluss im Vorfluter.
Links: Abfluss der Saaser Vispa unmittelbar unterhalb des Speichers.
Rechts: Abfluss der Saaser Vispa bei der Abflussmessstation Saas Balen.

Fig. 3.11. Influence du degré de remplissage de la retenue sur le débit sortant Q_A et le débit stocké Q_R.
1 degré de remplissage 100 %
2 degré de remplissage 99 %
3 degré de remplissage 98 %
4 degré de remplissage 97 %
(Retenue de Mattmark – crue idéalisée de 1993; pas de turbinage)

Bild 3.11. Einfluss des Füllungsgrads des Speichers auf Abfluss Q_A und Wasserrückhalt Q_R.
1 Füllungsgrad 100 %
2 Füllungsgrad 99 %
3 Füllungsgrad 98 %
4 Füllungsgrad 97 %
(Speicher Mattmark – idealisiertes Hochwasser 1993; kein Turbinenbetrieb)

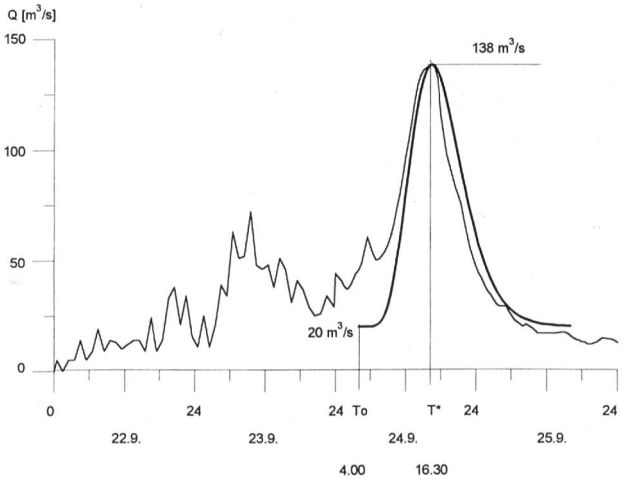


Fig. 3.12. Crue de 1993 – apports à la retenue de Mattmark.
——— apports effectifs (y compris adductions et pompage)
——— apports idéalisés

Bild 3.12. Hochwasser 1993 – Zufluss zum Speicher Mattmark.
——— effektiv (d.h. einschliesslich Wasserzuleitung und Pumpwasser)
——— idealisiert

Beckens vorgenommen wird. Angesichts des begrenzten Nutzvolumens besteht allerdings keine Gewähr, dass ein Überlauf verhindert werden kann. Im Minimum wird er aber reduziert. Diese energiewirtschaftlich angemessene Bewirtschaftung des Wochenspeichers deckt sich weitestgehend mit den Anliegen des Hochwasserschutzes. Für den Wochenspeicher Ferden sind die Hauptdaten in der Tabelle 3.2 aufgeführt.

Zum Schluss sei noch darauf hingewiesen, dass die Wirkung Q_R des Speichers mit zunehmender Entfernung vom Speicher an Bedeutung verliert, weil die Abflüsse flussabwärts immer grösser werden (Tabelle 3.3).

3.1.3 Einfluss des Turbinenbetriebs im Hochwasserfall

Wird während eines Hochwasserereignisses Wasser turbiniert (Q_T; Bild 3.18), hat dies die gleiche Wirkung, wie wenn der Stauanlage statt der aus dem natürlichen Einzugsgebiet anfallenden Wassermenge Q_Z nur die um Q_T verminderte Wassermenge

$$Q_z^* = Q_Z - Q_T$$

zufliessen würde. Es stellt sich folglich ein verändertes Seeregime ein

$$Q_z^* = Q_A^* + Q_R^*$$

und es wird insbesondere der Füllprozess im Speicher verlangsamt.

Längs des Vorfluters ist die Auswirkung ober- und unterhalb der Wasserrückgabe unterschiedlich. Oberhalb vermindert das Turbinieren den Abfluss um etwa die turbinierte Wassermenge Q_T (Bild 3.19). Dies kommt allerdings nur dann zum Tragen, wenn beim Speicher Wasserüberlauf vorhanden ist. Unterhalb der Wasserrückgabe wird der Restabfluss solange um Q_T erhöht, als beim Speicher kein Überlauf besteht. Ist die Hochwasserentlastung in Betrieb, neutralisieren sich bei der Wasserrückgabe die beiden Effekte.

Hieraus folgt, dass ein Turbinieren im Hochwasserfall nur dann angezeigt ist, wenn die Vorteile oberhalb der Wasserrückgabe grösser sind als die Nachteile unterhalb. Dies dürfte im Fall der Kraftwerke Mattmark zutreffen, weil

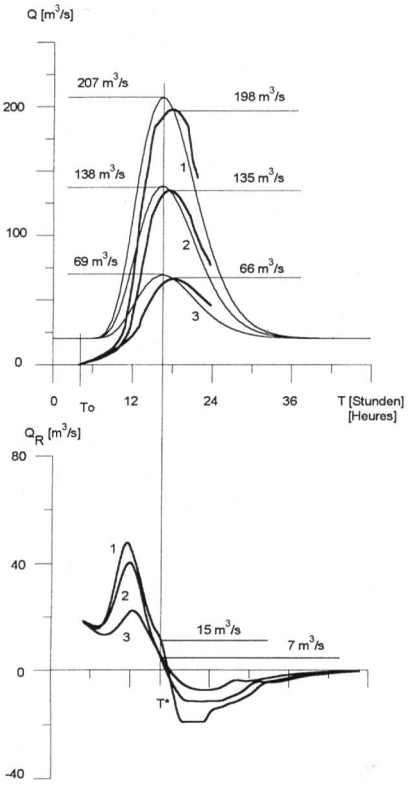


Fig. 3.14. Influence des apports de pointe sur le débit sortant Q_A et le débit stocké Q_R (retenue de Mattmark – hydrogramme des apports 2 = crue idéalisée de 1993; pas de turbinage).

Bild 3.14. Einfluss der Spitze des Zuflusses auf Abfluss Q_A und Wasserrückhalt Q_R (Speicher Mattmark – Zuflusshydrogramm 2 = idealisiertes Hochwasser 1993; kein Turbinenbetrieb).

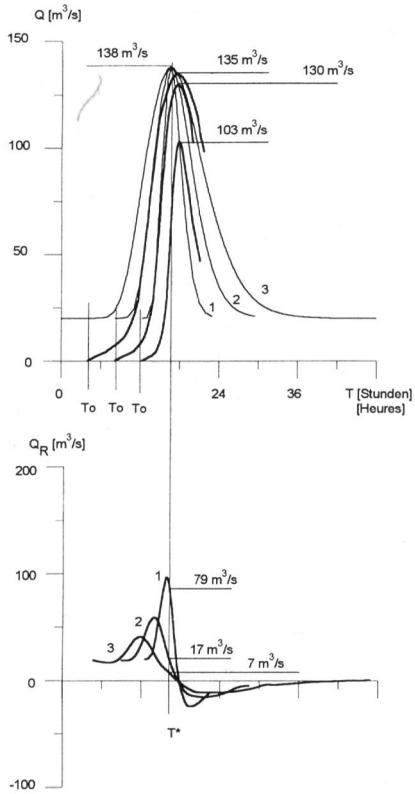


Fig. 3.15. Influence du volume des apports sur le débit sortant Q_A et le débit stocké Q_R (retenue de Mattmark – hydrogramme des apports 3 = crue idéalisée de 1993; pas de turbinage).

Bild 3.15. Einfluss der Fülle des Zuflusses auf Abfluss Q_A und Wasserrückhalt Q_R (Speicher Mattmark – Zuflusshydrogramm 3 = idealisiertes Hochwasser 1993; kein Turbinenbetrieb).

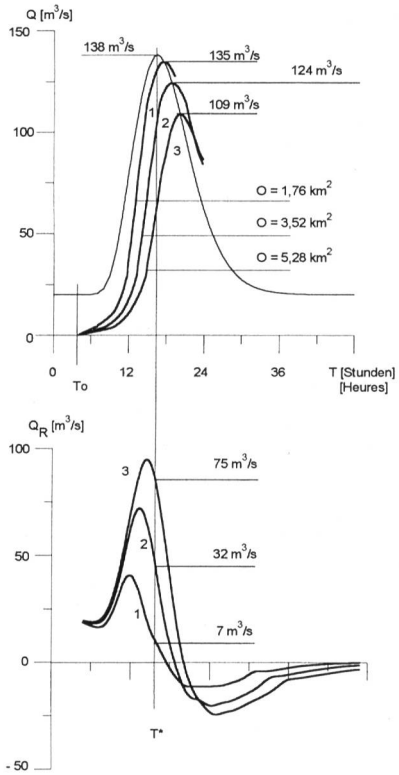


Fig. 3.16. Influence de la superficie du plan d'eau sur le débit sortant Q_A et le débit stocké Q_R (retenue de Mattmark – crue idéalisée de 1993; pas de turbinage – superficie effective du plan d'eau: 1,76 km²).

Bild 3.16. Einfluss der Grösse der Seeoberfläche auf Abfluss Q_A und Wasserrückhalt Q_R (Speicher Mattmark – idealisiertes Hochwasser 1993; kein Turbinenbetrieb – effektive Seeoberfläche: 1,76 km²).

L'effet des trois premiers paramètres mentionnés ci-dessus est illustré par les figures 3.14, 3.15 et 3.16. On constate que ces paramètres, que l'on ne peut pas modifier[10], affectent moins les résultats que le degré de remplissage à l'arrivée de la crue. Comme l'effet d'une retenue sur le débit déversé dans l'émissaire est toujours tributaire de différents paramètres, il est évident que chaque crue qui atteindra la retenue sera transformée différemment. L'effet sur l'émissaire sera également différent.

Le degré de remplissage des retenues à accumulation saisonnière, c'est-à-dire celles dont le remplissage a lieu en été et dont les eaux sont utilisées en hiver, est très faible en mai et augmente progressivement jusqu'à fin septembre. En conséquence, l'effet d'écrêtement des crues diminue vers l'automne et atteint son minimum à une période où le risque de crues est encore bien présent, comme l'ont montré les crues des 24 septembre 1993 et 1994. Les exploitants des aménagements hydroélectriques retardent par conséquent quelque peu le remplissage des retenues vers la fin de l'été (tableau 3.1 et fig. 3.17), car il veulent éviter dans la mesure du possible les pertes par déversement en cas de crue. En dernier ressort, ce sont toutefois les considérations énergétiques et économiques qui déterminent l'évolution du degré de remplissage effectif. Des modifications de la pratique actuelle ne sont donc pas exclues.

[10] Chaque crue a des caractéristiques (débit de pointe, volume, ...) données (aléatoires) et chaque retenue a des dimensions données (fixes).

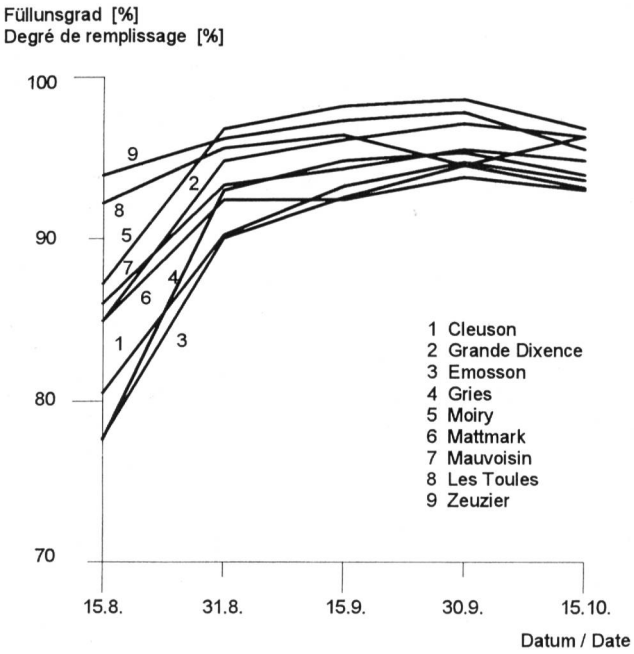


Fig. 3.17. Degrés de remplissage moyens des retenues situées dans le bassin versant du Rhône, à l'amont de St-Maurice (période 1984–1993).

Bild 3.17. Mittlere Füllungsgrade der Stauanlagen im Einzugsgebiet der Rhone oberhalb vom St-Maurice während der Jahre 1984–1993.

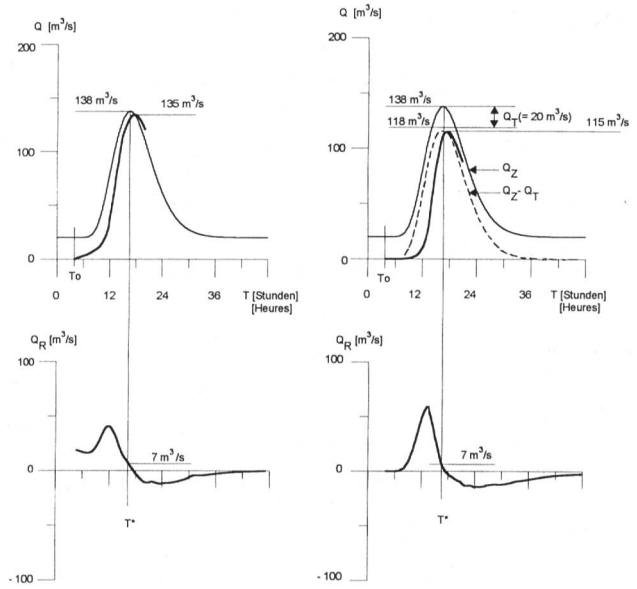


Fig. 3.19. Influence du turbinage sur le débit sortant Q_A et le débit stocké Q_R.
A gauche: sans turbinage.
A droite: avec turbinage (Q_T = 20 m³/s).
(Retenue de Mattmark – crue idéalisée de 1993; degré de remplissage au temps T_0: 100 %)

Bild 3.19. Einfluss des Turbinenbetriebs auf Abfluss Q_A und Wasserrückhalt Q_R.
Links: ohne Turbinenbetrieb.
Rechts: mit Turbinenbetrieb (Q_T = 20 m³/s).
(Speicher Mattmark – idealisiertes Hochwasser 1993; Füllungsgrad zur Zeit T_0: 100 %).

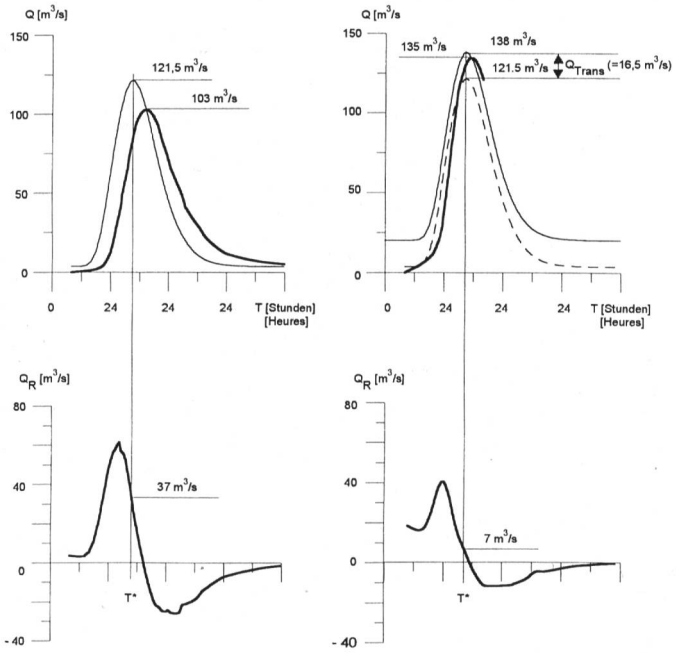


Fig. 3.22. Influence d'une adduction sur le débit sortant Q_A et le débit stocké Q_R.
A gauche: sans adduction.
A droite: avec adduction (Q_{Trans} = 16,5 m³/s).
(Retenue de Mattmark – crue idéalisée de 1993; degré de remplissage au temps T_0: 100 %).

Bild 3.22. Einfluss einer Wasserzuleitung auf Abfluss Q_A und Wasserrückhalt Q_R.
Links: ohne Wasserzuleitung.
Rechts: mit Wasserzuleitung (Q_{Trans} = 16,5 m³/s).
(Speicher Mattmark – idealisiertes Hochwasser 1993; Füllungsgrad zur Zeit T_0: 100 %).

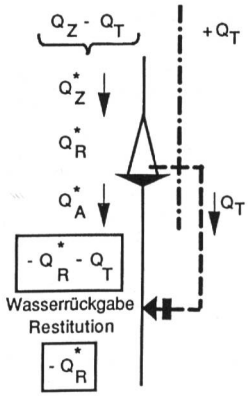


Fig. 3.18. Effet du turbinage.

Bild 3.18. Einfluss des Turbinenbetriebs.

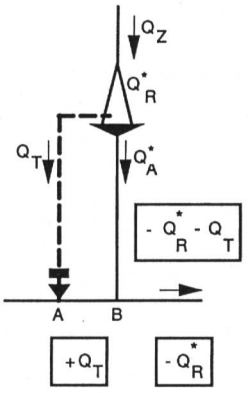


Fig. 3.20. Effet du turbinage en cas de non-restitution dans l'émissaire.

Bild 3.20. Einfluss des Turbinenbetriebs bei Wasserrückgabe ausserhalb des Vorfluters.

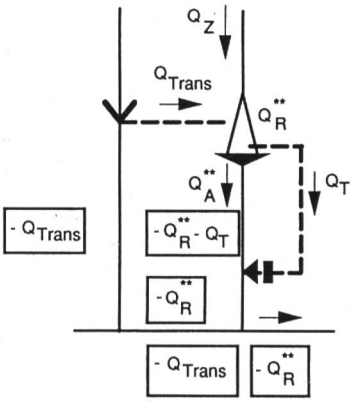


Fig. 3.21. Effet d'une adduction (et du turbinage).

Bild 3.21. Einfluss einer Wasserzuleitung (und des Turbinenbetriebs).

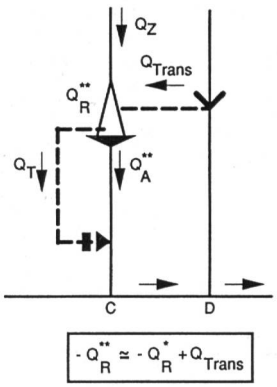


Fig. 3.23. Effet des apports d'une adduction dérivant les eaux dans le sens contraire de l'écoulement normal.

Bild 3.23. Einfluss einer Wasserzuleitung entgegen der natürlichen Fliessrichtung.

Le degré de remplissage des retenues hebdomadaires, comme par exemple celle de Ferden, exploitée par les Forces Motrices de Lötschen, est bas le vendredi. En effet, ces retenues sont utilisées pour la production d'énergie pendant les jours ouvrables et sont remplies à nouveau durant le week-end. L'effet d'écrêtement dépend donc du jour de la semaine où se produit la crue. En règle générale, on cherche cependant aussi à réduire au minimum les pertes par déversement des retenues à compensation hebdomadaire. Dans ce but, on turbine aussi de nuit et pendant le week-end lorsque les apports sont supérieurs à la moyenne et, si possible, on abaisse la retenue à titre préventif lorsque des pluies importantes sont attendues. Compte tenu du volume utile limité, on ne peut toutefois être certain d'éviter tout déversement. Néanmoins, même dans le cas le plus défavorable on obtiendra encore une réduction des déversements. Cette exploitation conforme aux impératifs de la production d'énergie tient largement compte des besoins de la protection contre les crues. Les données principales relatives à la retenue à compensation hebdomadaire de Ferden figurent dans le tableau 3.2.

Enfin, il faut souligner que l'importance relative de l'effet de stockage Q_R de la retenue s'amenuise à mesure que l'on s'écarte de celle-ci, les débits de l'aval devenant toujours plus importants (tableau 3.3).

3.1.3 Effet du turbinage en cas de crue

Un turbinage effectué pendant une crue (Q_T, fig. 3.18) équivaut à une réduction des apports du bassin versant naturel Q_Z de la quantité turbinée Q_T. On peut donc considérer que l'apport suivant atteint la retenue

$Q_z^* = Q_Z - Q_T$

L'équation du régime du lac prend alors la forme

$Q_z^* = Q_A^* + Q_R^*$

et notamment le processus de remplissage de la retenue s'en trouve ralenti.

L'effet le long de l'émissaire n'est pas le même à l'amont et à l'aval de la restitution. En amont, le turbinage réduit le débit de l'ordre du débit turbiné Q_T (fig. 3.19). Cette situation ne se présente toutefois que lorsque le barrage déverse. A l'aval de la restitution, le débit résiduel sera augmenté de Q_T tant que le barrage ne déverse pas. Si l'évacuateur de crue est en fonction, les deux effets se neutralisent au droit du point de restitution.

Par conséquent, le turbinage en cas de crue n'est indiqué que si les avantages qui en résultent à l'amont de la restitution l'emportent sur les inconvénients provoqués à l'aval. Tel semble être le cas pour l'aménagement de Mattmark car

- les villages de Saas Almagell et de Saas Grund se trouvent à proximité de la retenue

et le turbinage permet

- de retarder le début du déversement et
- de réduire notablement le débit de la Viège de Saas.

De même, pour l'aménagement de Lötschen, il est indiqué de turbiner, car la réduction du débit entre Ferden et Steg permet de limiter la mise en mouvement des matériaux et de protéger le cours inférieur de dépôts indésirables.

En revanche, il serait préférable que Grande Dixence S.A. ne turbine pas ses eaux, car leur restitution dans le Rhône a lieu dans un tronçon critique (fig. 3.24). Toutefois, si le lac est plein, on ne pourra guère renoncer à turbiner, car sinon on serait obligé de mettre hors service les adductions de la vallée de Zermatt (et du val d'Hérens) pour pouvoir maîtriser le niveau du lac conformément aux dispositions de la consigne de manœuvre des vannes.

- die Dörfer Saas Almagell und Saas Grund sehr nahe beim Speicher liegen

und weil durch das Turbinieren

- der Beginn des Hochwasserüberlaufs zeitlich hinausgeschoben und
- die Saaser Vispa nicht unerheblich entlastet wird.

Ebenfalls angezeigt ist das Turbinieren beim Kraftwerk Lötschen, weil mit der Abflussverminderung zwischen Ferden und Steg weniger Geschiebe in Bewegung gesetzt wird und der Unterlauf besser vor unerwünschten Auflandungen geschützt werden kann.

Eher unerwünscht ist das Turbinieren seitens der Kraftwerke Grande Dixence, weil die Wasserrückgabe in einen kritischen Rhoneabschnitt erfolgt (Bild 3.24). Man wird zumindest bei vollem Speicher allerdings kaum darauf verzichten können, weil ohne Turbinenbetrieb aufgrund des Wehrreglements für den Speicher Grande Dixence die Wasserzuleitung aus dem Mattertal (und dem Val d'Hérens) eingestellt werden müsste.

Erfolgt die Wasserrückgabe ausserhalb des Vorfluters des Speichers (Bild 3.20), besteht zwischen der Wasserrückgabe (Punkt A) und dem Vorfluter (Punkt B) ein Gewässerabschnitt, in dem der Abfluss während des Turbinenbetriebs um die turbinierte Wassermenge Q_T vergrössert wird. Bei grösseren Hochwässern kann es dort zu unerwünschten Abflussverhältnissen kommen und ein Einstellen des Turbinenbetriebs nahelegen. Das Kraftwerk Mauvoisin besitzt diese Konstellation. Gleichzeitig gehört der betroffene Rhoneabschnitt Riddes–Martigny zu den kritischsten im Wallis. Die Frage, wann turbiniert werden darf und wann nicht, ist somit erheblich.

Der Turbinenbetrieb ist während eines Hochwassers auch nicht immer möglich. Vorstehend wurden Fälle angesprochen, bei denen ein Turbinieren während eines grösseren Hochwassers nicht angezeigt ist. Dazu gesellen sich jene Fälle, die einen Einsatz der Turbinen (oder einer einzelnen Turbine) verunmöglichen:

- technische Panne,
- Unmöglichkeit, die produzierte Energie in das Übertragungsnetz einzuspeisen,
- laufende Unterhaltsarbeiten.

Eine technische Panne hat 1993 den Turbinenbetrieb auf der oberen Stufe des Kraftwerks Mattmark verunmöglicht (Ausfall des Signalkabels).

Die Energieabgabe ins Übertragungsnetz war 1993 im Wallis nur dank des voll verfügbaren Transportnetzes und der Rücksichtnahme seitens der Kraftwerke in anderen Regionen der Schweiz möglich. Ganz allgemein werden während Hochwassersituationen nach besten Möglichkeiten auch nachfolgende Massnahmen getroffen:

- Unterbrechung von Arbeiten an Leitungen und provisorische Inbetriebnahme derselben,
- Sistierung oder Reduktion von Energiekäufen im Ausland,
- kurzfristige Erschliessung von Absatzmöglichkeiten im Ausland (indem Angebote zu sehr tiefen Preisen gemacht werden),
- Abstellen von Laufkraftwerken (unter Inkaufnahme von Nutzungsverlusten),
- Zurückfahren von Kernkraftwerken.

Das ordentliche Zurückfahren von Kernkraftwerken erfolgt allerdings in der Regel nicht plötzlich, sondern geplant und meist an Wochenenden (Tabelle 3.4).

Gestützt auf das Gesagte wäre es nicht vernünftig, sich auf die entlastende Wirkung des Turbinenbetriebs verlassen zu wollen. Die Unsicherheit, ob und inwieweit die Turbinen im Hochwasserfall eingesetzt werden können, besteht.

Si la restitution se fait en dehors de l'émissaire de la retenue (fig. 3.20), il existe entre le point de restitution de l'eau (point A) et l'émissaire (point B) un tronçon de cours d'eau sur lequel le débit est augmenté de la quantité Q_T durant le turbinage. Lors de crues importantes, le débit peut y atteindre des valeurs inadmissibles et dicter l'arrêt des turbines. C'est le cas de l'aménagement de Mauvoisin: le tronçon concerné du Rhône, compris entre Riddes et Martigny, est l'un des plus critiques du Valais. Il est donc essentiel de savoir quand il est possible de turbiner et quand il faut s'en abstenir.

Il n'est en outre pas toujours possible de turbiner lors d'une crue. Des cas ont été évoqués ci-dessus dans lesquels le turbinage n'est pas indiqué durant une crue importante. A cela il faut ajouter les cas où la mise en service des turbines (ou d'une seule turbine) est impossible:

- incident technique,
- impossibilité d'injecter dans le réseau l'énergie produite,
- travaux d'entretien en cours.

Un incident technique a rendu impossible le turbinage sur le palier supérieur des Forces Motrices de Mattmark (défaillance du câble de signalisation) en 1993.

En 1993, l'injection dans le réseau de l'énergie produite n'a été possible en Valais que grâce à l'entière disponibilité du réseau de transmission et à l'attitude prévenante des producteurs d'autres régions de la Suisse. De manière générale, et pour autant que ce soit possible, les mesures suivantes sont également prises en situation de crue:

- interruption des travaux en cours sur les lignes de transmission et mise en service provisoire de ces dernières,
- annulation ou réduction des achats d'énergie à l'étranger,
- exploitation à court terme des possibilités de vente à l'étranger (en offrant de l'énergie à très bas prix),
- arrêt de centrales au fil de l'eau (en s'accommodant des pertes)
- réduction de la production des centrales nucléaires.

Le ralentissement de la production des centrales nucléaires ne s'improvise pas en règle générale mais s'effectue de manière planifiée, le plus souvent pendant le week-end (tableau 3.4).

Les considérations qui précèdent montrent qu'il serait imprudent de se fier au délestage des cours d'eau résultant du turbinage. L'incertitude liée à la question de savoir si l'on peut utiliser les turbines, et dans quelle mesure, demeure.

3.1.4 Effet des adductions en cas de crue

Lorsque des eaux sont amenées d'une autre vallée (ou de cours d'eau en aval de la retenue) pendant une crue (Q_{Trans}, fig. 3.21), les apports Q_Z du bassin versant naturel atteignant la retenue seront augmentés de la quantité Q_{Trans}. Les apports totaux atteignant la retenue seront donc $Q_Z + Q_{Trans}$. Si l'on prend en compte un éventuel turbinage Q_T, ces apports deviennent

$$Q_Z^{**} = Q_Z + Q_{Trans} - Q_T$$

et l'équation du régime du lac influencé par les adductions et le turbinage,

$$Q_Z^{**} = Q_A^{**} + Q_R^{**}$$

La comparaison avec le cas sans adductions (fig. 3.22, à gauche) montre que les déversements de la retenue croissent environ de la quantité Q_{Trans} (fig. 3.22, à droite). Cette augmentation s'étend à tout le tronçon compris entre la retenue et la confluence avec le cours d'eau dont les eaux sont dérivées dans l'adduction. En aval de la confluence, l'effet de l'adduction est neutralisé puisque le débit du

3.1.4 Einfluss einer Wasserüberleitung im Hochwasserfall

Wird während eines Hochwasserereignisses Wasser aus einem anderen Tal (oder von Gewässern unterhalb des Speichers) zugeleitet (Q_{Trans}; Bild 3.21), hat dies die gleiche Wirkung, wie wenn der Stauanlage statt der aus dem natürlichen Einzugsgebiet anfallenden Wassermenge Q_Z eine um Q_{Trans} vergrösserte Wassermenge $Q_Z + Q_{Trans}$ zufliessen würde. Wird auch ein allfälliger Turbinenbetrieb Q_T mitberücksichtigt, ergibt sich der für das Seeregime massgebende Zufluss in diesem Fall zu

$$Q_Z^{**} = Q_Z + Q_{Trans} - Q_T$$

und das durch die Wasserzuleitung und den Turbinenbetrieb beeinflusste Seeregime zu

$$Q_Z^{**} = Q_A^{**} + Q_R^{**}$$

Im Vergleich zu einem Speicherkraftwerk ohne Wasserzuleitung (Bild 3.22 links) erhöht sich der Abfluss aus dem Speicher um etwa den Betrag Q_{Trans} (Bild 3.22 rechts). Dies gilt für den gesamten Gewässerabschnitt unterhalb des Speichers bis zur Vereinigung mit dem Vorfluter der Nebenfassung. Dort neutralisiert sich die Wirkung, weil im Vorfluter der Nebenfassung der Abfluss um Q_{Trans} abgemindert ist.

Hieraus folgt, dass eine Wasserableitung nur für den Vorfluter der Nebenfassung (z. B. das Mattertal) vorteilhaft ist und sonst nur Nachteile hat: Der Speicher wird rascher aufgefüllt und der Abfluss im Vorfluter des Speichers ab Beginn des Überlaufs erhöht.

Wird Wasser entgegen der natürlichen Fliessrichtung übergeleitet (Bild 3.23), besteht zwischen den Punkten C und D ein Gewässerabschnitt, in dem der Abfluss während Zeiten mit Wasserüberleitung um die übergeleitete Wassermenge Q_{Trans} vergrössert wird. Bei grösseren Hochwässern kann es dort zu unerwünschten Abflussverhältnissen kommen und ein Einstellen der Wasserüberleitung nahelegen.

Wie hinsichtlich des Turbinenbetriebs muss man sich bewusst sein, dass eine Wasserüberleitung nicht immer eingesetzt werden kann. Vorstehend ist eine Konstellation beschrieben, für die ein Überleiten von Wasser während grösserer Hochwässer nicht angezeigt ist. Weitere Gründe, dass ein Überleiten nicht zulässig, nicht möglich oder nur begrenzt möglich ist, sind:

- Einschränkung der Wasserüberleitung aufgrund des Wehrreglements
- Ausserbetriebnahme der Wasserüberleitung während Kontroll- und Revisionsarbeiten
- Ausfall von Pumpen (wenn das gefasste Wasser auf ein höheres Niveau gepumpt werden muss)
- Verlandung der Nebenfassung infolge übermässigen Geschiebetriebs oder eines Murgangs.

Eine Einschränkung aufgrund des Wehrreglements besteht für die Wasserüberleitung aus dem Mattertal und dem Val d'Hérens in den Speicher Grande Dixence. Sie ist nötig, weil der Speicher über keine Hochwasserentlastungsanlage verfügt und der Hochwasserschutzraum im wesentlichen nur für die Aufnahme des Hochwassers aus dem direkten Einzugsgebiet ausreicht.

Es wäre also – wie hinsichtlich des Turbinenbetriebs – unvorsichtig, wenn man sich auf die entlastende Wirkung einer Wasserüberleitung verlassen wollte.

Centrale nucléaire	Puissance journalière moyenne [%] 1993				
	23.9 (Je)	24.9 (Ve)	25.9 (Sa)	26.9 (Di)	27.9 (Lu)
Beznau I	100	100	75	55	83
Beznau II	dès le 23. 9. remise à plein régime graduelle après revision				
Mühleberg	97	93	72	69	96
Gösgen	99	99	78	78	94
Leibstadt	98	98	81	81	95

Crue

Tableau 3.4. Puissance fournie par les centrales nucléaires lors de la crue de 1993.

Tabelle 3.4. Leistung der Kernkraftwerke während des Hochwassers 1993.

Kernkraftwerk	mittlere Tagesleistung [%] 1993				
	23.9 (Do)	24.9 (Fr)	25.9 (Sa)	26.9 (So)	27.9 (Mo)
Beznau I	100	100	75	55	83
Beznau II	ab 23. 9. nach Revision allmählich hochgefahren				
Mühleberg	97	93	72	69	96
Gösgen	99	99	78	78	94
Leibstadt	98	98	81	81	95

Hochwasser

cours d'eau dont les eaux sont dérivées est réduit de la quantité Q_{Trans}.

Il s'ensuit qu'une adduction n'a un effet positif que pour le cours d'eau dont les eaux sont dérivées (la Viège de Zermatt par exemple). Pour le reste, elle ne présente que des inconvénients: la retenue se remplit plus rapidement et le débit déversé dans l'émissaire augmente dès le début.

Lorsque des eaux sont dérivées dans le sens contraire à celui de l'écoulement naturel (fig. 3.23), le débit dans le tronçon de cours d'eau compris entre les points C et D croît de la quantité dérivée Q_{Trans} lorsque l'adduction fonctionne. Lors de crues importantes, des conditions d'écoulement indésirables peuvent se développer le long de ce tronçon, conditions qui peuvent commander la mise hors service de l'adduction.

Comme pour le turbinage, il faut être conscient que l'on ne peut pas toujours faire fonctionner les adductions. Il a été mentionné précédemment dans quels cas un transfert d'eau par adduction n'est pas indiqué lors de crues importantes. On trouvera ci-dessous encore d'autres raisons rendant la dérivation des apports inadmissible, impossible ou possible dans certaines limites seulement:

- limitation du débit des adductions dictée par la consigne de manœuvre des vannes
- mise hors service d'une adduction pour travaux d'entretien ou de révision
- interruption du pompage (si les eaux captées doivent être pompées à un niveau plus élevé)
- obstruction de la prise d'eau en tête de l'adduction par des sédiments ou une coulée de lave torrentielle.

La consigne de manœuvre des vannes restreint l'usage des adductions conduisant les eaux de la vallée de Zermatt et du val d'Hérens dans la retenue de la Grande Dixence. Cette restriction est nécessaire, car la retenue ne comporte pas d'évacuateur de crue et la tranche réservée à l'écrêtement suffit en principe juste pour stocker les crues provenant du bassin versant naturel.

Il serait donc imprudent – comme dans le cas du turbinage – de se fier à l'effet de délestage obtenu par les adductions.

3.1.5 Résumé

1. Une retenue entraîne *toujours* une réduction du débit de pointe dans l'émissaire lors d'une crue.
- L'effet est le plus faible lorsque la retenue est pleine au début de la crue (degré de remplissage 100 %).
- L'effet de la retenue augmente à mesure que le degré de remplissage décroît. Il est maximum lorsque tout le volume de la crue peut être emmagasiné dans la retenue.
- L'effet globalement favorable s'atténue avec l'accroissement du volume de la crue.

3.1.5 Zusammenfassung

1. Ein Speicher bewirkt im Hochwasserfall im Vorfluter *immer* eine Abminderung des Spitzenabflusses.
- Die Wirkung ist am kleinsten, wenn der Speicher zu Beginn des Hochwassers voll gefüllt ist (Füllungsgrad 100 %).
- Die Wirkung verstärkt sich mit abnehmendem Füllungsgrad und erreicht das mögliche Maximum, wenn der gesamte Hochwasserzufluss im Speicher zurückgehalten werden kann.
- Die generell vorteilhafte Wirkung schwächt sich mit zunehmender Fülle des zufliessenden Hochwassers ab.

2. Der Turbinenbetrieb während des Hochwassers ist nur vorteilhaft, wenn die resultierende Abflussminderung zwischen dem Speicher und der Wasserrückgabe dazu beitragen kann, Ausuferungen in Ortschaften oder nachteilige Auswirkungen des Geschiebetriebs einzuschränken. Besteht kein Überlauf, erhöht sich der Restabfluss unterhalb der Wasserrückgabe um Q_T (negativ).

3. Eine Wasserüberleitung bewirkt im Gewässer unterhalb der Nebenfassung eine Abminderung des Abflusses um die abgeleitete Wassermenge Q_{Trans}. Im Vorfluter des Speichers

Tableau 3.5. Débits de pointe effectifs et débits de pointe naturels du Rhône entre Brigue et Martigny lors des crues de 1987 et 1993.

Tabelle 3.5. Effektive und natürliche Spitzenabflüsse in der Rhone zwischen Brig und Martigny während der Hochwässer 1987 und 1993.

	Spitzenabfluss [m3/s] Débit de pointe [m3/s]			
	1987		1993	
Rhone - Brig				
effektiv / effectif *)	495	(95 %)	460	(100 %)
Rückhalt durch Speicherwerke **) Rétention des aménagements à accumulation	+ 26		+ 2	
natürlich / naturel	521	(100 %)	462	(100 %)
Rhône - Sion				
effektiv / effectif *)	775	(74 %)	830	(79 %)
Rückhalt durch Speicherwerke **) Rétention des aménagements à accumulation	+ 270		+ 224	
natürlich / naturel	1045	(100 %)	1054	(100 %)
Rhône - Branson				
effektiv / effectif *)	820	(80 %)	930	(85 %)
Rückhalt durch Speicherwerke **) Rétention des aménagements à accumulation	+ 209		+ 161	
natürlich / naturel	1029	(100 %)	1091	(100 %)

*) Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz / Annuaire hydrologique de la Suisse

**) Figuren / Figures 3.28 und 3.29

2. Le turbinage pendant la crue n'a d'effet favorable que si la réduction de débit qui en résulte sur le tronçon compris entre la retenue et la restitution peut contribuer à limiter les débordements dans les agglomérations ou à atténuer les effets négatifs du transport solide. Lorsqu'il n'y a pas déversement, le débit résiduel en aval de la restitution augmente de la quantité Q_T (nuisible).

3. Une adduction conduit à une réduction du débit du cours d'eau en aval de la prise d'eau, réduction égale au débit dérivé Q_{Trans}. Dans l'émissaire de la retenue, par contre, le débit augmente de la quantité Q_{Trans} environ lorsqu'il y a déversement (nuisible). En aval de la confluence des deux cours d'eau, les effets se neutralisent.

4. *Rien ne garantit que le turbinage ou l'utilisation des adductions soient effectivement possibles lors d'une crue.* Il serait donc imprudent de compter sur l'effet positif de ces mesures.

Les raisons en sont les suivantes:
- possibilité d'un incident technique
- impossibilité d'injecter dans le réseau l'énergie produite
- prévention de conditions d'écoulement indésirables en aval de la restitution
- travaux d'entretien en cours
- respect de la consigne de manœuvre des vannes (dans le cas d'une adduction)

On ne comptera donc *que sur le stockage des eaux dans la retenue.*

5. L'importance relative des divers effets produits par un aménagement à accumulation sur le débit de l'émissaire s'atténue à mesure que l'on s'éloigne du lieu d'intervention, étant donné que les débits augmentent continuellement lorsqu'on se déplace vers l'aval.

6. A partir du moment où le plan d'eau de la retenue atteint son niveau normal, seule la sécurité de l'ouvrage compte. La consigne de manœuvre des vannes doit être suivie à la lettre.

wird der Abfluss hingegen etwa um Q_{Trans} erhöht, wenn Überlauf vorhanden ist (negativ). Beim Zusammenfluss der beiden Gewässer neutralisieren sich die Einflüsse.

4. *Es besteht keine Gewähr, dass im Hochwasserfall der Turbinenbetrieb oder eine Wasserüberleitung auch tatsächlich möglich sind.* Es wäre deshalb unvorsichtig, sich auf die positiven Wirkungen dieser Massnahmen verlassen zu wollen.

Gründe für diese Sachlage sind:
- Möglichkeit einer technischen Panne
- Unmöglichkeit, den produzierten Strom in das Übertragungsnetz einspeisen zu können
- Rücksichtnahme auf kritische Abflusssituationen unterhalb der Wasserrückgabe
- Laufende Unterhaltsarbeiten
- Respektierung des Wehrreglements im Falle einer Wasserüberleitung

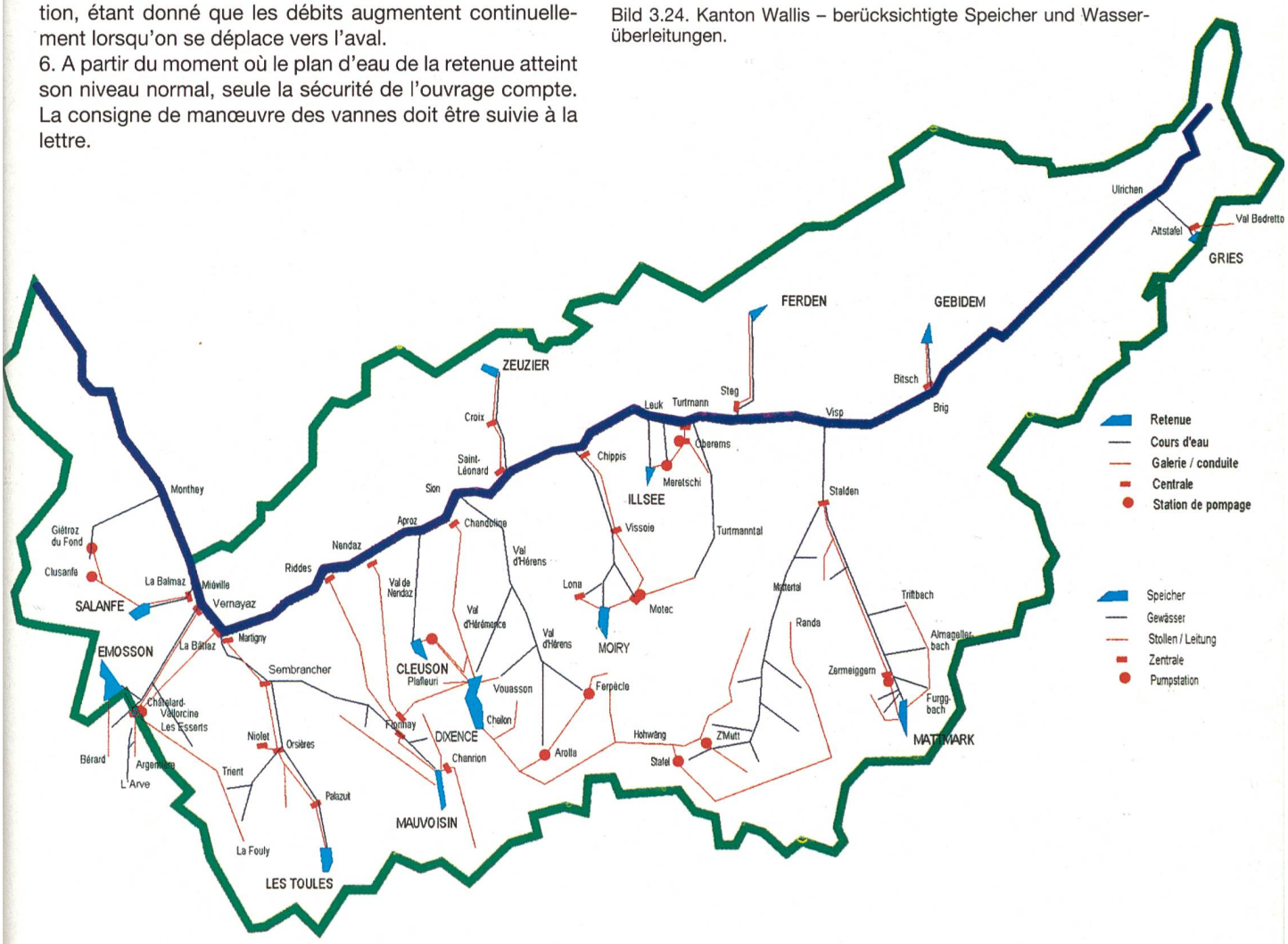
Verlass ist somit *nur auf den Wasserrückhalt im Speicher.*

5. Die einzelnen Wirkungen eines Speicherkraftwerks auf den Abfluss im Vorfluter schwächen sich mit zunehmender Entfernung vom Ort des Eingriffs anteilmässig ab, weil die Abflüsse flussabwärts fortwährend grösser werden.

6. Vom Moment an, da der Wasserspiegel im Speicher das Stauziel überschreitet, zählt nur noch die Hochwassersicherheit der Anlage. Das Wehrreglement ist kompromisslos einzuhalten.

Fig. 3.24. Canton du Valais – retenues et galeries d'amenée et d'adduction considérées.

Bild 3.24. Kanton Wallis – berücksichtigte Speicher und Wasserüberleitungen.



3.2 Contribution apportée lors des crues de 1987 et 1993

Après avoir présenté dans le paragraphe précédant l'effet des aménagements à accumulation sur les débits de crue de manière générale ainsi que l'importance des différents facteurs d'influence, il s'agit maintenant de montrer concrètement comment les conditions d'écoulement ont été affectées lors des crues de 1987 et 1993. On a renoncé à une analyse de la crue de 1994 car elle ne constituait un événement exceptionnel qu'en ce qui concerne les apports à quelques retenues, mais pas par rapport aux débits du Rhône et de ses affluents (voir tableau 2.1).

Les deux crues considérées étaient du même ordre de grandeur:

	débit de pointe mesuré [m³/s]	
	1987	1993
Rhône – Brigue	495	460
Rhône – Sion	775	830
Rhône – Branson	820	930

L'élément essentiel est donc le fait que les deux crues ne se sont pas produites à la même époque de l'année: la crue de 1987 a eu lieu vers fin août, c'est-à-dire à un moment où un volume relativement important est encore libre dans les retenues, et la crue de 1993 vers fin septembre, soit à une époque où les retenues sont en général fortement remplies.

Pour pouvoir déterminer l'influence qu'exercent les retenues sur les débits en un point donné d'un cours d'eau situé en aval – par exemple le Rhône à Sion – il a fallu, dans une première étape, reconstituer le régime (fig. 3.25) de toutes les retenues[11] reportées sur la figure 3.24 et estimer la transformation du débit le long du lit des différentes rivières (fig. 3.26). Pour les aménagements qui s'étendent sur plusieurs vallées, tel celui de la Grande Dixence, il a fallu procéder de manière différenciée (fig. 3.27). En partant de là, on pouvait alors calculer dans une deuxième étape de quelle quantité (m³/s) le débit de pointe effectif diffère de celui qui aurait été observé si les retenues n'avaient pas existé (débit de pointe naturel). Cette différence est reportée dans les figures 3.28 (crue de 1987) et 3.29 (crue de 1993) pour le Rhône entre Brigue et Vernayaz. La différence est positive lorsque le débit naturel reconstitué est supérieur au débit effectif observé.

3.2.1 Rhône

En comparant les figures 3.28 et 3.29, on remarque que les aménagements à accumulation ont eu un effet de même ordre de grandeur lors des deux événements, bien que les réservoirs aient été nettement plus remplis au début de la crue de 1993 qu'au début de celle de 1987.

Dans le tableau 3.5, les débits de pointe mesurés sont comparés aux débits de pointe naturels pour les stations hydrométriques de Brigue, Sion et Branson[12]. Comme on

[11] La retenue du Bortelsee et tous les bassins de compensation tels que par exemple Z'Mutt, Tourtemagne, Ferpècle, etc., n'ont pas été considérés en raison de leurs dimensions restreintes (bassin versant ou volume).

[12] Ce faisant, on a admis que le débit de pointe des hydrogrammes des figures 3.28 et 3.29 survient au même instant que celui de l'onde de crue effective correspondante et que, par conséquent, les deux débits peuvent être additionnés. Cette hypothèse est basée sur le raisonnement que l'onde de crue naturelle est modifiée au droit de la retenue, et que l'onde transformée ne subit pas de déformation autre que celle qu'aurait subi l'onde naturelle. La figure 3.26 prouve que cette hypothèse n'est pour le moins pas trop erronée.

3.2 Beitrag während der Hochwässer 1987 und 1993

Nachdem im vorangehenden Abschnitt dargelegt wurde, wie sich Speicherkraftwerke generell auf die Hochwasserabflüsse auswirken und welche Bedeutung den einzelnen Einflussgrössen zukommt, soll jetzt gezeigt werden, wie die Abflussverhältnisse im Wallis anlässlich der Hochwässer 1987 und 1993 konkret beeinflusst wurden. Auf eine Analyse des Hochwassers 1994 wird verzichtet, weil dieses nur hinsichtlich der Zuflüsse zu einigen Speichern ein aussergewöhnliches Ereignis war, nicht aber hinsichtlich der Abflüsse in den Vorflutern und in der Rhone (siehe Tabelle 2.1).

Beide betrachteten Hochwässer waren von ähnlicher Grössenordnung:

	gemessener Spitzenabfluss [m³/s]	
	1987	1993
Rhone – Brig	495	460
Rhone – Sion	775	830
Rhone – Branson	820	930

Von besonderer Bedeutung ist deshalb, dass sie zu unterschiedlichen Zeiten im Jahresablauf aufgetreten sind: Das Hochwasser 1987 gegen Ende August, d.h. zu einem Zeitpunkt, da die Speicher noch relativ viel freies Volumen besitzen, und das Hochwasser 1993 gegen Ende September, d.h. zu einem Zeitpunkt, da die Speicher in der Regel stark gefüllt sind.

Um ermitteln zu können, welchen Einfluss die jeweils oberliegenden Speicherkraftwerke auf den Abfluss an einer bestimmten Gewässerstelle haben – z.B. die Rhone in Sion –

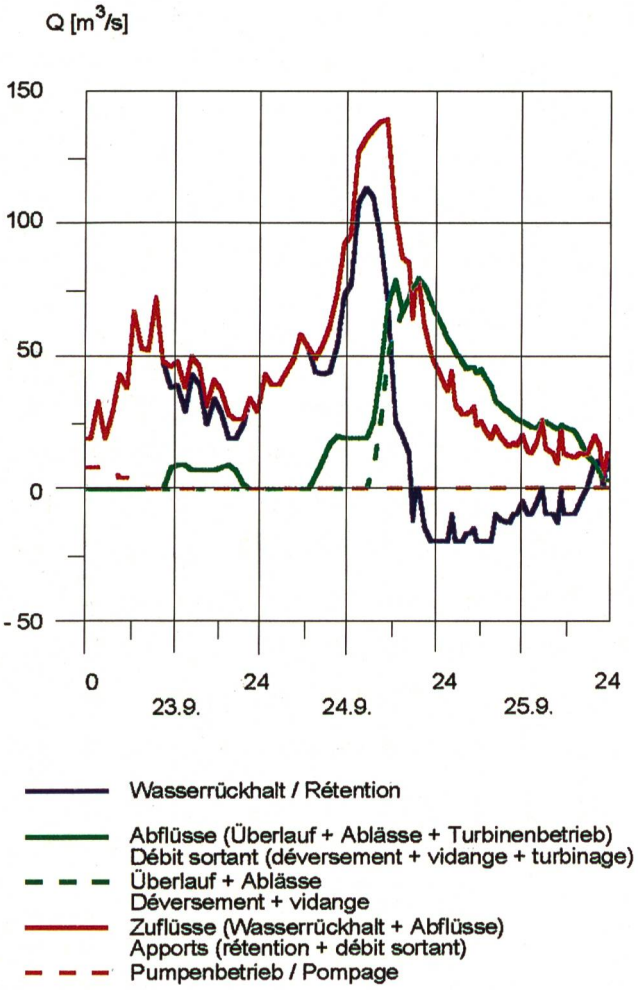


Fig. 3.25. Régime de la retenue de Mattmark (crue de 1993).

Bild 3.25. Seeregime des Speichers Mattmark (Hochwasser 1993).

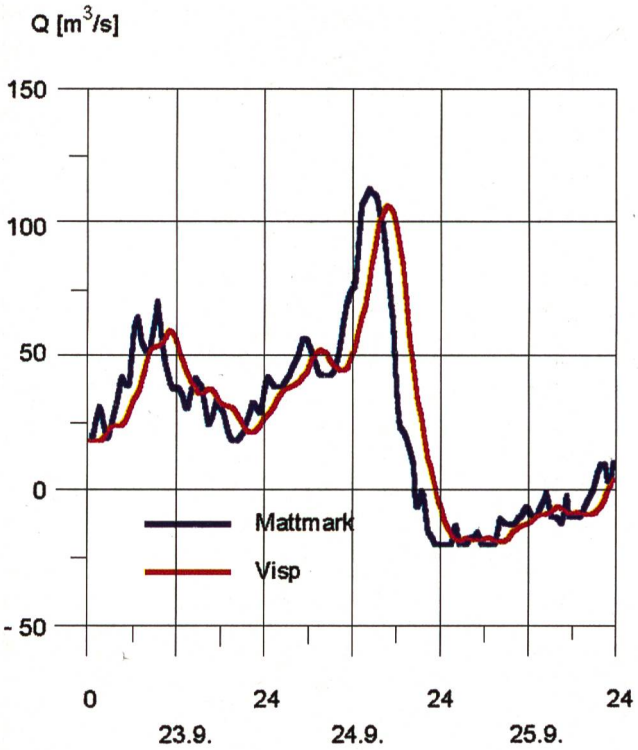


Fig. 3.26. Déformation le long de l'émissaire, entre Mattmark et Viège, des débits stockés dans la retenue (crue de 1993).

Bild 3.26. Verformung des Wasserrückhaltes im Speicher längs des Vorfluters zwischen Mattmark und Visp (Hochwasser 1993).

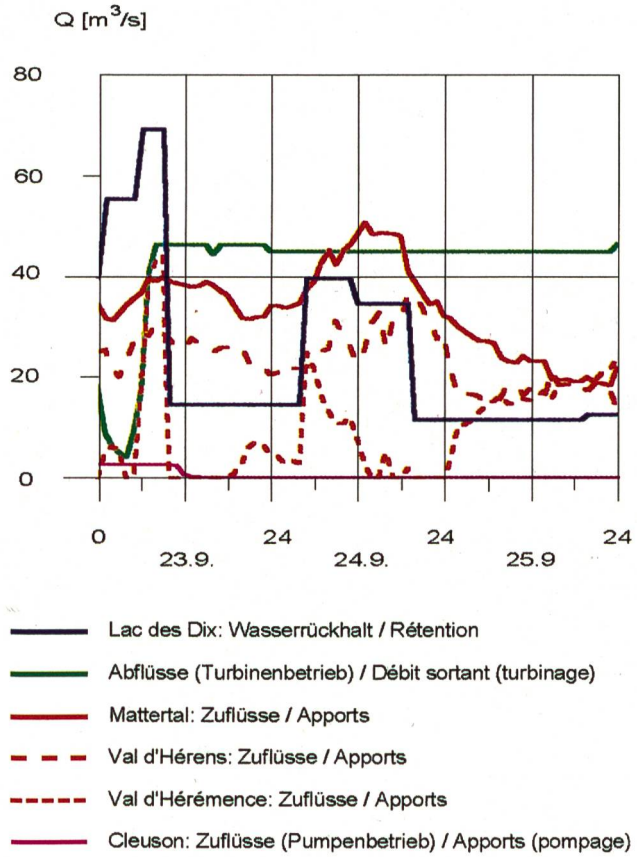


Fig. 3.27. Bilan d'eau de l'aménagement de la Grande Dixence (crue de 1993).

Bild 3.27. Wasserhaushalt des Kraftwerks Grande Dixence (Hochwasser 1993).

mussten in einem ersten Schritt für alle in Bild 3.24 eingezeichneten Speicherkraftwerke[11] das Seeregime rekonstruiert (Bild 3.25) und die Verformung des Wasserrückhalts längs des Talwegs abgeschätzt werden (Bild 3.26). Für Anlagen, die sich über mehrere Täler erstrecken, wie z.B. das Kraftwerk Grande Dixence, hatte dies entsprechend differenziert zu geschehen (Bild 3.27). Mit diesen Unterlagen konnte dann in einem zweiten Schritt berechnet werden, um welchen Betrag (m³/s) sich der effektive Spitzenabfluss von jenem unterscheidet, der aufgetreten wäre, wenn die Speicherkraftwerke nicht vorhanden gewesen wären (natürlicher Spitzenabfluss). Diese Differenz ist in den Bildern 3.28 (Hochwasser 1987) und 3.29 (Hochwasser 1993) für die Rhone zwischen Brig und Vernayaz dargestellt. Ein positives Vorzeichen bedeutet, dass der natürliche Abfluss um den entsprechenden Betrag grösser ist.

3.2.1 Rhone

Vergleicht man die Bilder 3.28 und 3.29, erkennt man, dass sich die Speicherkraftwerke anlässlich der beiden Hochwasserereignisse in der Grössenordnung ähnlich ausgewirkt haben, und dies trotz dem Umstand, dass die Speicher zu Beginn des Hochwassers 1993 erheblich stärker gefüllt waren als zu Beginn des Hochwassers 1987.

In der Tabelle 3.5 sind für die Abflussmessstationen Brig, Sion und Branson die effektiven, d.h. gemessenen Spitzenabflüsse den natürlichen gegenübergestellt[12]. Man erkennt, dass oberhalb von Visp die Abminderung erwartungsgemäss sehr klein ist (0 – 5 %) und dass auch unterhalb von Visp die Abminderung grössenordnungsmässig nur 15–26 % ausmacht. Dieser relativ bescheidene Einfluss ist verständlich, wenn man beachtet, dass die Einzugsgebiete der Speicher nur einen kleinen Anteil der Einzugsgebiete der Abflussmessstationen Brig, Sion und Branson umfassen (unterhalb von Visp rund 12 %).

Theoretisch könnte die Wirkung der Speicherkraftwerke grösser sein. Hätte alles den Speichern zufliessende Wasser, und zwar einschliesslich der Zuleitungen, zurückgehalten werden können, und wäre es zulässig gewesen, auf das Turbinieren zu verzichten, hätten, bezogen auf die Rhone in Branson, 1987 etwa 412 m³/s und 1993 etwa 419 m³/s zurückgehalten werden können (Tabelle 3.6). Effektiv waren es etwa 209 resp. 161 m³/s (Tabelle 3.5). Es zeigt sich somit, dass

- die Wirkung der Speicherkraftwerke 1987 etwas ausgeprägter war als 1993 und dass
- der Unterschied zwischen der effektiven und der theoretisch möglichen Abminderung des Abflusses nicht so gross ist[13], dass hinsichtlich des Hochwasserschutzes von den Speicherkraftwerken Wunder erwartet werden könnten.

[11] Unberücksichtigt blieben wegen ihrer Grösse (Einzugsgebiet und/oder Inhalt) der Speicher Bortelsee sowie alle Ausgleichsbecken wie z.B. die Stauanlagen Z'Mutt, Turtmann, Ferpècle usw.

[12] Es wird dabei vorausgesetzt, dass die Spitzenwerte in den Bildern 3.28 und 3.29 und die Spitzenabflüsse der effektiven Hochwasserwelle zur gleichen Zeit auftreten, also addiert werden dürfen. Dies basiert auf der Überlegung, dass die natürliche Hochwasserwelle am Ort des Speichers modifiziert wird und dass sich die veränderte Welle nicht anders verformt, als es die natürliche Hochwasserwelle getan hätte. Bild 3.26 belegt, dass diese Annahme zumindest nicht sehr falsch ist.

[13]

	1987	1993
Rhone – Sion	412 – 270 = 142 m³/s	419 – 224 = 195 m³/s
Rhone – Branson	412 – 209 = 203 m³/s	419 – 161 = 258 m³/s

pouvait s'y attendre, on constate que la réduction est très faible à l'amont de Viège (0–5 %) et ne dépasse pas 15–26 % à l'aval. Cette influence relativement modeste est compréhensible si l'on considère que la superficie des bassins versants des retenues ne représente qu'une petite partie de celle des bassins versants correspondant aux stations hydrométriques de Brigue, Sion et Branson (environ 12 % pour les stations situées à l'aval de Viège).

L'effet des retenues pourrait théoriquement être plus important. Si on avait pu stocker tous les apports qui se sont jetés dans les retenues, y compris ceux amenés par les adductions, et s'il avait été possible de renoncer à tout turbinage, on aurait pu retenir environ 412 m³/s en 1987 et 419 m³/s en 1993 au Rhône à Branson (tableau 3.6). En réalité, on a retenu respectivement 209 et 161 m³/s (tableau 3.5). On constate donc que

- l'effet des aménagements à accumulation a été légèrement plus marqué en 1987 qu'en 1993 et que
- la différence entre la réduction effective des débits et celle théoriquement possible n'est pas si grande[13] qu'on puisse attendre des miracles des aménagements à accumulation dans le cadre de la protection contre les crues.

Il faut également relever qu'il n'est pas garanti qu'un effet aussi important qu'en 1987 et 1993 se reproduise lors de la prochaine crue. Cela dépend du degré de remplissage des retenues au début de la crue et celui-ci peut être plus élevé, soit par hasard, soit volontairement (par exemple comme conséquence de la libéralisation du marché européen de l'électricité).

Les aménagements de la Grande Dixence et de Mauvoisin prennent une place particulière en cas de crue (fig. 3.30). Dans la vallée de Zermatt et pour la Viège à Viège, la réduction de débit peut atteindre 50 m³/s grâce à la dérivation des eaux de la vallée de Zermatt vers la retenue du val des Dix – pour autant que cette dérivation soit techniquement possible et admissible du point de vue de la sécurité (pas de panne, pas de contraintes imposées par la consigne de manœuvre des vannes de la retenue de la Grande Dixence). Le même cas se présente dans le val de Bagnes (et la Drance à Martigny) – mais seulement jusqu'à un débit maximum de 28,75 m³/s – car la restitution des eaux de l'aménagement de Mauvoisin se fait dans le Rhône. Toutefois, ces deux aménagements sollicitent le tronçon particulièrement critique du Rhône compris entre Sion et Martigny lorsqu'ils sont obligés de turbiner. Le cas s'est produit en 1993 pour l'aménagement de la Grande Dixence lorsqu'on a dérivé des eaux de la vallée de Zermatt pour contribuer à l'atténuation de la crue. Une telle situation de contrainte ne s'est pas présentée en 1987, mais les aménagements de la Grande Dixence et de Mauvoisin ont malgré tout turbiné à peu près le même débit (tableau 3.7). Ceci montre que les sociétés productrices d'électricité suivent – de manière parfaitement légitime – leurs propres intérêts, du moins tant que la population vivant en aval n'est pas en danger.

Comme l'effet de laminage dépend du degré de remplissage au début de la crue et qu'il n'existe aucune garantie que celui-ci soit faible à ce moment-là, il convient de ne pas surestimer l'effet de laminage des aménagements à accumulation. Il semble raisonnable d'admettre une contribution nulle pour le Rhône à l'amont de Viège et d'au plus 50 à 100 m³/s à l'aval. En ce qui concerne le tronçon inférieur, et tenant compte du fait que la valeur élevée des

[13]

	1987	1993
Rhône – Sion	412 – 270 = 142 m³/s	419 – 224 = 195 m³/s
Rhône – Branson	412 – 209 = 203 m³/s	419 – 161 = 258 m³/s

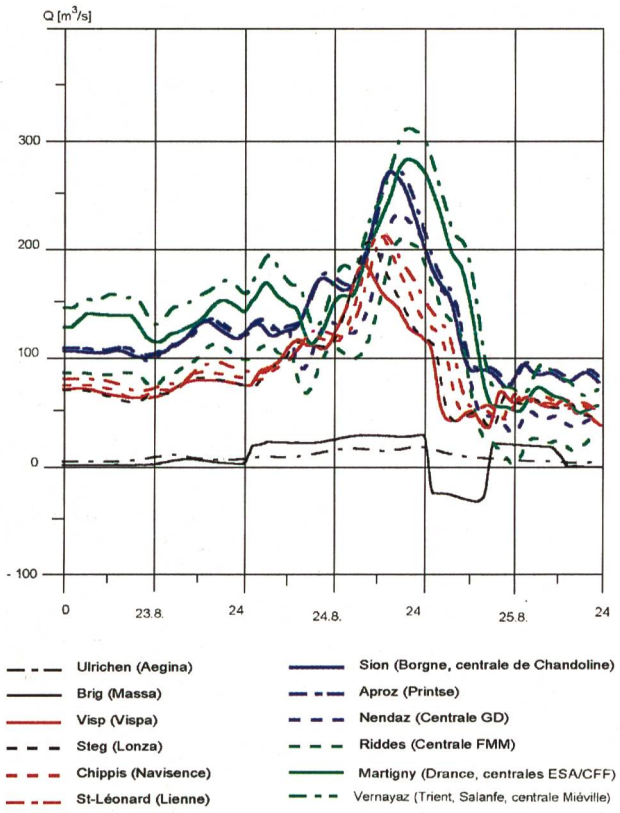


Fig. 3.28. Crue de 1987 – différence entre le débit naturel et le débit effectif du Rhône.

Bild 3.28. Hochwasser 1987 – Differenz zwischen natürlichem und effektivem Abfluss in der Rhone.

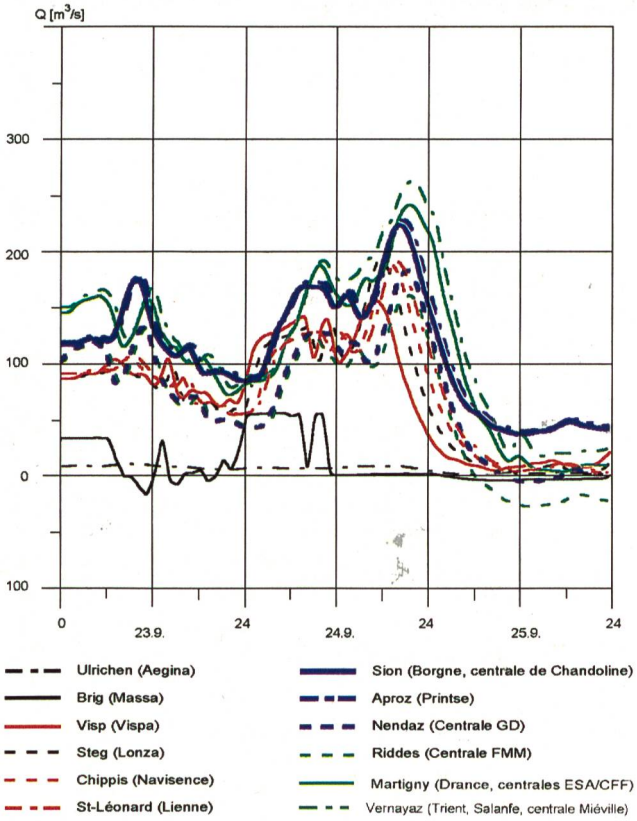


Fig. 3.29. Crue de 1993 – différence entre le débit naturel et le débit effectif du Rhône.

Bild 3.29. Hochwasser 1993 – Differenz zwischen natürlichem und effektivem Abfluss in der Rhone.

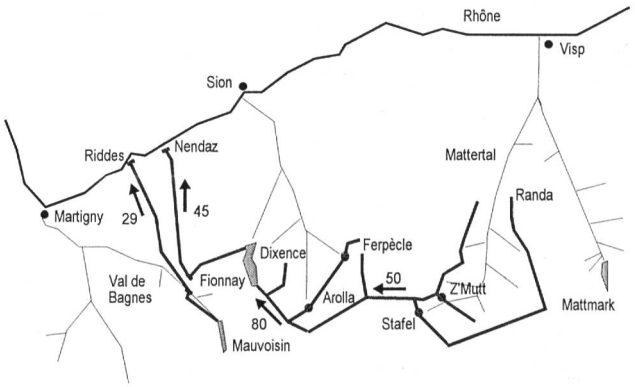


Fig. 3.30. Schéma général des aménagements de la Grande Dixence (à droite) et de Mauvoisin (à gauche). (Cleuson-Dixence [en construction] et Mauvoisin II [à l'étude] augmenteront respectivement le débit turbinable de 45 à 120 m³/s et de 29 à 75 m³/s.)

Bild 3.30. Generelle Disposition der Kraftwerke Grande Dixence (rechts) und Mauvoisin (links). (Cleuson-Dixence [im Bau] wird die turbinierbare Wassermenge von 45 auf 120 m³/s und Mauvoisin II [projektiert] von 29 auf 75 m³/s erhöhen.)

biens menacés justifie une protection allant au-delà de la crue de 100 ans (événement normalement considéré pour les mesures de protection contre les crues), on peut également être d'avis qu'il faut négliger complètement l'effet de laminage des retenues amont.

Si l'on prend en considération que

- la crue de 1993 aurait été la plus grande crue dans le Rhône à l'aval de Viège si les aménagements à accumulation n'avaient pas existé,
- à Branson, le débit de pointe a atteint environ 930 m³/s en 1993 (tableau 3.5), épuisant complètement la capacité hydraulique du fleuve,
- le débit de pointe à Branson aurait atteint environ 1090 m³/s en l'absence d'aménagements hydro-électriques (tableau 3.5),
- la crue de 1993 est, comme on vient de le voir, un événement ayant une période de retour de 50 à 80 ans pour le Rhône à l'aval de Viège (fig. 3.31),

Tableau 3.6. Apports maximums aux retenues situées en amont de l'embouchure de la Drance lors des crues de 1987 et 1993.

Tabelle 3.6. Maximale Zuflüsse zu den Speichern oberhalb der Einmündung der Drance während der Hochwässer 1987 und 1993.

Speicher Retenue	maximaler Zufluss Débit entrant max [m3/s] *) 1987	1993
Gries	17	14
Gebidem	79	67
Mattmark	119	138
Ferden	45	59
Illsee	0	1
Moiry	18	8
Zeuzier	13	12
Dixence	116	116
Cleuson	5	4
Total	412	419

*) inklusive Zuleitungen / Adductions comprises

Tableau 3.7. Débits turbinés par les aménagements de la Grande Dixence et de Mauvoisin lors des crues de 1987 et 1993.

Tabelle 3.7. Turbinenbetrieb der Kraftwerke Grande Dixence und Mauvoisin während der Hochwässer 1987 und 1993.

Kraftwerk Aménagement	Q_T [m3/s] zum Zeitpunkt T* au temps T* 1987	1993
Grande Dixence	39	44
Mauvoisin	24	24
	63	68

Es muss auch darauf hingewiesen werden, dass keine Gewähr besteht, dass anlässlich des nächsten Hochwassers eine ähnlich grosse Wirkung wie 1987 und 1993 erreicht wird. Es hängt dies vom Füllungsgrad des Speichers zu Beginn des Hochwassers ab, und dieser kann zufälligerweise oder systematisch (z. B. als Folge der Liberalisierung des europäischen Strommarktes) grösser sein.

Eine besondere Stellung kommt im Hochwasserfall den Kraftwerken Grande Dixence und Mauvoisin zu (Bild 3.30). Mit der Wasserüberleitung vom Mattertal in den Speicher im Val des Dix kann das Mattertal und die Vispa bei Visp im Hochwasserfall um bis zu 50 m³/s entlastet werden – sofern die Überleitung technisch möglich und aus Sicherheitsgründen zulässig ist (keine Panne, keine Anwendung des Wehrreglements für den Speicher Grande Dixence). Analoges – allerdings nur bis zu einer Wassermenge von 28,75 m³/s – gilt für das Val de Bagnes (und die Drance in Martigny), weil die Wasserrückgabe des Kraftwerks Mauvoisin in die Rhone erfolgt. Auf der anderen Seite belasten die beiden Kraftwerke den besonders kritischen Rhoneabschnitt zwischen Sion und Martigny, wenn sie gezwungen sind, zu turbinieren. Dieser Zwang bestand 1993 für das Kraftwerk Grande Dixence, wenn – wie dies getan wurde – im Interesse des Hochwasserschutzes Wasser aus dem Mattertal abgeleitet werden sollte. – Ein solcher Zwang bestand 1987 nicht, und trotzdem wurde von den Kraftwerken Grande Dixence und Mauvoisin etwa die gleiche Wassermenge turbiniert (Tabelle 3.7). Dies zeigt, dass die Kraftwerkgesellschaften, wenigstens solange als die Unterlieger nicht gefährdet sind, ihre eigenen Interessen verfolgen und dies völlig legitim.

Weil der Füllungsgrad der Speicher zu Beginn des Hochwassers über die abmindernde Wirkung entscheidet und weil keine Gewähr für einen relativ niedrigen Füllungsgrad zu Beginn des Hochwassers besteht, ist es angezeigt, die entlastende Wirkung der Speicherkraftwerke nicht zu hoch anzunehmen. Für die Rhone oberhalb von Visp dürfte es richtig sein, mit einem Beitrag Null und unterhalb mit einem Beitrag von höchstens 50 bis 100 m³/s zu rechnen. Ein Beitrag Null wäre ebenfalls vertretbar, wenn man bedenkt, dass im Rhonetal wegen der hohen gefährdeten Sachwerte ein Schutz angezeigt sein dürfte, der über dem 100jährlichen Hochwasser liegt (was dem üblichen Hochwasserschutz entspricht).

Beachtet man, dass

- das Hochwasser 1993 für die Rhone unterhalb von Visp das grösste Hochwasser gewesen wäre, wenn die Speicherkraftwerke nicht vorhanden gewesen wären,
- 1993 in Branson maximal etwa 930 m³/s abflossen (Tabelle 3.5) und dabei die Abflusskapazität des Gerinnes voll ausschöpften,
- der Spitzenabfluss in Branson ohne die Kraftwerke etwa 1090 m³/s erreicht hätte (Tabelle 3.5),
- das Hochwasser 1993 nach den vorstehenden Abklärungen für die Rhone unterhalb von Visp ein 50- bis 80jährliches Ereignis war (Bild 3.31),
- der 100jährliche Spitzenabfluss zu etwa 1140 ± 70 m³/s in Sion und zu etwa 1200 ± 70 m³/s in Branson abgeschätzt werden kann[14],

zeigt sich, dass der Hochwasserschutz längs der Rhone zwischen Visp und Martigny ungenügend ist und dringend überprüft werden muss.

14

	E	Q_{100}	$\alpha = Q_{100}/\sqrt{E}$	$Q_{100} = 19{,}7\sqrt{E}$
Rhone – Sion	3349	1120	19,3	1140 ± 70
Rhone – Branson	3728	1230	20,1	1200 ± 70

- l'on peut estimer à environ 1140 ± 70 m³/s le débit centennal de pointe de Sion et à environ 1200 ± 70 m³/s celui de Branson[14],

on arrive à la conclusion que, le long du Rhône, entre Viège et Martigny, la protection contre les crues est insuffisante et qu'il est urgent de la reconsidérer.

3.2.2 Doveria

Les crues de la Doveria n'ont pas été étudiées car aucune retenue ne se trouve dans son bassin versant. L'amélioration nécessaire de la protection contre les crues ne peut donc être obtenue qu'au moyen de mesures de correction des cours d'eau.

3.2.3 Viège

Des deux crues considérées ici, celle de 1993 est la plus grande[15] et, dans la vallée de Saas supérieure, elle représente un événement dont la période de retour est de l'ordre de 50 à 80 ans.

Dans la *vallée de Saas* supérieure, il n'y a eu pratiquement aucun débordement en 1987, alors qu'en 1993 d'énormes débordements se sont produits malgré le fait que les apports maximums à la retenue de Mattmark n'étaient pas très différents (respectivement 119 et 138 m³/s) et que le débit stocké dans la retenue à l'instant T^* était à peu près identique (respectivement 119 et 115 m³/s). La différence vient du fait qu'en 1993

- l'intensité des précipitations était en général plus élevée (apports maximums naturels à la retenue de 121,5 m³/s au lieu de 102,5),
- le front des précipitations était descendu plus bas dans la vallée (au moins jusqu'à Saas Balen) comme le montrent les valeurs α correspondant aux débits de pointe naturels pratiquement identiques pour Mattmark et Saas Balen[16]:

Mattmark: $Q_{Amax} \cong 138 - 16{,}5^{17} = 121{,}5$ m³/s

$$\rightarrow \alpha = \frac{121{,}5}{\sqrt{37{,}1}} = 19{,}9$$

Saas Balen: $Q_{Amax} \cong 190 + 115^{18} = 305$ m³/s

$$\rightarrow \alpha = \frac{305}{\sqrt{202}} = 21{,}5^{19}$$

[14]

	E	Q_{100}	$\alpha = Q_{100}/\sqrt{E}$	$Q_{100} = 19{,}7\sqrt{E}$
Rhône – Sion	3349	1120	19,3	1140 ± 70
Rhône – Branson	3728	1230	20,1	1200 ± 70

[15]

	1987	1993
Apports à la retenue de Mattmark (pointe*)	119 m³/s	138 m³/s
Débit de pointe à la station hydrométrique de Vispa-Visp**	285 m³/s	330 m³/s

* y compris dérivation d'environ 16,5 m³/s selon calcul des Forces Motrices de Mattmark S.A.

** selon l'Annuaire hydrologique de la Suisse

[16]

$$\left.\begin{aligned} q &= \alpha E^{-1/2} \\ q &= \frac{Q_{Amax}}{E} \end{aligned}\right\} \rightarrow \alpha = q\sqrt{E} = \frac{Q_{Amax}}{\sqrt{E}}$$

où q = débit spécifique de pointe [m³/s · km²]
Q_{Amax} = débit de pointe [m³/s]
E = superficie du bassin versant [km²]

[17] Apport à la retenue de Mattmark (Q_{Trans}).

[18] Rétention dans la retenue de Mattmark (Q_R) à l'instant T^*.

[19] Le fait qu'une plus grande valeur α est obtenue à Saas Balen qu'à Mattmark contredit la logique et indique que l'estimation du débit de pointe effectif à Saas Balen (190 m³/s), basée les traces de crue, pourrait bien être surestimée.

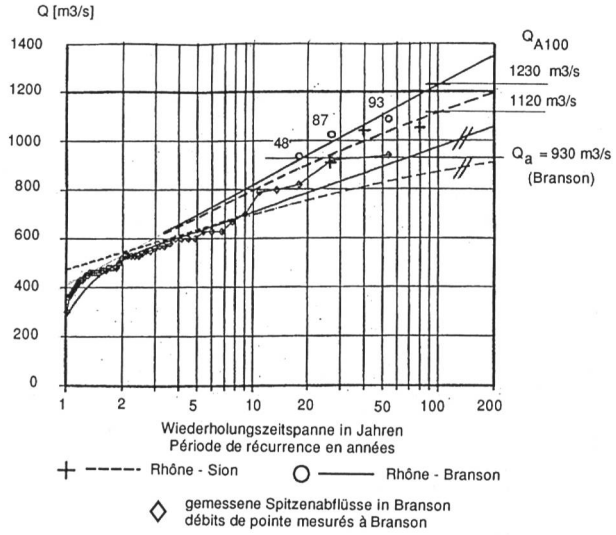


Fig. 3.31. Statistique des débits de pointe du Rhône aux stations hydrométriques de Sion et de Branson.
Courbes inférieures: d'après la Communication no 19 du Service hydrologique et géologique national.
Courbes supérieures: corrigées par le groupe de travail en tenant compte des débits naturels de pointe reconstitués des crues de 1987 et 1993.
(Q_a = capacité hydraulique du Rhône à Branson)

Bild 3.31. Statistik der Spitzenabflüsse der Rhone bei den Abflussmessstationen Sion und Branson.
Untere Kurve: gemäss Mitteilung Nr. 19 der Landeshydrologie und -geologie.
Obere Kurve: korrigiert durch die Arbeitsgruppe aufgrund der rekonstruierten natürlichen Spitzenabflüsse der Hochwässer 1987 und 1993.
(Q_a = Abflusskapazität der Rhone in Branson)

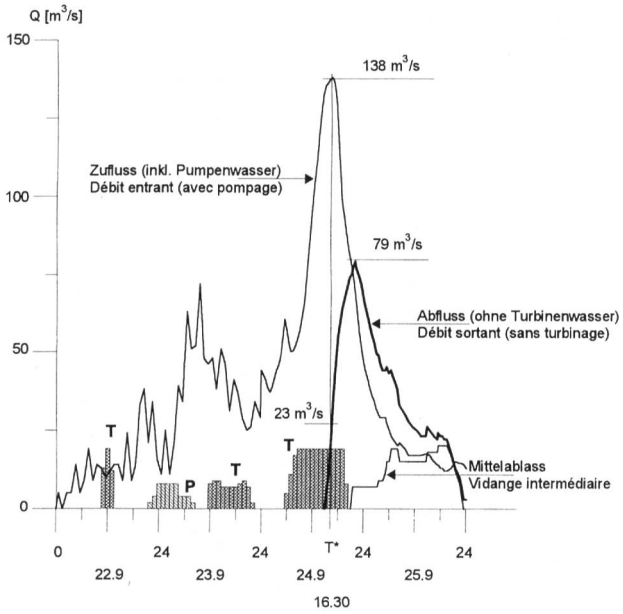


Fig. 3.32. Retenue de Mattmark – Crue de 1993.
T = turbinage sur le palier supérieur
P = pompage sur le palier supérieur
(Débit sortant = débit évacué par le déversoir et la vidange intermédiaire)

Bild 3.32. Speicher Mattmark – Hochwasser 1993.
T = Turbinenbetrieb auf der oberen Stufen
P = Pumpbetrieb auf der oberen Stufe
(Abfluss = Hochwasserüberlauf + Abfluss aus Mittelablass)

Tableau 3.8. Débits de pointe dans la vallée de Saas supérieure lors de la crue de 1993.
$Q_{AXmax} = \alpha_X \sqrt{E_X} = 19{,}9 \sqrt{E_X}$
T^* = temps correspondant à la pointe de la crue
T^{**} = temps correspondant au débit sortant maximum

	E [km2] 1	Débit de pointe [m3/s] Naturel $Q_{AX\,max}$ 2	Rétention dans la retnue $Q_R(T^*)$ 3	Effectif $Q'_{AX\,max}$ 4	Minimum possible $Q''_{AX\,max}$ 5
Mattmark	37,1	121,5		$T = T^{**}$	$T = T^*$
avec adductions		138		79 (57 %)	0
Zermeiggern	65	160		93 (58 %)	22 (14 %)
Saas Almagell	88	187		103 (55 %)	49 (26 %)
Saas Grund	154	247		131 (53 %)	109 (44 %)
				$T = T^*$	
Saas Balen / Pont	192	276	115	161 (58 %)	138 (50 %)
Saas Balen / Station de mesure hydrométrique	202	283	115	168 *) (59 %)	145 (51 %)

*) Valeur reconstituée par Electrowatt Ingénieurs-Conseils S.A. sur la base des traces de crue: 190 m³/s

Tabelle 3.8. Spitzenabflüsse im oberen Saastal anlässlich des Hochwassers 1993.
$Q_{AXmax} = \alpha_X \sqrt{E_X} = 19{,}9 \sqrt{E_X}$
T^* = Zeitpunkt der Hochwasserspitze
T^{**} = Zeitpunkt des grössten Abflusses aus dem Speicher

	E [km2] 1	Spitzenabfluss [m3/s] natürlich $Q_{AX\,max}$ 2	Wasserrückhalt im Speicher $Q_R(T^*)$ 3	effektiv $Q'_{AX\,max}$ 4	mögliches Minimum $Q''_{AX\,max}$ 5
Mattmark mit Wasserzuleitung	37.1	121.5		$T = T^{**}$	$T = T^*$
		138		79 (57 %)	0
Zermeiggern	65	160		93 (58 %)	22 (14 %)
Saas Almagell	88	187		103 (55 %)	49 (26 %)
Saas Grund	154	247		131 (53 %)	109 (44 %)
				$T = T^*$	
Saas Balen / Brücke	192	276	115	161 (58 %)	138 (50 %)
Saas Balen / Abflussmessstation	202	283	115	168 *) (59 %)	145 (51 %)

*) von EWI aufgrund der Hochwasserspuren rekonstruierter Wert: 190 m³/s

– et surtout du fait qu'un débit maximum de 79 m³/s a été déversé par la retenue de Mattmark (fig. 3.32).

Dans le tableau 3.8 (colonne 4), on trouve les débits de pointe effectifs reconstitués entre Mattmark et Saas Balen[20]. Les débits de pointe naturels (colonne 2) sont également reportés à titre de comparaison, ainsi que ceux qui se seraient formés si aucun déversement ne s'était produit (colonne 5). On remarque que la retenue de Mattmark a également réduit de manière significative la crue 1993, à savoir de plus de 40 %. Un effet plus important n'était pas possible car le volume de retenue encore libre le 22 septembre (00.00 heure) ne suffisait pas pour emmagasiner complètement la crue. La raison en était moins la crue elle-

Tableau 3.9. Capacité hydraulique manquante ΔQ de la Viège dans la vallée de Saas supérieure (par rapport à l'état avant la crue de 1993).
$\Delta Q = Q_{AX100} - Q_{aX}$

Tabelle 3.9. Unterkapazitäten ΔQ der Saaser Vispa im oberen Saastal (bezogen auf den Zustand vor dem Hochwasser 1993).
$\Delta Q = Q_{AX100} - Q_{aX}$

	E [km2]	Abflusswassermenge [m3/s] Débits [m3/s] Abfluss-kapazität *) Capacité d'écoulement Q_{aX}	natürlicher Spitzen-abfluss Débit de pointe naturel $Q_{AX\,100}$	$\Delta Q = Q_{aX} - Q_{AX\,100}$
Mattmark	37.5	--	146	--
Zermeiggern	65	55	193	- 138
Saas Almagell	88	79	225	- 146
Saas Grund	154	136	298	- 162
Saas Balen	202	133	341	- 208

*) zur Zeit des Hochwassers 1993 / au moment de la crue 1993

3.2.2 Doveria

Die Hochwässer der Doveria sind nicht untersucht worden, weil im Einzugsgebiet kein Speicherkraftwerk vorhanden ist und die notwendige Verbesserung des Hochwasserschutzes somit nur mittels flussbaulicher Massnahmen erreicht werden kann.

3.2.3 Vispa

Von den beiden hier betrachteten Hochwässern war jenes von 1993 das grössere[15] und im oberen Saastal etwa ein 50- bis 80jährliches Ereignis.

Im oberen *Saastal* sind 1987 praktisch keine, 1993 jedoch erhebliche Ausuferungen aufgetreten, und dies trotz dem Tatbestand, dass sich die maximalen Zuflüsse zum Speicher Mattmark nicht stark unterschieden (119 respektive 138 m³/s) und der Wasserrückhalt im Speicher zum Zeitpunkt T^* nahezu gleich gross war (119 respektive 115 m³/s). Der Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass 1993

– die Niederschlagsintensität ganz allgemein höher war (maximaler natürlicher Zufluss zum Speicher 121,5 statt 102,5 m³/s),
– die Niederschlagsfront weiter in das Tal hinunterreichte, und zwar bis wenigstens Saas Balen, wie die nahezu übereinstimmenden α-Werte der natürlichen Spitzenabflüsse in Mattmark und Saas Balen belegen[16]:

Mattmark: $Q_{Amax} \cong 138 - 16{,}5$[17] $= 121{,}5$ m³/s

$$\rightarrow \alpha = \frac{121{,}5}{\sqrt{37{,}1}} = 19{,}9$$

[15]

	1987	1993
Zufluss zum Speicher Mattmark (Spitze)*	119 m³/s	138 m³/s
Spitzenabfluss bei der Abflussmessstation Vispa – Visp**	285 m³/s	330 m³/s

* inklusive Wasserzuleitung von ca. 16,5 m³/s / gemäss Berechnung der Kraftwerke Mattmark AG
** gemäss Hydrologischem Jahrbuch der Schweiz

[16]

$$\left.\begin{aligned} q &= \alpha E^{-1/2} \\ q &= \frac{Q_{Amax}}{E} \end{aligned}\right\} \rightarrow \alpha = q\sqrt{E} = \frac{Q_{Amax}}{\sqrt{E}}$$

wo q = spezifischer Spitzenabfluss [m³/s · km²]
Q_{Amax} = Spitzenabfluss [m³/s]
E = Grösse des Einzugsgebietes [km²]

[17] Zuleitung zum Speicher Mattmark (Q_{Trans}).

même que les conditions antécédentes défavorables (fig. 3.32) qui ont apporté 4,3 millions de m³ d'eau dans la retenue les 22 et 23 septembre, réduisant le volume libre initial de près de 60 %, soit de 7,45 à 3,15 millions de m³.

Si on avait pu éviter un déversement grâce à un degré de remplissage moindre prévalant le 22 septembre (00.00 heure), la réduction des débits serait passée de 45 à 74 % (–54 m³/s) à Saas Almagell, de 47 à 56 % (–22 m³/s) à Saas Grund et de 41 à 49 % (–23 m³/s) à Saas Balen. Pour éviter tout déversement, il aurait été nécessaire que le degré de remplissage ne dépasse pas 88 % le 22 septembre (00.00 heure). A fin septembre, ceci n'est absolument pas réaliste si l'on ne prend pas de mesures spéciales (voir chapitre 4); le taux de remplissage de 92,6 % était déjà inhabituellement bas pour cette période de l'année.

Si on admet que la capacité hydraulique de la Viège de Saas a été dépassée dans la vallée de Saas supérieure le 24 septembre à environ 16.30–17.00 heures (à environ 15.00 heures déjà à Saas Balen), c'est-à-dire au moment où l'apport naturel à la retenue était d'environ 138–16,5 = 121,5 m³/s et le débit sortant d'environ 23 m³/s (à Saas Balen: 112,5 et 0 m³/s) (fig. 3.32), la capacité hydraulique Q_{aX} peut se chiffrer[20]

- à Zermeiggern, Saas Almagell et Saas Grund à
  $Q_{aX} \cong 121{,}5\,(K-1) - Q^*_{Trans} + 23$
- à Saas Balen à
  $Q_{aX} \cong 112{,}5\,(K-1) - 16{,}5 + 0$

où $$K = \frac{\alpha_X \sqrt{E_X}}{\alpha_0 \sqrt{E_0}} \cong \frac{\sqrt{E_X}}{\sqrt{E_0}}$$

Si on admet de plus que la relation suivante s'applique pour le débit de pointe centennal (fig. 2.1)

$Q_{aX100} \geq \alpha_X \sqrt{E_X} \cong 24 \sqrt{E_X}$

on obtient les valeurs indiquées au tableau 3.9 pour la vallée de Saas supérieure dans l'état avant la crue 1993.

On remarque que dans la vallée de Saas supérieure la capacité hydraulique est très insuffisante si on veut se protéger contre la crue environ centennale. De plus, on constate qu'il ne sera pas possible d'y remédier sans mesures de correction de cours d'eau. Il conviendrait d'étudier si – et, le cas échéant, dans quelle mesure – la retenue de Mattmark doit (et peut) contribuer à la protection contre les crues.

Afin d'être complet, il faut de plus relever que (fig. 3.32)

- l'eau refoulée dans la retenue la nuit du 22 au 23 septembre a été turbinée le 23 septembre déjà, le pompage n'a donc eu aucune influence sur le déroulement de la crue,
- lors de la crue du 24 septembre, il a été turbiné sur les deux paliers. Avec la rupture du câble de signalisation entre Zermeiggern et Mattmark, le turbinage sur le palier supérieur a cependant été interrompu à 19.22 heures. Etant donné que les prises d'eau du palier inférieur avaient été mises hors service afin de pouvoir turbiner à débit maximum sur le palier supérieur et qu'en plus la prise d'eau à Zermeiggern a été obstruée par les apports solides, le turbinage a également dû être interrompu sur le palier inférieur, et que
- l'ouverture de la vidange intermédiaire est prescrite par la consigne de manœuvre des vannes.

Le reproche selon lequel les Forces Motrices de Mattmark n'auraient pas agi dans l'intérêt des populations à l'aval est de ce fait infondé. Les communes de la vallée de Saas supérieure peuvent plutôt s'estimer heureuses que le hasard ait voulu que le degré de remplissage de la retenue soit aussi bas le 22 septembre 1993.

[20] Base de calcul dans l'annexe p. 260.

Saas Balen: $Q_{Amax} \cong 190 + 115$[18] $= 305$ m³/s

$$\rightarrow \alpha = \frac{305}{\sqrt{202}} = 21{,}5$$ [19]

und vor allem darauf, dass

- beim Speicher Mattmark eine Hochwasserentlastung von maximal 79 m³/s auftrat (Bild 3.32).

In der Tabelle 3.8 sind die rekonstruierten effektiven Spitzenabflüsse zwischen Mattmark und Saas Balen aufgeführt (Kolonne 4)[20]. Zum Vergleich sind auch die natürlichen Spitzenabflüsse (Kolonne 2) sowie jene eingetragen, die sich eingestellt hätten, wenn kein Hochwasserüberlauf eingetreten wäre (Kolonne 5). Man erkennt, dass der Speicher Mattmark auch 1993 das Hochwasser erheblich, d.h. um mehr als 40 % abgemindert hat. Eine grössere Wirkung war nicht möglich, weil der am 22. September (00.00 Uhr) noch freie Speicherraum nicht ausreichte, um das Hochwasser vollständig zurückzuhalten. Schuld war weniger das eigentliche Hochwasser als vielmehr seine ungünstige Vorgeschichte (Bild 3.32), die dazu führte, dass dem Speicher am 22. und 23. September 4,3 Mio m³ Wasser zuflossen und das anfänglich freie Speichervolumen von 7,45 auf 3,15 Mio m³, d.h. um nahezu 60 %, reduzierten.

Hätte ein Überlauf dank geringerem Füllungsgrad am 22. September (00.00 Uhr) vermieden werden können, wäre die Abflussminderung in Saas Almagell von 45 auf 74 % (–54 m³/s) angestiegen, in Saas Grund von 47 auf 56 % (–22 m³/s) und in Saas Balen von 41 auf 49 % (–23 m³/s). Die Vermeidung eines Abflusses hätte allerdings vorausgesetzt, dass am 22. September (00.00 Uhr) ein Füllungsgrad von 88 % vorhanden gewesen wäre. Dies ist ohne besondere Vorkehrungen (siehe Kapital 4) gegen Ende September überhaupt nicht realistisch. Bereits der effektive Füllungsgrad von 92,6 % war für die Jahreszeit aussergewöhnlich niedrig.

Geht man davon aus, dass die Abflusskapazität der Saaser Vispa im oberen Saastal am 24. September um etwa 16.30–17.00 Uhr (in Saas Balen bereits um etwa 15.00 Uhr) überschritten wurde, d.h. bei einem natürlichen Zufluss zum Speicher von ca. 138–16,5 = 121,5 m³/s und einem Abfluss aus dem Speicher von ca. 23 m³/s (für Saas Balen: 112,5 und 0 m³/s) (Bild 3.32), ergibt sich die Abflusskapazität Q_{aX} des Fliessgewässers[20]

- in Zermeiggern, Saas Almagell und Saas Grund zu
  $Q_{aX} \cong 121{,}5\,(K-1) - Q^*_{Trans} + 23$
- in Saas Balen zu
  $Q_{aX} \cong 112{,}5\,(K-1) - 16{,}5 + 0$

wo $$K = \frac{\alpha_X \sqrt{E_X}}{\alpha_0 \sqrt{E_0}} \cong \frac{\sqrt{E_X}}{\sqrt{E_0}}$$

Geht man weiter davon aus, dass für den 100jährlichen natürlichen Spitzenabfluss die Beziehung

$Q_{aX100} \geq \alpha_X \sqrt{E_X} \cong 24 \sqrt{E_X}$

gelte (Bild 2.1), findet man für das obere Saastal und den Zustand vor dem Hochwasser 1993 die in der Tabelle 3.9 aufgelisteten Werte.

Es zeigt sich, dass im oberen Saastal erhebliche Unterkapazitäten bestehen, wenn ein Schutz gegen etwa das 100jährliche Hochwasser gewährleistet sein soll, und es

[18] Wasserrückhalt im Speicher Mattmark (Q_R) zum Zeitpunkt T^*.

[19] Dass für Saas Balen ein grösserer α-Wert als für Mattmark resultiert, widerspricht der Logik und weist darauf hin, dass die anhand der Hochwasserspuren vorgenommene Abschätzung des effektiven Spitzenabflusses in Saas Balen (190 m³/s) etwas zu hoch ausgefallen sein dürfte.

[20] Berechnungsgrundlage im Anhang S. 260.

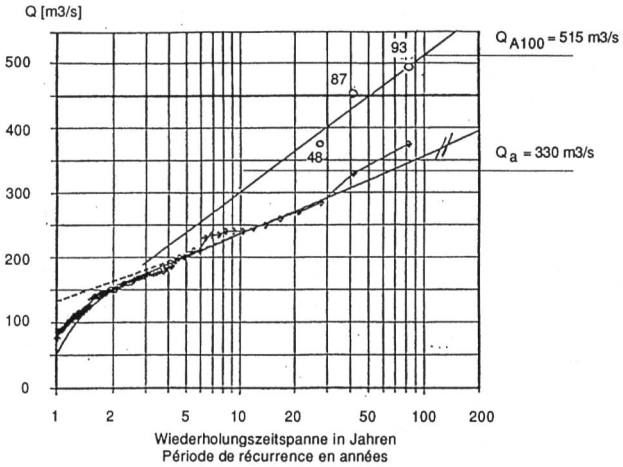


Fig. 3.33. Statistique des débits de pointe de la Viège à la station hydrométrique de Viège.
Courbe inférieure: d'après la Communication no 19 du Service hydrologique et géologique national.
Courbe supérieure: corrigée par le groupe de travail en tenant compte des débits naturels de pointe reconstitués des crues de 1987 et 1993.
(Q_a = capacité hydraulique de la Viège)
(Le pont routier a été transformé après la crue de 1948 et il en a résulté une diminution de la capacité hydraulique.)

Bild 3.33. Statistik der Spitzenabflüsse der Vispa bei der Abflussmessstation Visp.
Untere Kurve: gemäss Mitteilung Nr. 19 der Landeshydrologie und -geologie.
Obere Kurve: korrigiert durch die Arbeitsgruppe aufgrund der rekonstruierten natürlichen Spitzenabflüsse von 1987 und 1993.
(Q_a = Abflusskapazität der Vispa)
(Nach dem Hochwasser 1948 wurde die Strassenbrücke umgebaut und damit die Abflusskapazität verkleinert.)

Dans la *vallée de Zermatt,* il n'y a eu de débordements dignes d'être mentionnés ni en 1987, ni en 1993, si l'on fait abstraction des problèmes liés aux laves torrentielles du Ritigraben. Le débit maximum possible a pratiquement été capté par l'aménagement de la Grande Dixence lors des deux crues et transféré dans la retenue du val des Dix. Il reste cependant à vérifier ce qui se serait passé, si en 1993 la dérivation d'environ 50 m³/s n'avait pu se faire pour des raisons techniques ou afin de respecter la consigne de manœuvre des vannes de la retenue de la Grande Dixence.

La situation à *Viège* est bien plus critique. En 1993, il s'en est fallu de peu qu'un engorgement et ainsi un débordement ne se produisent au pont routier, et ceci alors que les aménagements de Mattmark (rétention) et de la Grande Dixence (dérivation) contribuaient à réduire les débits de la Viège de 115 + 49 = 164 m³/s, soit une réduction des débits naturels de 494 à 330 m³/s (67 %). Si l'on ne veut pas être réduit à miser sur l'effet – non garanti – de ces deux aménagements, on sera donc contraint, ici également, de prendre des mesures de correction de cours d'eau.

Si on admet que le débit de pointe naturel centennal de la Viège à Viège est d'environ 515 ± 35 m³/s (fig. 3.33) et que la capacité hydraulique correspond à peu près au débit de pointe qui s'est écoulé en 1993 (330 m³/s), il en résulte un déficit de capacité hydraulique d'environ 185 m³/s à Viège. Pour couvrir ce déficit, on peut tabler au maximum sur une contribution de 10 m³/s de la part de la retenue de Mattmark et de 15 m³/s de la part des dérivations de la vallée de Zermatt. La première valeur correspond (environ) à l'écrêtement obtenu lorsque la retenue est pleine au début de la crue et la seconde, à la capacité (minimale) de dérivation lorsque les pompes sont hors service. Pour la retenue de Mattmark, on peut considérer une valeur plus élevée si l'une des mesures exposées au chapitre 4 est appliquée.

zeigt sich ferner, dass eine Sanierung ohne flussbauliche Massnahmen nicht möglich sein wird. Ob und inwieweit der Speicher Mattmark zum Hochwasserschutz beitragen soll (und kann), sollte abgeklärt werden.

Der Vollständigkeit halber sei noch festgehalten (Bild 3.32), dass

- das in der Nacht vom 22./23. September in den Speicher hochgeförderte Wasser bereits am 23. September wieder turbiniert wurde, der Pumpbetrieb also keinen Einfluss auf das Hochwassergeschehen hatte,
- während des Hochwassers vom 24. September grundsätzlich auf beiden Stufen turbiniert wurde. Mit der Unterbrechung des Signalkabels zwischen Zermeiggern und Mattmark wurde allerdings der Turbinenbetrieb auf der oberen Stufe um 19.22 Uhr abgestellt. Weil die Wasserfassungen auf der unteren Stufe ausgeleitet waren, um oben maximal turbinieren zu können, und weil überdies die Wasserfassung in Zermeiggern verlandet war, fiel auch die untere Stufe aus, und dass
- das Öffnen des Mittelablasses vom Wehrreglement vorgeschrieben ist.

Der Vorwurf, die Kraftwerke Mattmark hätten nicht im Interesse der Unterlieger gehandelt, ist somit unbegründet. Die Gemeinden im oberen Saastal können vielmehr von Glück reden, dass der Füllungsgrad des Speichers am 22. September 1993 zufälligerweise so niedrig war.

Im *Mattertal* gab es weder 1987 noch 1993 nennenswerte Ausuferungen, wenn von den Problemen im Zusammenhang mit dem Murgang aus dem Ritigraben abgesehen wird. Während beider Hochwässer ist von den Kraftwerken Grande Dixence praktisch das mögliche Maximum an Wasser gefasst und in den Speicher im Val des Dix übergeleitet worden. Es bleibt jedoch zu prüfen, was geschehen wäre, wenn 1993 die Wasserableitung von rund 50 m³/s aus technischen Gründen oder zwecks erforderlicher Einhaltung des Wehrreglements der Stauanlage Grande Dixence nicht möglich gewesen wäre.

Viel kritischer ist die Lage in *Visp.* 1993 hat nur wenig gefehlt, dass es bei der Strassenbrücke zu einem Einstau und damit zu Ausuferungen gekommen wäre, und dies bei einer Entlastung der Vispa seitens der Kraftwerke Mattmark (Wasserrückhalt) und Grande Dixence (Wasserableitung) von 115 + 49 = 164 m³/s, d. h. bei einer Reduktion des natürlichen Abflusses von 494 auf 330 m³/s (67 %). Es besteht also auch an dieser Stelle ein Bedarf an flussbaulichen Massnahmen, wenn man sich nicht auf Wirkungen der beiden Speicherkraftwerke verlassen will, die nicht gewährleistet sind.

Geht man davon aus, dass der natürliche 100jährliche Spitzenabfluss der Vispa in Visp etwa 515 ± 35 m³/s beträgt (Bild 3.33) und die Abflusskapazität etwa dem Spitzenabfluss entspricht, der 1993 abgeflossen ist (330 m³/s), besteht in Visp eine Unterkapazität von etwa 185 m³/s. Zu ihrer Deckung sollten seitens des Speichers Mattmark höchstens 10 m³/s und seitens der Wasserableitung aus dem Mattertal höchstens 15 m³/s eingerechnet werden. Ersteres entspricht (etwa) der Abminderung, wenn der Speicher Mattmark zu Beginn des Hochwassers voll gefüllt ist, und letzteres der (minimalen) Kapazität der Wasserüberleitung, wenn die Pumpen ausgefallen sind. Der Beitrag des Speichers kann höher eingesetzt werden, wenn Massnahmen gemäss Kapitel 4 ergriffen werden.

3.2.4 Résumé

1. Les aménagements à accumulation ont eu – comme il fallait s'y attendre – un effet positif sur les débits lors des crues de 1987 et de 1993, et cela un peu plus en 1987 qu'en 1993. La raison de cette différence est que la crue 1993 s'est produite un peu plus tard dans l'année et de ce fait à un moment où les retenues étaient déjà très pleines. Il n'était donc pas possible de stocker beaucoup d'eau dans les retenues.
2. Toutefois, l'influence des aménagements à accumulation en 1993 aurait tout aussi bien pu être encore plus faible si les retenues avaient été plus fortement remplies au début de la crue ou si les pompes de l'aménagement de la Grande Dixence dans la vallée de Zermatt étaient tombées en panne. L'arrêt des turbines du palier supérieur de l'aménagement de Mattmark montre que c'est justement en cas de crue qu'il faut compter avec des pannes.
3. Seuls les aménagements à accumulation implantés sur des affluents du Rhône dont la confluence avec celui-ci se situe en aval de Viège (y compris les vallées de la Viège) ont une importance pratique pour la protection contre les crues. Dans l'ensemble, il ne faut pas escompter de réduction des débits à l'amont. En effet, il ne s'y trouve pas d'aménagements à accumulation, ou alors seulement des aménagements peu susceptibles d'influencer notablement les débits de crue. Une amélioration de la protection contre les crues (par exemple le long de la Doveria) ne peut de ce fait y être réalisée que par la correction des cours d'eau.
4. Pour la région à l'aval de Viège, la crue de 1993 est la plus grande crue observée depuis le début des mesures et correspond à une période de retour de 50 à 80 ans. Les crues 1987 et 1948 viennent ensuite (dans cet ordre). Etant donné qu'en 1948 les débits n'étaient encore pratiquement pas influencés par les aménagements à accumulation et que l'influence de ces aménagements lors des crues 1987 et 1993 a pu être déterminée, il est possible d'estimer le débit de pointe naturel centennal Q_{A100}[21]. D'autre part, la crue 1993 a montré quelles étaient, au moment où elle s'est produite, les capacités hydrauliques Q_a des tronçons particulièrement critiques:

	Q_{A100} selon chapitre 3.2	Q_{100}[21] selon étude IATE (EPFL)	Q_a
Saas Almagell	225	–	79
Saas Grund	298	–	136
Saas Balen	341	225– 270	133
Viège (Viège)	515	350– 450	330
Sion (Rhône)	1140	940–1120	?
Branson (Rhône)	1200	1000–1160	930

5. Au vu de la capacité hydraulique fort modeste de la Viège de Saas, il n'est pas étonnant qu'il y ait eu d'importants débordements en 1993 dans la vallée de Saas supérieure lorsque, pour la première fois, un déversement notable s'est produit à la retenue de Mattmark malgré le fait qu'avec un degré de remplissage de 92,6 % cette retenue disposait encore d'un creux important pour

[21] Après l'achèvement de la présente étude, l'Institut d'aménagement des terres et des eaux de l'EPFL (IATE) a effectué une étude hydrologique séparée dont les résultats diffèrent en quelques points et que nous citons ici par souci d'exhaustivité.

3.2.4 Zusammenfassung

1. Die Speicherkraftwerke haben sich während der beiden Hochwässer 1987 und 1993 – wie nicht anders zu erwarten war – vorteilhaft auf die Abflüsse ausgewirkt, und zwar 1987 etwas stärker als 1993. Der Grund für diesen Unterschied ist, dass das Hochwasser 1993 später im Jahr und damit zu einem Zeitpunkt auftrat, da die Speicher jeweils bereits stark gefüllt sind. Es konnte deshalb in den Speichern weniger Wasser zurückgehalten werden.
2. Die Wirkung der Speicherkraftwerke hätte 1993 allerdings auch kleiner ausfallen können, und zwar dann, wenn die Speicher zu Beginn des Hochwassers stärker gefüllt gewesen oder wenn die Pumpen des Kraftwerks Grande Dixence im oberen Mattertal ausgefallen wären. Der Ausfall der Turbinen auf der oberen Stufe des Kraftwerks Mattmark belegt, dass gerade im Hochwasserfall mit Pannen gerechnet werden muss.
3. Von praktischer Bedeutung für den Hochwasserschutz sind nur die Speicherkraftwerke rhoneabwärts von Visp (einschliesslich der Visper Täler). Oberhalb kann im wesentlichen mit keinen Entlastungen gerechnet werden, weil dort entweder keine Speicherkraftwerke vorhanden sind oder zumindest keine, die sich spürbar auf den Hochwasserabfluss auswirken könnten. Ein ungenügender Hochwasserschutz (wie auch längs der Doveria) kann deshalb nur mittels flussbaulicher Massnahmen verbessert werden.
4. Für das Gebiet unterhalb von Visp war das Hochwasser 1993 das grösste seit dem Beginn der Abflussmessung und etwa ein 50- bis 80jährliches Ereignis. Die Hochwässer 1987 und 1948 waren (in dieser Reihenfolge) die nächstgrösseren. Weil 1948 praktisch noch kein Einfluss seitens der Speicherkraftwerke vorhanden war und weil deren Einfluss für die Hochwässer 1987 und 1993 ermittelt werden konnte, ist eine Abschätzung der 100jährlichen natürlichen Spitzenabflüsse Q_{A100} möglich[21]. Auf der anderen Seite hat das Hochwasser 1993 für die besonders kritischen Gewässerabschnitte aufgezeigt, welches die Abflusskapazitäten Q_a zum Zeitpunkt des Hochwassers 1993 waren:

	Q_{A100} gemäss Kapitel 3.2	Q_{100}[21] gemäss Studie IATE (EPFL)	Q_a
Saas Almagell	225	–	79
Saas Grund	298	–	136
Saas Balen	341	225– 270	133
Visp (Vispa)	515	350– 450	330
Sion (Rhone)	1140	940–1120	?
Branson (Rhone)	1200	1000–1160	930

5. Angesichts der sehr bescheidenen Abflusskapazität der Saaser Vispa ist es nicht verwunderlich, dass es 1993 im oberen Saastal zu erheblichen Ausuferungen kam, als der Speicher Mattmark erstmals in erheblichem Ausmass zum Überlaufen kam, und dies trotz dem Umstand, dass er mit 92,6 % Füllungsgrad für die Jahreszeit unterdurchschnittlich gefüllt war. Analoges wird sich in Zukunft wiederholen,

[21] Nach Abschluss der vorliegenden Studie wurde vom Institut d'aménagement des terres et des eaux (IATE) der EPFL eine gesonderte hydrologische Studie durchgeführt, deren Ergebnisse in einigen Punkten abweichen und die der Vollständigkeit halber hier wiedergegeben werden.

la saison. De tels débordements se reproduiront dans le futur si aucune mesure appropriée n'est prise (aménagement du cours d'eau et/ou mesures selon chapitre 4) et que les apports parvenant à la retenue dépassent sa capacité de stockage.

6. Le reproche selon lequel les retenues des aménagements hydro-électriques n'auraient pas été exploitées dans l'intérêt des populations vivant à l'aval lors de la crue 1993 n'est pas justifié. Au contraire: ces retenues ont évité que le Valais ne connaisse de plus gros dégâts. Cela est tout particulièrement vrai dans le cas de l'aménagement des Forces Motrices de Mattmark, qui a protégé la vallée de Saas supérieure d'inondations encore plus importantes et Viège d'inondations graves.
7. Il serait possible d'augmenter quelque peu l'effet des retenues si l'on pouvait garantir (par décision d'autorité, accord contractuel ou modification de la concession de droit d'eau) que le degré de remplissage ne dépasse pas un pourcentage approprié. Ceci restreindrait cependant la liberté d'utilisation de la retenue et devrait être dédommagé (chapitre 5). Par ailleurs, les possibilités sont limitées car les bassins versants des retenues ne représentent qu'une petite partie des bassins versants des cours d'eau: à peine 12 % pour la station de mesure Rhône-Branson.

4. Stratégies de mise à contribution des aménagements à accumulation en cas de crue

Au chapitre 3, on a montré aussi bien de manière générale que sur la base des faits concrets constitués par les crues de 1987 et 1993 que l'existence des retenues apporte une contribution positive à la protection contre les crues le long des cours d'eau exploités. Il a toutefois été précisé que l'on ne peut compter que sur la rétention temporaire des eaux, mais pas sur le turbinage, ni sur la dérivation des eaux. En effet, une panne ou un autre cas de force majeure (surcharge d'un tronçon de cours d'eau, observation de la consigne de manœuvre des vannes) peuvent rendre impossible le recours à ces deux dernières options.

Bien qu'il ne fasse aucun doute qu'une plus forte contribution des retenues des aménagements hydro-électriques à la protection contre les crues serait souhaitable, le statu quo ne doit pas être ignoré dans le cadre d'une analyse de stratégies, car il pourrait bien correspondre à la solution la plus judicieuse.

La régulation des retenues ou leur conversion en retenues à buts multiples sont des moyens qui permettent d'apporter une contribution plus substantielle. Les deux stratégies présentent des avantages et des inconvénients qu'il importe de connaître.

4.1 Stratégie 1: maintien du statu quo

Le maintien du statu quo présente le grand avantage que sa contribution est gratuite. Par contre, cette stratégie a le désavantage incontestable que vers la fin de l'été, l'effet devient de plus en plus faible et dépend complètement de l'exploitant de l'aménagement hydro-électrique. Ce dernier poursuit en priorité des buts qui ne sont pas nécessairement ceux de la meilleure protection possible contre les crues. Cependant, les exploitants ont eu jusqu'à présent une attitude prudente vers la fin de l'été en ce qui concerne le remplissage des retenues, afin d'assurer qu'une crue éventuelle ne provoque aucune perte d'eau, ou tout au moins la plus petite perte possible. Le tableau 3.5 montre

wenn keine geeigneten Massnahmen ergriffen werden (Ausbau des Gewässers und/oder Massnahmen gemäss Kapitel 4) und dem Speicher mehr Wasser zufliesst, als er zurückhalten kann.

6. Der Vorwurf, die Speicherkraftwerke hätten ihre Anlagen während des Hochwassers 1993 nicht im Interesse der unterliegenden Bevölkerung betrieben, ist unberechtigt. Im Gegenteil: Sie haben das Wallis vor grösserem Schaden bewahrt. Ganz besonders gilt dies für die Kraftwerke Mattmark, die das obere Saastal vor noch grösseren Überschwemmungen und Visp vor schweren Überschwemmungen geschützt haben.
7. Eine gewisse Steigerung der Wirkung der Speicherkraftwerke wäre möglich, wenn (durch behördliche Verfügungen, vertragliche Vereinbarungen oder Änderung der Wasserrechtskonzession) dafür gesorgt wird, dass der Füllungsgrad der Speicher einen angemessenen Prozentsatz nicht übersteigt. Dies schränkt jedoch die Nutzungsmöglichkeit des Speichers ein und müsste entschädigt werden (Kapitel 5). Die Möglichkeiten sind überdies begrenzt, weil die Einzugsgebiete der Speicher nur einen Bruchteil der Einzugsgebiete der Gewässer umfassen: bezogen auf die Abflussmessstation Rhone-Branson nur etwa 12 %.

4. Strategien für den Einsatz von Speicherkraftwerken im Hochwasserfall

Im Kapitel 3 ist sowohl allgemein als auch konkret, d.h. anhand der Hochwässer 1987 und 1993, dargelegt worden, dass die Existenz von Speicherkraftwerken den Hochwasserschutz in den genutzten Gewässern begünstigt. Es ist aber auch darauf hingewiesen worden, dass nur auf die Wirkung des temporären Wasserrückhalts Verlass ist, nicht aber auf die Wirkungen des Turbinenbetriebs oder einer allfällig vorhandenen Wasserüberleitung. Ihr Einsatz kann durch Pannen oder aus übergeordneten Gründen (Überlastung eines Gewässerabschnitts, Einhaltung des Wehrreglements) verunmöglicht werden.

Obschon ein gegenüber dem Ist-Zustand verstärkter Beitrag der Speicherkraftwerke an den Hochwasserschutz ohne Zweifel erwünscht wäre, darf im Rahmen einer Strategiebetrachtung der «status quo» nicht übergangen werden. Er könnte sich durchaus als die zweckmässigste Lösung erweisen.

Verstärkte Beiträge sind mittels spezieller Speicherregulierung oder Übergang zum Prinzip des Mehrzweckspeichers erreichbar. Beide Strategien haben Vor- und Nachteile, die es zu kennen gilt.

4.1 Strategie 1: Beibehaltung des «status quo»

Die Beibehaltung des «status quo» hat den grossen Vorteil, dass die Wirkung gratis anfällt. Auf der anderen Seite hat diese Strategie den unbestreitbaren Nachteil, dass man gegen Ende des Sommerhalbjahrs mit einem immer kleineren Beitrag rechnen muss und ganz allgemein vom Betreiber des Kraftwerks abhängt, der prioritär andere Ziele als den bestmöglichen Hochwasserschutz vor Augen hat. Immerhin waren bisher die Betreiber gegen Ende des Sommerhalbjahrs mit dem Auffüllen des Speichers in der Regel etwas zurückhaltend, um sicherzustellen, dass bei Auftreten eines Hochwassers kein oder möglichst wenig Wasser durch Überlauf verlorengeht. Dass dieser Beitrag auch gegen Ende September noch erheblich sein kann, zeigt die Tabelle 3.5.

Fig. 4.2. Effet d'une régulation de retenue en fonction du débit lâché et du degré de remplissage de la retenue au début de la crue.
---------- débit du cours d'eau sans régulation
———— débit du cours d'eau avec régulation
F = degré de remplissage de la retenue au temps T_0
Q_T = débit turbiné
(Retenue de Mattmark – crue idéalisée de 1993)

que même à fin septembre cette contribution peut encore être considérable.

En 1993 également, les populations vivant à l'aval des retenues ont largement profité de l'existence de ces dernières. Alors se pose sérieusement la question: un changement du statu quo a-t-il un sens?

Jusqu'à présent, seul l'effet (garanti en permanence) des retenues a été considéré. Aussi longtemps qu'ils demeurent possibles, le turbinage et la dérivation des eaux peuvent aussi décharger les tronçons concernés des cours d'eau. Mais il n'est pas certain que le turbinage et la dérivation constituent toujours des options possibles et adéquates (voir paragraphes 3.1.3 et 3.1.4). Il serait donc judicieux que lors des crues l'organisation de gestion des catastrophes – dans le cas particulier «la cellule catastrophe» cantonale – compte parmi ses membres du personnel qualifié des sociétés de forces motrices, afin de pouvoir juger de l'opportunité de faire fonctionner ou non les turbines et les adductions des divers aménagements. Une telle tâche de conduite ne peut toutefois être menée à bien que si l'on dispose en tout temps, et en particulier lorsque des intempéries font rage, d'informations en temps réel concernant les précipitations, les conditions locales de débits, les niveaux d'eau des retenues et la disponibilité des turbines et des adductions. La fiabilité des moyens de télécommunication indispensables (liaisons de signalisation et liaisons vocales) devrait donc recevoir la plus grande attention.

4.2 Stratégie 2: régulation des retenues

Si une crue se produit alors que la retenue n'est pas entièrement remplie, les eaux seront stockées jusqu'à ce que le niveau maximum d'exploitation soit atteint, après quoi le déversement normal commence (fig. 4.1, hydrogramme en traitillé à gauche). Il est possible de repousser le temps T_1 de ΔT et de diminuer le débit de pointe de ΔQ_2, en effectuant des lâchures d'eau anticipées, à partir du début de la

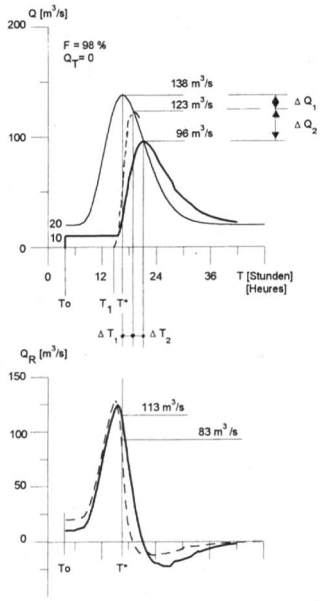


Fig. 4.1. Effet d'une régulation de retenue.
---------- débit du cours d'eau sans régulation
———— débit du cours d'eau avec régulation
F = degré de remplissage de la retenue au temps T_0
Q_T = débit turbiné
(Retenue de Mattmark – crue idéalisée de 1993)

Bild 4.1. Einfluss einer Speicherregulierung.
---------- Abfluss im Gewässer ohne Regulierung
———— Abfluss im Gewässer mit Regulierung
F = Füllungsgrad des Speichers zum Zeitpunkt T_0
Q_T = turbinierte Wassermenge
(Speicher Mattmark – idealisiertes Hochwasser 1993)

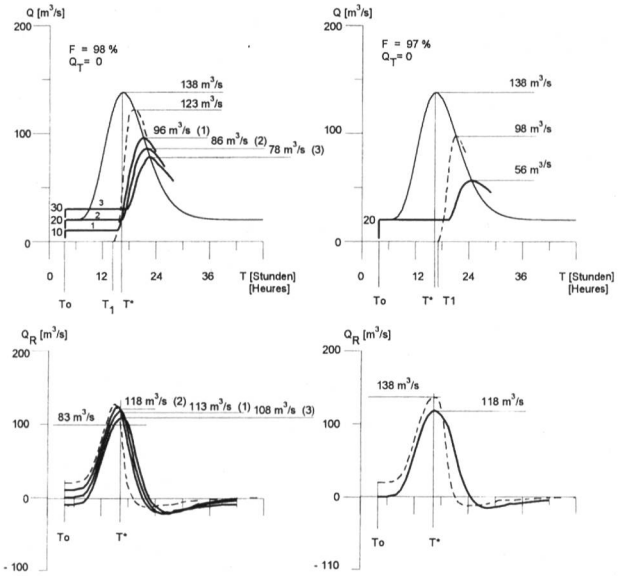


Bild 4.2. Einfluss einer Speicherregulierung in Abhängigkeit der Regulierwassermenge und des Füllungsgrads des Speichers zu Beginn des Hochwassers.
---------- Abfluss im Gewässer ohne Regulierung
———— Abfluss im Gewässer mit Regulierung
F = Füllungsgrad des Speichers zum Zeitpunkt T_0
Q_T = turbinierte Wassermenge
(Speicher Mattmark – idealisiertes Hochwasser 1993)

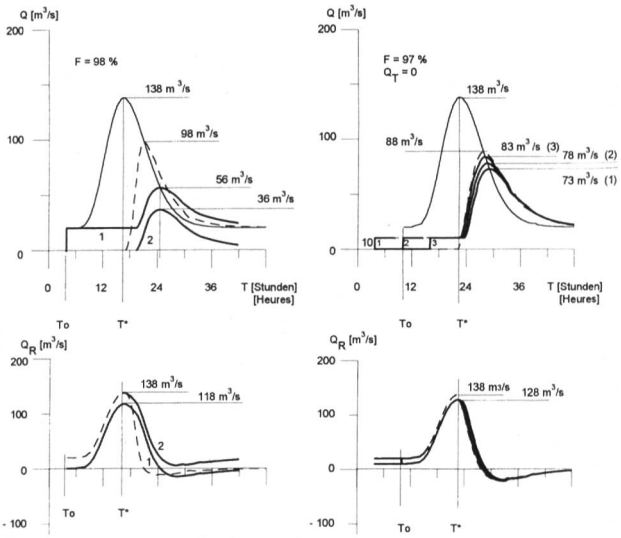


Fig. 4.3. Effet d'une régulation de retenue.
A gauche: en fonction de l'organe de soutirage ou d'évacuation utilisé
---------- débit du cours d'eau sans régulation
———— débit du cours d'eau avec régulation
1 utilisation de la vidange intermédiaire ou de la vidange de fond (Q_T = 0)
2 utilisation des turbines (Q_T = 20 m³/s)
A droite: en fonction du début de la régulation
---------- débit du cours d'eau sans régulation
———— débit du cours d'eau avec régulation
(Retenue de Mattmark – crue idéalisée de 1993)

Bild 4.3. Einfluss einer Speicherregulierung.
Links: in Abhängigkeit des eingesetzten Ablassorgans
---------- Abfluss im Gewässer ohne Regulierung
———— Abfluss im Gewässer mit Regulierung
1 Einsatz des Mittel- oder Grundablasses (Q_T = 0)
2 Einsatz der Turbinen (Q_T =20 m³/s)
Rechts: in Abhängigkeit des Beginns der Regulierung
---------- Abfluss im Gewässer ohne Regulierung
———— Abfluss im Gewässer mit Regulierung
(Speicher Mattmark – idealisiertes Hochwasser 1993)

crue par exemple (temps T_0), pour ralentir le processus de remplissage (fig. 4.1, hydrogramme en trait plein).

A première vue, cette solution paraît séduisante. Toutefois, dans la pratique, elle suppose que la décision de lâcher de l'eau soit prise à un moment où l'on ignore encore si une crue s'amorce véritablement et si, le cas échéant, son ampleur sera telle que la retenue atteindra au moins son niveau maximum d'exploitation. Si tel ne devait pas être le cas, l'exploitant de l'aménagement perdrait un certain volume d'eau, précisément quantifiable, pour lequel il devrait être indemnisé (voir chapitre 5). Plus graves que le paiement d'indemnités seraient cependant les conséquences de la perte de confiance de la population qui résulterait si des dégâts devaient se produire parce qu'une crue n'aurait pas été décelée du tout ou pas été décelée à temps. En conséquence, l'élément déterminant pour la bonne régulation d'une retenue est de disposer d'un modèle de prévisions fiable. Un tel modèle n'est pas disponible à ce jour et il est douteux qu'il le soit jamais.

Une difficulté supplémentaire réside dans le fait que des cas peuvent se produire où, au temps T^*, moins d'eau est stockée dans la retenue avec régulation que sans régulation, c'est-à-dire que la régulation peut avoir l'effet pernicieux d'augmenter le débit de l'émissaire (voir par exemple le cas illustré dans la figure 4.2, à droite, et pratiquement tous ceux de la figure 4.3). Pour éviter que cela ne se produise, il faut stopper les lâchures à temps, ce qui implique un contrôle permanent du régime de la retenue. Un tel contrôle n'est possible que si l'on dispose des informations nécessaires en temps réel, ce qui constitue une exigence difficile à remplir dans les conditions météorologiques sévères qui règnent lors des crues.

A titre d'exemple, les figures 4.2 et 4.3 montrent, pour la retenue de Mattmark et la crue idéalisée de 1993, l'effet sur le régime du lac, à savoir sur le débit Q_A sortant de la retenue et le débit Q_R stocké dans celle-ci, des paramètres suivants:

- débit lâché de manière anticipée (fig. 4.2, à gauche),

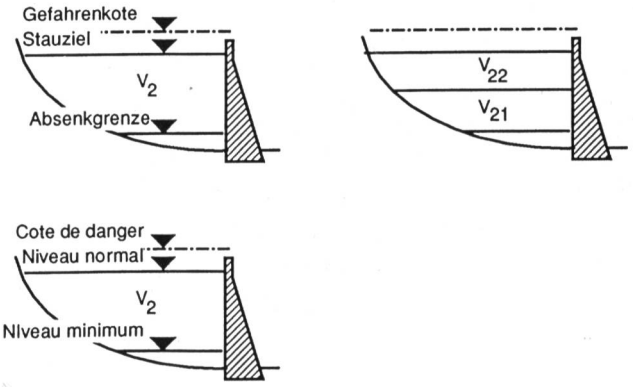


Fig. 4.4. Conversion d'une retenue à but unique en une retenue à buts multiples.
A gauche: retenue à but unique
V_2 destiné à la production d'énergie
A droite: retenue à buts multiples
V_{21} destiné à la production d'énergie
V_{22} destiné à la maîtrise des crues

Bild 4.4. Übergang vom Ein- zum Mehrzweckspeicher.
Links: Einzweckspeicher
V_2 für Wasserkraftnutzung
Rechts: Mehrzweckspeicher
V_{21} für Wasserkraftnutzung
V_{22} für Hochwasserschutz

Die Unterlieger haben also auch 1993 stark von der Existenz der Speicher profitiert. Es stellt sich somit ernsthaft die Frage, ob eine Änderung des «status quo» sinnvoll ist.

Bis jetzt wurde nur die (jederzeit gewährleistete) Wirkung der Speicher betrachtet. Solange einsatzfähig, können auch das Turbinieren und das Überleiten von Wasser längs der betroffenen Gewässerabschnitte Entlastungen bewirken. Es ist aber nicht gesagt, dass das Turbinieren oder Überleiten von Wasser möglich oder angezeigt sind (siehe Abschnitte 3.1.3 und 3.1.4). Es wäre deshalb sinnvoll, wenn während Hochwässern erfahrenes Kaderpersonal der Kraftwerksgesellschaften in der Katastrophenorganisation, d. h. konkret in der kantonalen «Katastrophenzelle», vertreten wäre, um zu beurteilen, wo der Turbinenbetrieb und/oder eine Wasserüberleitung zweckmässig oder besser einzustellen sind. Eine solche Führungsaufgabe kann allerdings nur erfüllt werden, wenn hinsichtlich der Niederschläge, der örtlichen Abflüsse, der Wasserstände in den Speichern und der Einsatzbereitschaft der Turbinen resp. der Wasserüberleitungen Echtzeitinformationen zur Verfügung stehen, und zwar auch dann, wenn ein heftiges Unwetter tobt. Der Sicherheit der benötigten Signal- und Sprechverbindungen müsste also höchste Beachtung geschenkt werden.

4.2 Strategie 2: Speicherregulierung

Tritt ein Hochwasser auf und ist der Speicher nicht voll gefüllt, wird das zufliessende Wasser so lange im Speicher zurückgehalten, bis der Wasserspiegel das Stauziel erreicht. Dann beginnt die ordentliche Hochwasserentlastung (Bild 4.1, gestricheltes Hydrogramm). Dieser Zeitpunkt T_1 kann hinausgeschoben und die Abflussspitze um ΔQ_2 vermindert werden, wenn zeitlich vorgezogen, z. B. ab Beginn des Hochwassers (T_0), Wasser aus dem Speicher abgelassen und auf diese Weise der Füllprozess verlangsamt wird (Bild 4.1, ausgezogenes Hydrogramm).

Auf den ersten Blick sieht diese Lösung verlockend aus. In der Praxis verlangt sie jedoch, dass der Entscheid, Wasser abzulassen, zu einem Zeitpunkt getroffen wird, da noch keineswegs feststeht, ob sich überhaupt ein Hochwasser einstellt und ob dieses den Speicher wenigstens bis zum Stauziel füllen wird. Wäre dies nicht der Fall, würde dem Inhaber des Kraftwerks ein genau bestimmbares Wasservolumen verlorengehen, das ihm vergütet werden muss (siehe Kapitel 5). Schwerwiegender als allfällige Entschädigungszahlungen wäre jedoch der Vertrauensverlust bei der Bevölkerung, wenn ein Hochwasser nicht oder nicht rechtzeitig erkannt würde und Schäden entstehen. Massgebend für eine erfolgreiche Speicherregulierung ist folglich die Verfügbarkeit eines auch quantitativ zuverlässigen Prognosemodells. Ein solches steht heute nicht zur Verfügung, und ob es je zur Verfügung stehen wird, ist fraglich.

Erschwerend ist ferner, dass es Fälle gibt (wie z. B. jener in Bild 4.2 rechts, aber auch bei praktisch allen in Bild 4.3), bei denen zur Zeit T^* mit der Regulierung weniger Wasser im Speicher zurückgehalten wird als ohne Regulierung, also mit der Regulierung ein negativer Effekt, d. h. eine Vergrösserung des Abflusses im Vorfluter, erzielt wird. Soll dies vermieden werden, muss rechtzeitig der Abfluss eingestellt werden. Dies ist nur möglich, wenn das Seeregime laufend verfolgt wird. Voraussetzung ist, dass man über die relevanten Echtzeitinformationen verfügt, was beim rauhen Umweltklima, das während Hochwässern herrscht, kaum zuverlässig sicherzustellen ist.

In den Bildern 4.2 und 4.3 wird für den Speicher Mattmark und das idealisierte Hochwasser 1993 beispielhaft dargestellt, wie sich

- die Menge des vorgezogenen Abflusses (Bild 4.2 links),

- degré de remplissage de la retenue au début de la crue (fig. 4.2, à gauche et à droite),
- décision de turbiner ou non l'eau (fig. 4.3, à gauche) et
- début de la régulation (fig. 4.3, à droite).

On voit ainsi que la régulation de la retenue pourrait être une stratégie tout à fait valable si l'on disposait d'un modèle de prévisions fiable et si l'on pouvait garantir que les données permettant de suivre l'évolution du régime de la retenue soient effectivement disponibles. On s'aperçoit aussi que la régulation de la retenue ne permet d'obtenir qu'un renforcement limité de l'effet naturel de ladite retenue, renforcement d'autant plus marqué que le degré de remplissage au début de la crue est faible. Il est ainsi confirmé à nouveau que le degré de remplissage du bassin d'accumulation est le paramètre essentiel et ce dernier ne peut être influencé qu'avec la stratégie définie ci-après.

4.3 Stratégie 3: conversion en retenues à buts multiples

S'agissant d'un bassin d'accumulation destiné à un seul rôle, on parle de retenue à but unique. S'il en poursuit plusieurs, on parle d'une retenue à buts multiples.

En Suisse, les bassins d'accumulation des aménagements hydro-électriques sont en règle générale des retenues à but unique. Cela revient à dire que l'exploitant peut gérer la totalité du volume utile selon ses besoins. Il est tout au plus astreint à se plier à des obligations fixées dans les concessions de droits d'eau. En règle générale, il ne s'agit que de compensations à des tiers pour la perte de possibilités d'exploitation.

Avec la conversion d'une retenue à but unique en une retenue à buts multiples, on peut satisfaire de manière optimale à la requête d'une meilleure contribution à la protection contre les crues de la part de celle-ci. Il est alors nécessaire de scinder en deux le volume utile V_2 (fig. 4.4) et de réserver la tranche supérieure (V_{22}) pour la protection contre les crues. Ceci n'est cependant pas possible sans dédommagements (voir chapitre 5).

Contrairement à la stratégie 2, il s'agit ici d'une mesure passive, c'est-à-dire d'une mesure dont l'effet ne peut être réduit ni par des défaillances techniques ou humaines, ni par des erreurs d'appréciation. Au début d'une crue, le volume V_{22} est toujours disponible et peut stocker complètement le débit entrant aussi longtemps que le plan d'eau n'a pas atteint le niveau normal de retenue. Lorsque ce niveau est atteint, il n'est plus permis de gérer librement la retenue – que ce soit en rapport avec la protection contre les crues ou avec la production d'électricité – car la sécurité de l'ouvrage a priorité absolue.

Le volume de la tranche de retenue V_{22} à prévoir pour la protection contre les crues est fonction de l'ampleur (du temps de retour) de la crue dont on désire encore pouvoir stocker intégralement les apports.

A titre de complément, il faut encore mentionner qu'il serait également possible de combiner les stratégies 2 et 3. Toutefois, faire usage de cette possibilité revient à combiner une mesure passive avec une mesure active, cette dernière étant, comme on le sait, tributaire de moyens techniques et humains.

- der Füllungsgrad zu Beginn des Hochwassers (Bild 4.2 links resp. rechts),
- der Entscheid, Wasser zu turbinieren oder nicht (Bild 4.3 links), und
- der Zeitpunkt des Beginns der Regulierung (Bild 4.3 rechts)

auf das Seeregime, d.h. auf den Abfluss Q_A aus dem Speicher und den Wasserrückhalt Q_R im Speicher auswirken. Es zeigt sich, dass die Speicherregulierung eine durchaus taugliche Strategie sein könnte, wenn man über ein zuverlässiges Prognosemodell verfügen würde und Gewähr hätte, die für die Verfolgung des Seeregimes benötigten Daten auch wirklich zu erhalten. Es zeigt sich aber auch, dass mit der Speicherregulierung nur eine graduelle Verstärkung der natürlichen Wirkung des Speichers erzielt werden kann, und zwar um so stärker, je niedriger der Füllungsgrad des Speichers zu Beginn des Hochwassers ist. Es bestätigt sich also erneut, dass der Füllungsgrad der massgebende Parameter ist, und dieser kann nur mit der nachfolgend beschriebenen Strategie beeinflusst werden.

4.3 Strategie 3: Übergang zu einem Mehrzweckspeicher

Steht ein Speicher im Dienst eines einzigen Zwecks, spricht man von einem Einzweckspeicher. Dient er mehr als einem Zweck, spricht man von einem Mehrzweckspeicher.

In der Schweiz sind die Speicher von Kraftwerken in der Regel Einzweckspeicher. Dies bedeutet, dass der Betreiber des Kraftwerks das gesamte Nutzvolumen entsprechend seinen Bedürfnissen bewirtschaften kann. Eingeschränkt ist er höchstens durch Auflagen in der Wasserrechtskonzession, und dies in der Regel nur dann und nur soweit, als gegenüber einem Dritten Kompensation für verlorene Nutzungsmöglichkeiten geleistet werden muss.

Mit dem Übergang vom Ein- zum Mehrzweckspeicher kann der Wunsch nach verstärktem Einsatz des Speichers zugunsten des Hochwasserschutzes optimal erfüllt werden. Alles, was es braucht, ist, das Nutzvolumen V_2 in zwei Teile aufzuteilen (Bild 4.4) und den oberen (V_{22}) für den Hochwasserschutz zu reservieren. Dies ist allerdings nicht ohne Entschädigung möglich (siehe Kapitel 5).

Im Gegensatz zur Strategie 2 handelt es sich hier um eine passive Massnahme, d.h. um eine Massnahme, deren Wirkung weder durch technisches oder menschliches Versagen noch durch Fehleinschätzungen geschmälert werden kann. Das Volumen V_{22} ist zu Beginn eines Hochwassers immer frei und kann das zufliessende Wasser solange vollumfänglich zurückhalten, bis der Wasserspiegel das Stauziel erreicht. Ab diesem Zeitpunkt ist – wie für die Wasserkraftnutzung – keine Bewirtschaftung mehr erlaubt, weil die Sicherheit der Stauanlage absolute Priorität hat.

Die Grösse des Speicheranteils V_{22}, der zugunsten des Hochwasserschutzes eingesetzt wird, ist vom Anliegen abhängig, bis zu welchem Hochwasserereignis alles dem Speicher zufliessende Wasser zurückgehalten werden soll.

Der Vollständigkeit halber ist noch zu vermerken, dass die Strategien 2 und 3 kombiniert werden könnten. Tut man dies, kombiniert man allerdings eine passive mit einer aktiven Massnahme und wird von Personen und technischen Mitteln abhängig.

4.4 Résumé

1. Il existe des possibilités de mettre à contribution de manière accrue les retenues pour la protection contre les crues. Il s'agit d'une part de la mesure active de la régulation de retenues et d'autre part de la mesure passive qui consiste à attribuer une tranche des retenues à la tâche de protection contre les crues, cette dernière mesure supposant la conversion de retenues à but unique en retenues à buts multiples.

2. Par le recours à la *régulation de la retenue,* un débit encore admissible sera évacué à partir du début de la crue (voire éventuellement encore plus tôt) afin de ralentir le remplissage de la retenue. Au début, cette manœuvre provoque une augmentation de débit tout au long de l'émissaire ou tout au moins en aval de la restitution. La question reste ouverte de savoir si le débit peut aussi être diminué de manière appréciable pendant la pointe de la crue. Ceci dépend évidemment des possibilités de contrôle et de gestion de la régulation. De manière générale, le succès dépendra aussi de la prévision à temps de la crue et de l'estimation correcte de son intensité. On est ainsi dépendant des prévisions, et comme celles-ci ne sont pas (encore) suffisamment fiables, la stratégie de la régulation des retenues comporte certains risques. En cas d'insuccès, soit on décevra les espérances de la population, soit il faudra payer une indemnité à l'exploitant de l'aménagement.

3. Par la *conversion en retenue à buts multiples,* la diminution de débit désirée peut être garantie en tout temps, car d'une part une portion bien définie du volume de la retenue est réservée au stockage des apports de crue et d'autre part le concours de personnes et le recours à des moyens techniques ne sont pas nécessaires. Cette solution n'est cependant pas bon marché, car l'exploitant de l'aménagement doit renoncer de manière permanente à l'utilisation d'une partie de sa retenue et a droit de ce fait à une compensation équivalente.

4. Comme le *statu quo* apporte déjà une contribution substantielle à la protection contre les crues, la question se pose sérieusement de savoir si, pour un gain relativement peu important, on doit avoir recours à une stratégie qui comporte soit des risques, soit une compensation onéreuse.

5. Il serait opportun de compléter, tant du point de vue du personnel que du matériel, l'organisation cantonale en matière de catastrophes (à savoir la «cellule catastrophe»), afin d'optimiser la mise en service des turbines ainsi que celle des adductions existantes aussi longtemps que ces dernières restent opérationnelles. De telles mesures permettent d'influencer de manière positive les débits à l'aval des retenues et des prises d'eau. Il faut toutefois renoncer à prendre ces mesures s'il devait en résulter des débits critiques dans un secteur plus éloigné en aval (par exemple dans le Rhône).

6. De façon générale, il faut rendre attentif au fait qu'il est plus efficace et en règle générale aussi meilleur marché de prendre les mesures requises de protection contre les crues là où elles s'avèrent nécessaires, et non pas à un endroit très éloigné de la zone à protéger. C'est d'ailleurs pour cette raison que les bassins de rétention de crues sont toujours implantés dans les environs immédiats du tronçon de cours d'eau à protéger.

4.4 Zusammenfassung

1. Es gibt Möglichkeiten, die Speicher verstärkt für den Hochwasserschutz einzusetzen. Es sind dies die aktive Massnahme der Speicherregulierung und die passive Massnahme der Ausscheidung eines zusätzlichen Hochwasserschutzraums im Speicher, d.h. der Übergang vom Ein- zum Mehrzweckspeicher.

2. Bei der *Speicherregulierung* wird ab Beginn des Hochwassers (oder eventuell schon vorher) eine noch verantwortbare Wassermenge abgelassen mit dem Ziel, den Auffüllprozess im Speicher zu verlangsamen. Die Regulierung bewirkt anfänglich, dass der Abfluss entweder längs des gesamten Vorfluters oder zumindest unterhalb der Wasserrückgabe vergrössert wird. Ob er während der eigentlichen Hochwasserspitze auch verstärkt abgemindert wird, ist offen und davon abhängig, ob die Regulierung kontrolliert und gesteuert werden kann. Ganz allgemein ist der Erfolg auch davon abhängig, ob das Hochwasser rechtzeitig erkannt und hinsichtlich seiner Stärke richtig eingeschätzt wird. Man ist somit von Prognosen abhängig, und weil Prognosen (noch) nicht sehr zuverlässig sind, ist die Speicherregulierung risikobehaftet. Bei Misserfolg wird entweder die Erwartung der Bevölkerung enttäuscht oder eine Entschädigungszahlung an den Kraftwerkbetreiber fällig.

3. Beim *Übergang zu einem Mehrzweckspeicher* kann die angestrebte Abflussverminderung mit Sicherheit gewährleistet werden, weil ein bestimmter Teil des Nutzvolumens für den Hochwasserrückhalt reserviert wird, also immer zur Verfügung steht, und weil weder eine Mitwirkung des Menschen noch der Technik erforderlich ist. Die Lösung ist aber nicht billig, weil der Inhaber des Kraftwerks dauernd auf die Nutzung eines Teils seines Speichers verzichtet und somit Anrecht auf gleichwertigen Ersatz hat.

4. Weil bereits mit dem «*status quo*» ein ganz erheblicher Beitrag an den Hochwasserschutz geleistet wird, stellt sich ernsthaft die Frage, ob für einen relativ kleinen Gewinn eine entweder risikobehaftete oder teure Strategie eingesetzt werden soll.

5. Zweckmässig wäre es, die kantonale Katastrophenorganisation (konkret die «Katastrophenzelle») personell und materiell so zu ergänzen, dass der Einsatz der Turbinen und der Einsatz vorhandener Wasserüberleitungen – solange sie operationell sind – optimal erfolgt. Mit ihrer Hilfe kann der Abfluss unterhalb von Speichern und Wasserfassungen positiv beeinflusst werden. Handkehrum muss auf ihren Einsatz verzichtet werden, wenn weiter flussabwärts (z.B. in der Rhone) kritische Abflussverhältnisse entstehen würden.

6. Ganz allgemein ist darauf hinzuweisen, dass es effizienter und in der Regel auch billiger ist, die erforderlichen Hochwasserschutzmassnahmen dort zu treffen, wo sie benötigt werden, und nicht weit davon entfernt. Aus diesem Grund werden Hochwasserrückhaltebecken auch immer in der unmittelbaren Nähe des zu schützenden Gewässerabschnitts angeordnet.

5. Situation juridique

Au sens de l'article 43 de la loi fédérale du 16 décembre 1916 sur l'utilisation des forces hydrauliques, le concessionnaire – soit l'exploitant d'un aménagement hydro-électrique – acquiert dans les limites de l'acte de concession le droit d'utiliser les cours d'eau désignés. Ce droit une fois valablement concédé ne peut être retiré ou restreint, sauf si l'intérêt public le justifie et contre indemnisation. Le propriétaire de tels ouvrages voit donc ses investissements protégés pendant toute la durée de sa concession de droits d'eau. La jurisprudence du Tribunal fédéral y relative ainsi que l'avis de droit du juge fédéral Dubach en donnent une interprétation exhaustive.

L'application de cette disposition dans un cas particulier et lorsque les autorités concédantes et le concessionnaire ne s'entendent pas relève des autorités de recours en matière de forces hydrauliques exclusivement (Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie, commission de recours en matière d'économie des eaux, voire Tribunal fédéral), qui statuent sur le bien-fondé du retrait partiel ou total des droits concédés et sur l'indemnisation (cf. notamment le chiffre 29 de la modification de la loi fédérale d'organisation judiciaire du 4 octobre 1991).

La situation peut être différente lorsque des circonstances exceptionnelles et de caractère urgent contraignent l'autorité compétente à prendre les mesures nécessaires pour parer à un danger sérieux et imminent menaçant la sécurité publique, en recourant par exemple à la clause générale de police. Le concessionnaire pourrait être amené à accepter, dans cette hypothèse, des mesures d'urgence sans dédommagement. Dans le cas des dangers caractéristiques et prévisibles, les conditions d'application de cette clause générale ne sont pas remplies. La protection contre les crues doit alors être réalisée par des mesures d'entretien des cours d'eau, par des mesures relevant de l'aménagement du territoire et, le cas échéant, par des travaux de génie civil, ainsi que le prévoit la loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau.

On ne pourrait contraindre les aménagements à accumulation à contribuer à la protection contre les crues (voir chapitre 4) que si les conditions mentionnées plus haut sont remplies, à moins que leurs exploitants ne s'engagent sur une base volontaire à coopérer avec les autorités cantonales. Toutefois, les exploitants ne seront vraisemblablement disposés à coopérer que si on leur garantit la compensation intégrale de leurs pertes de production. Les implications d'une telle compensation sont traitées au chapitre 6.

L'utilisation des aménagements hydro-électriques pour la maîtrise des crues est toutefois limitée par les prescriptions en matière de sécurité qu'ils sont tenus d'observer. Ainsi, par exemple, la consigne de manœuvre des vannes ne peut en aucun cas être suspendue.

5. Rechtslage

Nach Artikel 43 des Bundesgesetzes vom 16. Dezember 1916 über die Nutzbarmachung der Wasserkräfte erwirbt der Konzessionär, das heisst der Betreiber eines Wasserkraftwerks, nach Massgabe der Konzessionsbestimmungen ein Recht zur Nutzung des betreffenden Gewässers. Das einmal erteilte Recht kann nur aus Gründen des öffentlichen Wohls und gegen volle Entschädigung zurückgezogen oder geschmälert werden. Insofern verfügt der Kraftwerksbetreiber während der gesamten Konzessionsdauer über eine sichere Grundlage für seine Investitionen. Die Rechtsprechung des Bundesgerichts sowie ein Rechtsgutachten von alt Bundesrichter Dubach geben zu dieser Vorschrift eine umfassende Auslegung.

Können sich die Konzessionsbehörde und der Konzessionär in einem konkreten Fall nicht einigen, obliegt es ausschliesslich der Rechtsmittelbehörde auf dem Gebiet der Wasserkraftnutzung (Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Rekurskommission für Wasserwirtschaft und allenfalls Bundesgericht), über die Berechtigung einer teilweisen oder vollständigen Zurückziehung der konzedierten Rechte sowie über die Höhe der Entschädigung zu entscheiden (vgl. Ziffer 29 der Änderung des Bundesgesetzes über die Bundesrechtspflege vom 4. Oktober 1991).

Anders könnte die Situation sein, wenn aussergewöhnliche und dringliche Umstände die zuständige Behörde zwingen, Massnahmen zur Abwendung einer ernsthaften, unmittelbar drohenden Gefahr für die öffentliche Sicherheit anzuordnen, beispielsweise unter Berufung auf die polizeiliche Generalklausel. Solche Notfallmassnahmen müsste ein Konzessionär allenfalls entschädigungslos dulden. Bei typischen und vorhersehbaren Gefährdungslagen sind die Bedingungen zur Anwendung dieser Generalklausel jedoch nicht erfüllt. Hier ist der Hochwasserschutz laut Wasserbaugesetz durch Gewässerunterhalt, raumplanerische und nötigenfalls auch bauliche Massnahmen angemessen zu gewährleisten.

Die Speicherkraftwerke könnten zu einem Beitrag an den Hochwasserschutz (vgl. Kapitel 4) nur unter den oben genannten Voraussetzungen herangezogen werden; es sei denn, der Inhaber des Kraftwerks erkläre sich auf freiwilliger Basis zu einer Kooperation mit den kantonalen Behörden bereit. Diese Bereitschaft dürfte er jedoch von einer vollständigen Abgeltung seiner Nutzungsausfälle abhängig machen. Was dies bedeutet, wird in Kapitel 6 dargelegt.

Jeder Einsatz eines Wasserkraftwerks zugunsten des Hochwasserschutzes findet seine Schranken in den Sicherheitsanforderungen, welche die Anlage selber erfüllen muss. So darf etwa das Wehrreglement auf keinen Fall ausser Kraft gesetzt werden.

6. Coûts

Comme il a été mentionné au chapitre 5, toute intervention d'une autorité publique ayant pour conséquence de restreindre l'utilisation d'un aménagement à accumulation doit être intégralement indemnisée. Ce principe s'applique aussi en cas d'arrangement par contrat. Cependant, la question de l'indemnisation se pose de manière différente pour une perte de production liée à la régulation d'une retenue ou à la conversion en retenue à buts multiples. Dans le premier cas, il s'agit de l'indemnisation d'une perte de production exceptionnelle et, dans le second, d'une compensation pour une réduction permanente de production.

6.1 Perte de production résultant d'une régulation de retenue

La régulation d'une retenue n'entraîne une perte de production pour l'exploitant d'un aménagement que dans le cas où une plus grande partie des apports d'une crue aurait pu être stockée si l'on n'avait pas effectué de régulation. Comme une telle perte ne se produit qu'exceptionnellement et en quantité variable, une indemnisation financière est indiquée dans le cas présent. A cet égard, il faut préciser que l'eau perdue aurait pu être utilisée en hiver lors de forte demande. Par conséquent, il en résulte une perte de production, dont les coûts d'indemnisation doivent être estimés sur la base du prix du marché de l'énergie de pointe d'hiver.

6.2 Réduction de la production résultant d'une conversion en retenue à buts multiples

La conversion d'une retenue à but unique en une retenue à buts multiples réduit le volume réservé à la production d'énergie électrique et se répercute sur l'aménagement entier. Bien que la quantité des apports utilisables reste identique, la qualité de l'énergie et la valeur de la production se trouvent modifiées. Un aménagement à accumulation est conçu pour produire de l'énergie d'hiver de haute valeur (utilisation des apports d'été en hiver au moment de la demande journalière de pointe) et pour la régulation de la puissance pendant toute l'année. Grâce à une importante puissance installée, la production peut être adaptée avec flexibilité l'année durant à la demande en énergie électrique. Dans ce sens, le volume du bassin est un élément essentiel, car il permet d'éviter la contrainte d'une production d'énergie immédiate selon les apports en eau instantanés.

Cette perte permanente ne peut pas être simplement compensée financièrement, mais doit au contraire être remplacée par une contrepartie effective. Dans ce sens, entrent en ligne de compte:

a) *dans le voisinage de la retenue à buts multiples*

- Surélévation du barrage

Le barrage sera surélevé d'une hauteur telle qu'il soit possible de créer le volume nécessaire pour la protection contre les crues. La surélévation de 13,5 m du barrage de Mauvoisin réalisée dans les années 1989/91, de même que la surélévation de 17 m du barrage de Luzzone en cours de réalisation sont des exemples qui démontrent la validité technique d'une telle solution (mais ces réalisations entrent dans un autre contexte).

- Retenue complémentaire communicante

Une retenue supplémentaire (nouvelle), dont le volume correspond au volume requis, est relié par une galerie à la retenue existante.

- Aménagement complémentaire de pompage-turbinage saisonnier

6. Kosten

Behördliche Eingriffe in den Betrieb eines Speicherkraftwerks erfordern, wie in Kapitel 5 festgehalten ist, eine volle Entschädigung der mit dem Eingriff verbundenen Nutzungsbeschränkung. Gleiches gilt im Falle einer vertraglichen Lösung. Die Entschädigungsfrage stellt sich dabei unterschiedlich, je nachdem ob es sich um Produktionsverluste infolge einer Speicherbewirtschaftung oder des Übergangs zu einem Mehrzweckspeicher handelt. Im einen Fall geht es um die Entschädigung einer ausserordentlichen Produktionseinbusse und im anderen Fall um die Kompensation einer dauernden Produktionsschmälerung.

6.1 Produktionseinbusse als Folge einer Speicherregulierung

Die Speicherregulierung bewirkt für den Betreiber des Kraftwerks nur dann eine Produktionseinbusse, wenn er ohne die Regulierung einen grösseren Anteil des Hochwasserzuflusses hätte zurückhalten können. Weil eine solche Einbusse nur ausnahmsweise und in unterschiedlichem Ausmass auftritt, ist eine Geldentschädigung die angezeigte Entschädigungsform. Dabei gilt es zu beachten, dass das verlorene Wasser zu Starklastzeiten im Winter hätte genutzt werden können. Die zu entschädigenden Kosten ergeben sich somit aus der Produktionseinbusse, welche zu Marktpreisen der Winterstarklastenergie bewertet wird.

6.2 Produktionsschmälerung als Folge des Übergangs zu einem Mehrzweckspeicher

Der Übergang von einem Ein- zu einem Mehrzweckspeicher reduziert das für die elektrische Energieproduktion nutzbare Speichervolumen und beeinträchtigt das gesamte Kraftwerk. Obwohl die nutzbaren Wasserzuflüsse gleich bleiben, werden Qualität und Marktwert der Produktion verändert. Ein Speicherkraftwerk ist zur Bereitstellung von hochwertiger Winterenergie (Nutzung der Sommerzuflüsse im Winter zu Spitzen-Tagesbedarfzeiten) und zur Leistungsregulierung während des ganzen Jahres konzipiert. Grosse installierte Maschinenleistungen ermöglichen ganzjährig eine flexible Anpassung der Produktion an den elektrischen Energiebedarf. Rückgrat hiefür ist der Speicherraum, welcher den Zwang einer unmittelbaren Energieproduktion gemäss aktuellem Wasserdargebot aufhebt.

Diese dauernde Einbusse kann nicht einfach mit Geld aufgewogen werden. Sie muss vielmehr real ersetzt werden. In Frage kommen:

a) *im Raum des Mehrzweckspeichers*

- Erhöhung der Talsperre

Die Talsperre wird um das Mass des für den Hochwasserschutz erforderlichen Freihalteraums erhöht. Beispiele für die technische Realisierbarkeit derartiger Lösungen (die aber aus anderen Beweggründen realisiert werden) sind die Erhöhung der Staumauer Mauvoisin um 13,5 m in den Jahren 1989/91 sowie diejenige der Staumauer Luzzone TI um 17 m (zurzeit im Bau).

- Kommunizierender Ersatzspeicher

Ein zweiter neuer Speicher, dessen Stauvolumen dem erforderten Freihaltevolumen entspricht, wird über Stollen mit dem bestehenden Speicher verbunden.

- Ergänzung mit einer Jahres-Pumpspeicheranlage

Sofern die beiden vorgenannten Lösungen nicht möglich sind, ist der Bau eines höhergelegenen Zusatzspeichers denkbar. Dabei wird der Zusatzspeicher über eine Pumpspeicheranlage mit dem Hauptspeicher verbunden. Im Sommer wird der Freihalteraum im Hauptspeicher durch das

Tableau 6.1. Coûts de la conversion d'une retenue à but unique à une retenue à buts multiples base 1994 (Hypothèse: 1 m³ d'eau correspond à 3 kWh).

Mesures de substitution	Coûts d'investissement en Fr. / m³ du vol. de retenue pour la protection contre les crues
Surélévation du barrage	1,5 ... 3
Retenue complémentaire communicante	3 ... 6
Aménagement complémentaire de retenue avec pompage	4,5 ... 7,5
Aménagement à accumulation complémentaire	6 ... 9
Aménagement de pompage complémentaire	6,5 ... 10
Centrale avec turbines à gaz	4,5 ... 7,5
Contrat	1,5 ... 10

Tabelle 6.1. Approximative Kosten für den Übergang vom Ein- zum Mehrzweckspeicher, Stand 1994 (Annahme: 1 m³ Wasser entspricht 3 kWh).

Ersatz - massnahme	Investitionskosten in Fr. / m³ Speichervolumen für den Hochwasserschutz
Erhöhung Talsperre	1,5 ... 3
Kommunizierender Ersatzspeicher	3 ... 6
Ergänzung mit Jahres - Pump - speicheranlage	4,5 ... 7,5
Zusätzliches Jahresspeicherwerk	6 ... 9
Zusätzliches Pumpspeicherwerk	6,5 ... 10
Gasturbinen - Kraftwerke	4,5 ... 7,5
Vertragslösung	1,5 ... 10

Au cas où les deux solutions ci-dessus ne seraient pas possibles, on peut envisager la construction d'un bassin complémentaire à un niveau plus élevé. Ce bassin sera relié au bassin existant par une station de pompage-turbinage. En été, le pompage des eaux dans le bassin supérieur permettra de maintenir un volume libre dans le bassin principal. En hiver, la chute comprise entre les deux bassins peut être utilisée pour la production d'énergie.

b) *loin de la retenue à buts multiples*
(dans le cas où les solutions de compensation présentées sous a ne seraient pas réalisables pour des raisons topographiques, économiques, environnementales ou autres)

- aménagement à accumulation saisonnière complémentaire
- aménagement du pompage-turbinage complémentaire
- centrale avec turbines à gaz
- contrat avec un tiers qui fournit la compensation à l'aide de ses aménagements

Les coûts approximatifs en francs par m³ de volume de stockage des solutions énumérées ci-dessus sont indiqués dans le tableau 6.1. Il est évident que l'on ne peut donner que des indications grossières. Elles sont toutefois suffisantes pour pouvoir juger si l'idée d'une éventuelle conversion en retenue à buts multiples – pour autant que cela soit compatible avec les impératifs de la politique énergétique – doit être poursuivie.

Les coûts élevés des solutions de remplacement sont dus au fait que la conversion en retenue à buts multiples ne concerne pas uniquement la retenue mais également le reste de l'aménagement.

Pumpen des Wassers in den höheren Speicher geschaffen. Im Winter kann die Höhendifferenz zwischen beiden Speichern bei der Schaffung der erforderlichen Installationen zur Energieerzeugung genutzt werden.

b) *abgesetzt vom Mehrzweckspeicher*
(falls die unter a aufgeführten Ersatzlösungen aus topographischen, wirtschaftlichen, umweltrelevanten oder anderen Gründen nicht realisierbar sind)

- Zusätzliches Jahresspeicherwerk
- Zusätzliches Pumpspeicherwerk
- Gasturbinen-Kraftwerk
- Vertrag mit einem Dritten, der den Ersatz mit Hilfe seiner Anlagen leistet.

In der Tabelle 6.1 sind für die erwähnten Möglichkeiten die approximativen Kosten in Franken pro m³ Speicherraum aufgelistet. Es versteht sich, dass dies nur grobe Hinweise sein können. Sie dürften allerdings ausreichen, um beurteilen zu können, ob ein allfälliger Übergang zu einem Mehrzweckspeicher – wenn energiewirtschaftlich verantwortbar – überhaupt weiterverfolgt werden soll.

Die hohen Kosten für die Ersatzlösungen entstehen, weil mit dem Übergang zu einem Mehrzweckspeicher nicht nur der Speicher, sondern das ganze Kraftwerk betroffen ist.

7. Conclusions

L'analyse – effectuée ici dans le cas du canton du Valais – a montré que la contribution apportée à la protection contre les crues par les aménagements hydro-électriques à accumulation est foncièrement importante. Dans la mesure où l'on ne change pas fondamentalement le mode d'exploitation actuel, cela reste vrai même pour les crues se produisant à fin septembre, c'est-à-dire à une époque où les retenues (saisonnières) atteignent leur degré de remplissage le plus élevé.

Lors de la crue de 1993, dont la période de retour est de l'ordre de 50 à 80 ans, les aménagements à accumulation ont tout juste permis d'éviter que le Rhône, la Viège de Zermatt et la Viège à Viège ne débordent. Leur contribution n'a toutefois pas suffi pour éviter les débordements dans la vallée de Saas supérieure, bien que le 22 septembre la retenue de Mattmark n'ait été remplie qu'à 92,6 %, ce qui, pour cette époque de l'année, correspond à un degré de remplissage inférieur à la moyenne. Ces débordements ont pour cause la capacité hydraulique insuffisante de la Viège de Saas, qui ne permet pas de maintenir sous contrôle les débits de crue lorsque la retenue déverse – ce qui s'est produit pour la première fois (de manière notable) en 1993, mais ne constitue rien d'exceptionnel en soi. En effet, les retenues des aménagements hydro-électriques ne sont pas conçues pour stocker les apports de crue. Pour éviter tout déversement et, par conséquent, tout débordement de la Viège, il aurait fallu que la retenue ne soit pas remplie à plus de 88 % en début de crue, degré de remplissage que l'on n'est normalement pas en droit d'attendre vers la fin du mois de septembre sans prendre de mesures particulières.

La crue de 1993 constituant un événement dont la période de retour n'est que de 50 à 80 ans, on constate par ailleurs que l'occurrence d'une crue ayant une période de retour de 100 ans pourrait également provoquer des débordements dans la vallée de Zermatt, à Viège et dans la plaine du Rhône si le degré de remplissage des retenues n'est pas sensiblement inférieur à celui de 1993. Des débordements pourraient aussi se produire en cas de crues moins violentes si les retenues devaient être plus fortement remplies qu'en 1993 ou si la dérivation des eaux de la vallée de Zermatt vers le val des Dix devait être interrompue suite à un incident technique ou en raison des impératifs d'exploitation de Grande Dixence (respect de la consigne de manœuvre des vannes).

Le degré de remplissage constitue le paramètre déterminant. Plus il est faible, plus on pourra stocker d'eau et plus on réduira l'ampleur de la crue à l'aval, et cela sans intervention humaine, c'est-à-dire de manière passive.

Dans une retenue saisonnière, le degré de remplissage croît progressivement du printemps à l'automne et atteint son maximum vers fin septembre; son effet sur les crues diminue en conséquence.

Le degré de remplissage à une date donnée, et en particulier en septembre, dépend des conditions hydrologiques, des conditions régnant sur le marché de l'énergie et de la situation économique générale. Il s'agit donc d'une grandeur stochastique. La date d'occurrence des crues et leur importance sont aussi des grandeurs aléatoires. Par conséquent, si l'on ne prend pas de dispositions particulières, l'effet d'une retenue sera également aléatoire, c'est-à-dire tantôt fort, tantôt faible.

Il ressort de ce qui précède que les reproches adressés aux sociétés de forces motrices lorsque des débordements se produisent à l'aval des barrages sont dénués de

7. Schlussfolgerungen

Die Analyse des Beitrags der Speicherkraftwerke an den Hochwasserschutz – hier am Beispiel des Kantons Wallis – zeigt, dass er grundsätzlich erheblich ist. Dies gilt, solange die bisherige Art der Bewirtschaftung nicht fundamental geändert wird, selbst für Hochwässer, die gegen Ende September, d. h. zu einem Zeitpunkt da die (Jahres)-Speicher ihren höchsten Füllungsgrad erreichen, auftreten.

Während des Hochwassers 1993 – einem etwa 50- bis 80jährlichen Ereignis – reichte die Wirkung der Speicherkraftwerke im Wallis gerade aus, um Ausuferungen der Rhone, der Matter Vispa und der Vispa bei Visp zu verhindern. Sie genügte aber nicht, um Ausuferungen im oberen Saastal zu verhindern, und dies trotz dem Tatbestand, dass der Speicher Mattmark am 22. September mit 92,6 % für die Jahreszeit unterdurchschnittlich gefüllt war. Der Grund ist, dass die Abflusskapazität der Saaser Vispa zu klein ist, um Hochwässer beherrschen zu können, wenn beim Speicher Hochwasserüberlauf auftritt – was 1993 erstmals in erheblichem Ausmass geschah und an sich nichts Aussergewöhnliches ist. Die Kraftwerkspeicher sind nicht darauf ausgelegt, ihnen zufliessende Hochwässer zurückzuhalten. Ein Überlauf und damit Ausuferungen hätten nur vermieden werden können, wenn der Speicher höchstens zu 88 %, also zu einem Prozentsatz gefüllt gewesen wäre, mit dem gegen Ende September normalerweise, d. h. ohne besondere Vorkehrungen, nicht gerechnet werden kann.

Weil das Hochwasser 1993 nur etwa ein 50- bis 80jährliches Ereignis war, zeigt sich ferner, dass es im Falle eines 100jährlichen Hochwassers auch im Mattertal, bei Visp und im Rhonetal zu Ausuferungen kommen könnte, wenn der Füllungsgrad der Speicher nicht erheblich niedriger als 1993 ist. Ausuferungen könnten auch bei kleineren Hochwässern auftreten, wenn die Speicher stärker als 1993 gefüllt sind oder die Wasserüberleitung vom Mattertal ins Val des Dix ausfällt (Panne) oder eingestellt werden muss (Befolgung des Wehrreglements).

Der Füllungsgrad ist die dominante Einflussgrösse. Je kleiner er ist, um so mehr Wasser wird im Hochwasserfall im Speicher zurückgehalten und um so stärker beeinflusst er das Hochwasser, und dies ohne menschliche Einwirkungen, d. h. passiv.

Bei einem Jahresspeicher nimmt der Füllungsgrad vom Frühling bis zum Herbst fortlaufend zu und erreicht seinen höchsten Wert etwa Ende September. Entsprechend nimmt die Wirkung auf Hochwässer ab.

Wie hoch der Füllungsgrad zu einem beliebigen Zeitpunkt und insbesondere im September ist, hängt von den hydrologischen Verhältnissen sowie von energie- und marktwirtschaftlichen Gegebenheiten ab. Er ist somit eine stochastische Grösse. Ebenso zufällig sind der Auftretenszeitpunkt und die Grösse eines Hochwassers. Ohne besondere Vorkehrungen ist folglich auch das Ausmass der Wirkung eines Speichers zufällig, d. h. einmal grösser und einmal kleiner.

Angesichts dieser Sachlage ist es nicht gerechtfertigt, den Kraftwerksgesellschaften Vorwürfe zu machen, wenn es unterhalb von Speichern zu Ausuferungen kommt. Schuld daran ist nicht das Kraftwerk, sondern die ungenügende Abflusskapazität des Gewässers. Dagegen muss Abhilfe geschaffen werden. Im Vordergrund stehen die klassischen flussbaulichen Massnahmen. Es besteht (ergänzend) auch die Möglichkeit, gegen Entschädigung die Speicherkraftwerke in den Dienst des Hochwasserschutzes zu stellen, wenn dies energiewirtschaftlich verantwortbar und billiger ist. Zur Verwirklichung stehen den Kantonen die vertragliche Vereinbarung oder die Änderung der Wasserrechtskonzession zur

fondement. C'est la capacité hydraulique insuffisante des cours d'eau et non pas les aménagements hydro-électriques qui sont responsables des débordements. Il importe de prendre des mesures. En premier lieu, il faut envisager les mesures classiques de correction des cours d'eau. A titre subsidiaire, on peut également, et contre indemnisation, recourir aux aménagements hydro-électriques à accumulation et les mettre au service de la protection contre les crues dans les cas où les considérations de politique énergétique le permettent et où cela constitue une solution plus économique. Dans ces cas-ci, les cantons peuvent soit négocier un accord revêtant la forme d'un contrat, soit chercher à modifier la concession de droit d'eau lorsqu'il n'est pas possible de conclure un tel accord. Toutefois, dans ce dernier cas, les autorités de recours compétentes en matière de forces hydrauliques sont le Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie, la commission de recours en matière d'économie des eaux et, le cas échéant, le Tribunal fédéral.

Lorsqu'un événement pluvieux majeur est annoncé, l'effet naturel d'une retenue peut être renforcé par des lâchures préventives effectuées dans le but d'en augmenter le creux. Toutefois, pour que l'opération soit couronnée de succès, il faut que l'événement annoncé se produise effectivement, ce qui implique l'existence d'un modèle fiable pour la prévision quantitative des précipitations[22]. Si la crue ne se produit pas ou si son ampleur est inférieure aux prévisions, la société de forces motrices perdra un certain volume d'eau pour lequel elle devra être indemnisée. Si, au contraire, une crue survient sans avoir été annoncée du tout ou sans avoir été annoncée à temps, l'amélioration escomptée ne sera pas obtenue. La régulation de la retenue constitue donc une stratégie comportant des risques importants. De plus, cette régulation, lorsqu'elle n'est pas interrompue à temps, présente aussi l'inconvénient de souvent faire empirer la crue. Le régime de la retenue doit donc constamment être contrôlé. Il faut disposer pour cela de données en temps réel et de moyens hautement fiables pour leur télétransmission. Le réseau téléphonique public ne remplit pas cette condition.

Un moyen plus sûr et plus simple que la régulation (active) de la retenue consiste à passer de la gestion à but unique de la retenue à une gestion à buts multiples, en affectant une partie du volume utile à la production d'énergie et l'autre à la maîtrise des crues. Une telle gestion permet de garantir que le degré de remplissage ne dépasse jamais une valeur donnée (en exploitation normale) et que l'effet souhaité sur la crue soit assuré en tout temps, et en particulier à fin septembre. Ce scénario ne nécessite aucune prise de décision et aucune action: l'effet s'obtient automatiquement, c'est-à-dire passivement. Il ne présente par conséquent aucun risque. Cette solution n'est toutefois pas bon marché, étant donné qu'elle entrave de manière permanente l'exploitation de l'aménagement et donne lieu à une compensation réelle des pertes de production.

En principe, le rapport bénéfices/coûts des mesures de protection contre les crues est le plus élevé lorsque ces mesures sont prises là où la protection est requise. On s'efforce donc d'aménager les bassins de rétention de crues le plus près possible du tronçon de cours d'eau dont il faut réduire le débit. Plus la distance croît, plus l'effet du bassin versant intermédiaire compris entre la retenue et la région à protéger devient prépondérant. Vu sous cet angle, la

[22] ...qui soit notamment en état de prévoir le débordement par-dessus la crête des Alpes d'une situation de barrage par advection du sud.

Verfügung, wenn keine Vereinbarung erzielt werden kann. Zuständig ist in diesem Fall allerdings die Rechtsmittelbehörde auf dem Gebiet der Wasserkraftnutzung, d.h. das Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, die Rekurskommission für Wasserwirtschaft und allenfalls das Bundesgericht.

Die Verbesserung der natürlichen Wirkung eines Speichers kann dadurch erreicht werden, dass eine gewisse Zeit vor einem erwarteten Starkniederschlagsereignis Wasser aus dem Speicher abgelassen und so der aktuelle Füllungsgrad verkleinert wird. Erfolgreich wird man allerdings nur sein, wenn das erwartete Ereignis auch tatsächlich eintritt, d.h. wenn man über ein zuverlässiges quantitatives Prognosemodell verfügt[22]. Tritt das Hochwasser nicht oder nicht in der erwarteten Stärke ein, wird der Kraftwerksgesellschaft ein Wasservolumen entzogen, das entschädigt werden muss. Wird handkehrum ein Hochwasser nicht oder nicht rechtzeitig erkannt, wird die erwartete Verbesserung nicht erreicht. Die Speicherregulierung ist folglich eine recht risikobehaftete Strategie. Nachteilig ist auch, dass mit der Speicherregulierung oft eine Verschlechterung des Abflusses erreicht wird, wenn die Regulierung nicht rechtzeitig eingestellt wird. Das Seeregime muss deshalb laufend verfolgt werden. Dies erfordert Echtzeitdaten und Mittel zu ihrer Fernübertragung, die in hohem Mass unverletzlich sind. Das öffentliche Telefonnetz erfüllt diese Anforderung nicht.

Verlässlicher und einfacher als die (aktive) Speicherregulierung ist der Übergang vom Ein- zum Mehrzweckspeicher, d.h. die Aufteilung des Nutzvolumens des Speichers auf die Wasserkraftnutzung und den Hochwasserschutz. Damit wird sichergestellt, dass der Füllungsgrad einen festgelegten Wert nie überschreitet und die gewünschte Wirkung des Speichers auf das Hochwasser jederzeit, also auch Ende September, garantiert ist. Es braucht dieses Szenarium weder Entscheide noch Handlungen: Die Wirkung wird selbsttätig, also passiv, erzeugt. Es besteht folglich auch kein Risiko. Die Lösung ist allerdings nicht billig, weil sie die Nutzungsmöglichkeiten des Kraftwerks dauernd einschränkt und real ersetzt werden muss.

Ganz allgemein gilt, dass bezüglich des Hochwasserschutzes das Kosten/Nutzen-Verhältnis in der Regel dann am besten ausfällt, wenn die Schutzmassnahme dort vorgenommen wird, wo der Schutz benötigt wird. Hochwasserrückhaltebecken werden deshalb wenn immer möglich nahe des zu entlastenden Gewässerabschnitts angeordnet. Mit zunehmender Entfernung wird das Zwischeneinzugsgebiet zwischen dem Speicher und dem zu schützenden Gebiet anteilmässig immer dominanter. Von dieser Warte betrachtet, dürfte der Einsatz von Kraftwerkspeichern zugunsten des Hochwasserschutzes nur ausnahmsweise eine geeignete Alternative zu klassischen Schutzmassnahmen darstellen. Eine verbindliche Auskunft vermag nur ein Variantenvergleich zu geben.

Auf das Turbinieren während Hochwässern sollte in der Regel verzichtet werden, weil unterhalb der Wasserrückgabe die Abflusswassermenge vergrössert wird. Nützlich ist es nur in jenen Fällen, wo dank der Abflussreduktion zwischen dem Speicher und der Wasserrückgabe Ausuferungen oder der Geschiebetransport vorteilhaft beeinflusst werden (wie z.B. unterhalb der Speicher Mattmark und Ferden). Es besteht auch keine Gewähr, dass das Turbinieren auch tatsächlich möglich ist. Eine Panne, wie sie 1993 bei den Kraftwerken Mattmark aufgetreten ist (Zerstörung des

[22] ...das insbesondere auch das Ausmass des Überschwappens einer südlichen Staulage über den Alpenkamm vorherzusagen vermag.

mise à contribution des retenues hydro-électriques ne constitue que rarement une alternative valable aux méthodes de protection traditionnelles. Seule une comparaison de variantes permet d'apporter une réponse définitive à cette question.

En règle générale, il faudrait renoncer à turbiner lors des crues, car cela a pour effet d'augmenter le débit à l'aval du point de restitution. On obtient un effet positif uniquement lorsque la réduction du débit sur le tronçon compris entre la retenue et la restitution permet d'y éviter les débordements ou d'y influencer favorablement les transports solides (comme par exemple à l'aval des retenues de Mattmark et de Ferden). De plus, il n'est pas sûr que l'on puisse effectivement opérer des turbinages, ceux-ci pouvant être entravés aussi bien par une panne, comme cela s'est produit en 1993 à Mattmark (destruction d'un câble de signalisation), que par l'impossibilité d'écouler l'énergie produite par le réseau de transmission. Il serait donc imprudent de se fier à l'effet du turbinage.

Une adduction diminue le débit du cours d'eau à l'aval de la prise d'eau. En revanche, elle a pour effet d'accélérer le remplissage de la retenue. Celle-ci atteint donc plus rapidement la cote normale de retenue, après quoi le débit augmente sur le tronçon compris entre la retenue et le confluent du cours d'eau dont les eaux sont dérivées. En cas de crue, il n'est par conséquent judicieux de faire fonctionner une adduction que dans la mesure où les avantages qui en résultent dans la vallée du cours d'eau dérivé priment sur les inconvénients dans la vallée où est située la retenue. Il ne faut toutefois pas perdre de vue qu'il n'existe aucune garantie de pouvoir dériver les eaux dans la retenue le cas échéant. Une défaillance technique ou la consigne de manœuvre des vannes peut rendre cette dérivation impossible. Il serait donc imprudent de se fier à l'effet des adductions.

En Valais, la restitution des eaux de l'aménagement de Mauvoisin est problématique, car elle a lieu en dehors de l'émissaire direct de la retenue et, de plus, sur un tronçon particulièrement critique. Il serait indiqué de limiter le turbinage, comme indiqué dans la figure 7.1 par exemple[23]. La restitution des eaux de Grande Dixence est également problématique, d'une part parce que le débit équipé, qui actuellement est déjà de 45 m³/s, passera à 120 m³/s dans un proche avenir, et d'autre part, parce qu'en raison de la consigne de manœuvre des vannes de la retenue de la Grande Dixence, il est possible que la dérivation des eaux de la vallée de Zermatt ne puisse être assurée que si Grande Dixence turbine.

Lors des crues, il serait par conséquent judicieux que la «cellule catastrophe» du canton soit renforcée par des représentants des sociétés de forces motrices, afin de coordonner l'exploitation des turbines, des pompes et des adductions. Toutefois, pour qu'un tel renforcement soit efficace, il est essentiel de disposer en temps réel des données concernant les précipitations, les débits et l'exploitation des aménagements hydro-électriques, même en situation de précipitations et de débits exceptionnels, c'est-à-dire lorsque le réseau téléphonique public est vraisemblablement hors service.

En conclusion, on peut donc retenir ceci:

1. Les aménagements hydro-électriques à accumulation sont libres d'exploiter leurs retenues dans les limites de leur concession. Ils ne sont pas tenus d'adapter leur exploitation aux impératifs de la protection contre les crues

[23] Ceci est également vrai pour Electricité de la Lienne S.A. et Electricité d'Emosson S.A.

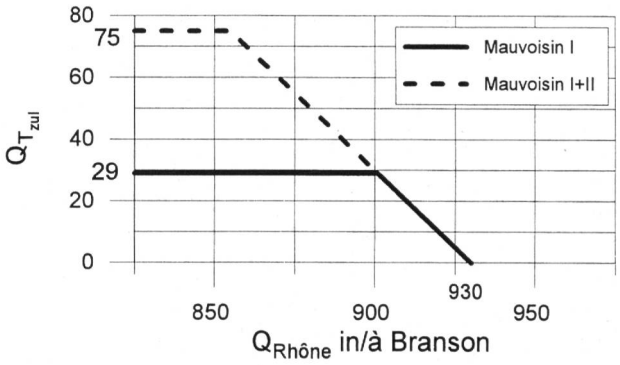


Fig. 7.1. Aménagement de Mauvoisin – limitation appropriée du turbinage lors de crues.

Bild 7.1. Kraftwerk Mauvoisin – angemessene Begrenzung des Turbinenbetriebs während Hochwässern.

Signalkabels), kann dies ebenso verhindern wie die Unmöglichkeit, die produzierte Energie in das Übertragungsnetz einzuspeisen. Es wäre deshalb unvorsichtig, sich auf die Wirkung des Turbinierens verlassen zu wollen.

Eine Wasserüberleitung entlastet den Vorfluter unterhalb der Nebenfassung. Im Speicher beschleunigt sie jedoch den Füllprozess. Das Stauziel wird damit früher erreicht und der Abfluss im Vorfluter vergrössert und dies bis zum Zusammenfluss mit dem Vorfluter der Nebenfassung. Eine Wasserüberleitung im Hochwasserfall ist folglich nur sinnvoll, wenn die Vorteile im Tal der Nebenfassung grösser sind als die Nachteile im Tal des Speichers. Man muss sich aber auch bewusst sein, dass keine Gewähr besteht, eine Wasserüberleitung auch tatsächlich zu betreiben. Eine technische Panne oder das Wehrreglement des Speichers können dies verunmöglichen. Es wäre deshalb unvorsichtig, sich auf die Wirkung einer Wasserüberleitung verlassen zu wollen.

Kritisch ist im Wallis die Wasserrückgabe der Kraftwerke Mauvoisin, weil sie ausserhalb des Vorfluters des Speichers und erst noch in einen besonders kritischen Gewässerabschnitt erfolgt. Eine Einschränkung des Turbinenbetriebs z.B. gemäss Bild 7.1 wäre angezeigt[23]. Auch die Wasserrückgabe der Kraftwerke Grande Dixence ist nicht ohne Probleme, weil die Abflusskapazität bereits heute 45 m³/s beträgt und in naher Zukunft auf 120 m³/s ansteigen wird und weil die Wasserableitung aus dem Mattertal wegen des Wehrreglements des Speichers Grande Dixence unter Umständen nur aufrechterhalten werden kann, wenn turbiniert wird.

Angezeigt wäre es deshalb, wenn die kantonale «Katastrophenzelle» während Hochwässern mit Vertretern der Kraftwerksgesellschaft verstärkt würde, um den Einsatz von Turbinen, Pumpen und Wasserüberleitungen zu steuern. Wirksam kann diese Verstärkung aber nur werden, wenn sie über Echtzeitinformationen hinsichtlich des Niederschlags, des Abflusses und des Betriebszustands der Kraftwerke verfügt, und dies auch bei extremen Niederschlags- und Abflussverhältnissen, d.h. dann, wenn das öffentliche Telefonnetz wahrscheinlich ausgefallen ist.

Ganz allgemein kann abschliessend festgehalten werden:

1. Die Speicherkraftwerke können ihre Anlagen im Rahmen der Konzession frei bewirtschaften. Sie sind (wenn die Konzession diesbezüglich nichts festlegt) nicht verpflichtet, ihren Betrieb auf die Bedürfnisse des Hochwasserschutzes auszurichten. Dieser Schutz obliegt den Kantonen.

[23] Gleiches gilt für die Electricité de la Lienne S.A. und die Electricité d'Emosson S.A.

si la concession ne stipule rien à ce sujet. La protection contre les crues incombe au canton.

2. En cas de crue, les aménagements hydro-électriques à accumulation contribuent toujours à l'atténuation de celle-ci. L'importance de cette contribution dépend d'un grand nombre de paramètres et revêt un caractère aléatoire. On ne peut pas garantir un effet précis.
3. Les aménagements hydro-électriques à accumulation peuvent, contre indemnisation intégrale, être affectés à la protection contre les crues, soit par accord contractuel, soit en modifiant la concession de droit d'eau lorsqu'il n'est pas possible d'aboutir à un tel accord. La protection contre les crues peut alors être réalisée de deux manières: soit par la régulation de la retenue, soit par une conversion en retenue à buts multiples, la deuxième solution ne comportant aucun risque, ce qui n'est pas le cas pour la première. Toutefois, l'affectation des aménagements hydro-électriques à accumulation à la protection contre les crues ne constitue une solution judicieuse que s'il est impossible de mettre en œuvre des mesures de correction des cours d'eau ou si celles-ci ne sont pas réalisables à moindres frais.

2. Die Speicherkraftwerke leisten im Hochwasserfall immer einen Beitrag an den Hochwasserschutz. Das Ausmass ist jedoch von vielen Einflussgrössen abhängig und hat Zufallscharakter. Mit einer bestimmten Wirkung darf nicht gerechnet werden.
3. Die Speicherkraftwerke können von den Kantonen gegen volle Entschädigung in den Dienst des Hochwasserschutzes gestellt werden, und dies entweder mittels vertraglicher Vereinbarung oder Änderung der Wasserrechtskonzession, wenn keine Vereinbarung erzielt werden kann. Es gibt dabei zwei Möglichkeiten: die Speicherregulierung und der Übergang vom Ein- zum Mehrzweckspeicher, wobei letzteres im Gegensatz zu ersterem keine Risiken beinhaltet. Sinnvoll ist der Einbezug der Speicherkraftwerke in den Hochwasserschutz allerdings nur, wenn der Schutz mit flussbaulichen Massnahmen nicht oder nicht billiger realisierbar ist.

Appendice: détermination du débit de pointe en un point quelconque à l'aval d'une retenue

A l'aval d'une retenue, le débit résiduel au point X du cours d'eau atteint en général son maximum à peu près au moment où l'aurait atteint le débit naturel de crue non influencé (temps T^*). Si la retenue déverse, le débit de pointe dans la zone aval rapprochée ne se produira qu'au moment où les déversements auront atteint leur maximum (temps T^{**}).

Temps T^*

Au temps T^*, le débit résiduel au point X du cours d'eau (fig. A 1)

$Q'_{AX}(T^*)$

correspond au débit naturel Q_{AX} au point X, auquel on a retranché les apports Q_R stockés dans la retenue au temps T^*. A cet instant, le débit atteint par définition sa valeur maximale (fig. A 2). On a donc

$$Q'_{AX}(T^*) = Q_{AXmax} - Q_R(T^*)$$

ou, si la retenue reçoit encore des eaux dérivées d'un autre bassin versant (Q_{Trans})

$$Q'_{AX}(T^*) = [Q_{AXmax} + Q_{Trans}(T^*)] - Q_R(T^*)$$

Pour estimer le débit de pointe naturel au point X, on peut utiliser la formule

$$Q_{AXmax} = q \cdot E = \alpha_X \cdot \sqrt{E_X}$$

où $q = \alpha \cdot E^{-1/2}$ = débit spécifique de pointe naturel de l'onde de crue [m³/s · km²]

E = superficie du bassin versant [km²]

si l'on dispose d'une valeur α plus ou moins sûre pour le point X du cours d'eau.

Temps T^{**}

Etant donné qu'à cet instant le débit au droit du barrage (point 0 du cours d'eau) est égal au débit maximum

Q'_{A0max}

(fig. A 2) et que le débit stocké est nul, le débit résiduel au point X doit se composer du débit Q'_{A0} provenant de la re-

Anhang: Ermittlung des Spitzenabflusses an einer beliebigen Stelle unterhalb eines Speichers

Der Restabfluss an der Gewässerstelle X unterhalb eines Speichers erreicht sein Maximum in der Regel etwa zum selben Zeitpunkt, da der grösste unbeeinflusste, d.h. natürliche, Hochwasserabfluss aufgetreten wäre (Zeitpunkt T^*). Herrscht beim Speicher Überlauf, wird der Spitzenabfluss in der Nähe des Speichers allerdings erst zum Zeitpunkt des grössten Abflusses aus dem Speicher erreicht (Zeitpunkt T^{**}).

Zeitpunkt T^*

Der Restabfluss zum Zeitpunkt T^* an der Gewässerstelle X (Bild A 1)

$Q'_{AX}(T^*)$

entspricht dem natürlichen Abfluss Q_{AX} an der Stelle X vermindert um den Wasserrückhalt Q_R im Speicher zum Zeitpunkt T^*. Zu diesem Zeitpunkt besitzt der Abfluss definitionsgemäss seinen grössten Wert (Bild A 2). Es gilt somit

$$Q'_{AX}(T^*) = Q_{AXmax} - Q_R(T^*)$$

respektive

$$Q'_{AX}(T^*) = [Q_{AXmax} + Q_{Trans}(T^*)] - Q_R(T^*)$$

wenn dem Speicher auch Wasser aus einem anderen Einzugsgebiet zugeleitet wird (Q_{Trans}).

Zur Abschätzung des natürlichen Spitzenabflusses an der Stelle X kann die Beziehung

$$Q_{AXmax} = q \cdot E = \alpha_X \cdot \sqrt{E_X}$$

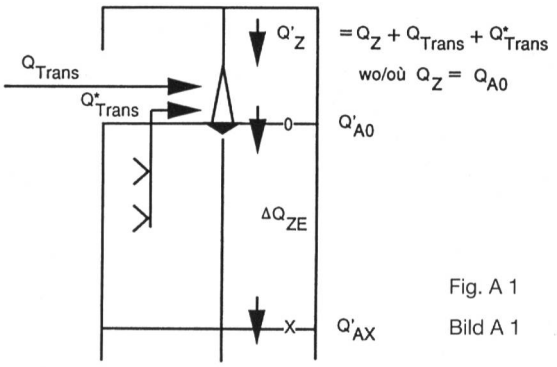
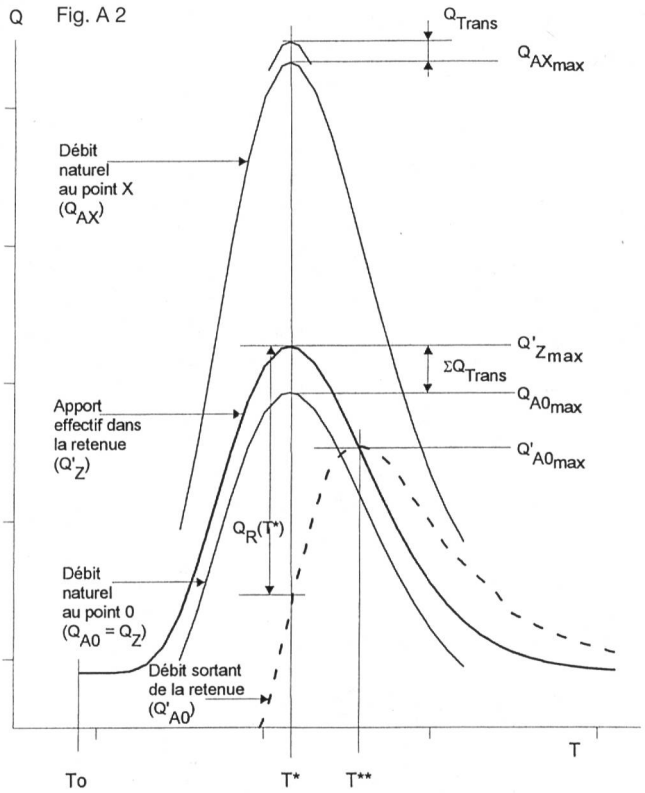
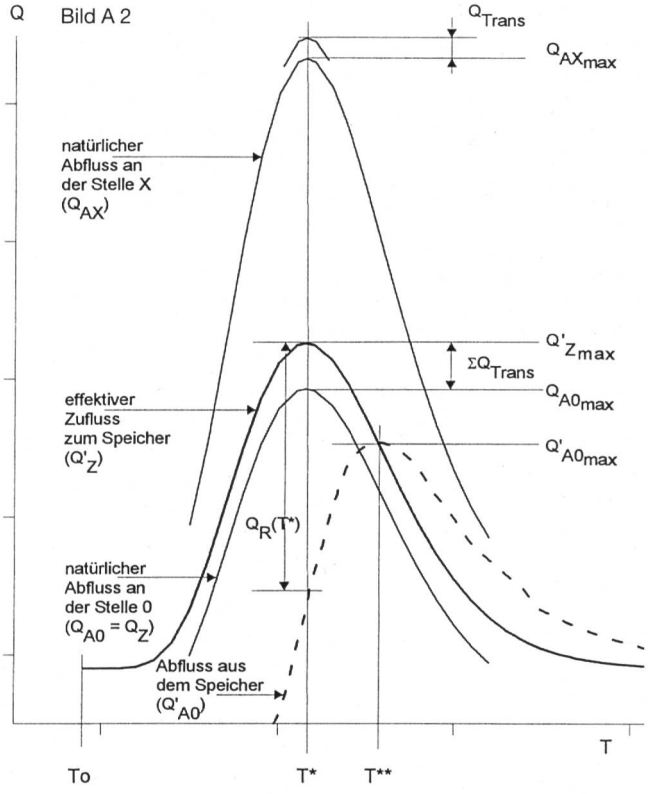


Fig. A 1
Bild A 1





tenue et des apports ΔQ_{ZE} du bassin versant intermédiaire compris entre le barrage et le point X:

$Q'_{AX} = Q'_{A0} + \Delta Q_{ZE}$

Les apports ΔQ_{ZE} correspondent à la différence des débits naturels au point 0 et au point X, à laquelle il faut encore, le cas échéant, retrancher le débit dérivé du bassin versant intermédiaire Q^*_{Trans}

$\Delta Q_{ZE} = (Q_{AX} - Q_{A0}) - Q^*_{Trans}$

En admettant que les hydrogrammes des débits naturels aux points 0 et X sont dans un rapport d'affinité, on obtient la relation suivante pour ΔQ_{ZE}:

$\Delta Q_{ZE} = (Q'_Z - \Sigma Q_{Trans})(K - 1) - Q^*_{Trans}$

où $\Sigma Q_{Trans} = Q_{Trans} + Q^*_{Trans}$

$Q'_Z = Q_Z + \Sigma Q_{Trans}$ = apports effectifs de la retenue

$$K = \frac{Q_{AXmax}}{Q_{A0max}} = \frac{\alpha_X \sqrt{E_X}}{\alpha_0 \sqrt{E_0}} \cong \frac{\sqrt{E_X}}{\sqrt{E_0}}$$

et finalement on obtient la relation générale suivante pour le débit résiduel au point X

$Q'_{AX} = (Q_Z - \Sigma Q_{Trans})(K - 1) - Q^*_{Trans} + Q'_{A0}$

En posant $Q'_Z\ (T^{**}) = Q'_{AXmax}$

$Q'_{A0}\ (T^{**}) = Q'_{A0max}$

on obtient finalement pour le temps T^{**} l'expression

$Q'_{AX}\ (T^{**}) = (Q'_{A0max} - \Sigma Q_{Trans})(K - 1) - Q^*_{Trans} + Q'_{A0max}$

wo $q = \alpha \cdot E^{-1/2}$ = natürlicher spezifischer Spitzenabfluss der Hochwasserwelle [m³/s · km²]

E = Grösse des Einzugsgebiets [km²]

verwendet werden, sofern für die Gewässerstelle X ein einigermassen zuverlässiger α-Wert verfügbar ist.

Zeitpunkt T^{**}

Weil zu diesem Zeitpunkt beim Speicher (Gewässerstelle 0) der maximale Abfluss

Q'_{A0max}

abfliesst (Bild A 2) und der Wasserrückhalt gleich Null ist, muss der Restabfluss an der Gewässerstelle X aus dem Abfluss Q'_{A0} aus dem Speicher und dem Wasseraufkommen ΔQ_{ZE} aus dem Zwischeneinzugsgebiet zwischen dem Speicher und der Gewässerstelle X zusammengesetzt werden:

$Q'_{AX} = Q'_{A0} + \Delta Q_{ZE}$

Das Wasseraufkommen ΔQ_{ZE} entspricht der Differenz der natürlichen Abflüsse an den Stellen 0 und X vermindert um eine allfällig aus dem Zwischeneinzugsgebiet abgeleitete Wassermenge Q^*_{Trans}

$\Delta Q_{ZE} = (Q_{AX} - Q_{A0}) - Q^*_{Trans}$

Setzt man voraus, die Ganglinien der natürlichen Abflüsse an den Stellen 0 und X seien affin, findet man für ΔQ_{ZE} die Beziehung

$\Delta Q_{ZE} = (Q'_Z - \Sigma Q_{Trans})(K - 1) - Q^*_{Trans}$

wo $\Sigma Q_{Trans} = Q_{Trans} + Q^*_{Trans}$

$Q'_Z = Q_Z + \Sigma Q_{Trans}$ = effektiver Zufluss zum Speicher

$$K = \frac{Q_{AXmax}}{Q_{A0max}} = \frac{\alpha_X \sqrt{E_X}}{\alpha_0 \sqrt{E_0}} \cong \frac{\sqrt{E_X}}{\sqrt{E_0}}$$

und schliesslich für den Restabfluss an der Stelle X ganz allgemein

$Q'_{AX} = (Q'_Z - \Sigma Q_{Trans})(K - 1) - Q^*_{Trans} + Q'_{A0}$

Mit $Q'_Z\ (T^{**}) = Q'_{AXmax}$

$Q'_{A0}\ (T^{**}) = Q'_{A0max}$

resultiert für den Zeitpunkt T^{**} die Beziehung

$Q'_{AX}\ (T^{**}) = (Q'_{A0max} - \Sigma Q_{Trans})(K - 1) - Q^*_{Trans} + Q'_{A0max}$

Registre des barrages suisses soumis au règlement fédéral
Talsperren, die der Oberaufsicht des Bundes unterstellt sind
Sbarramenti idrici sottomessi alla sorveglianza della Confederazione
Register of Swiss dams under federal legislation

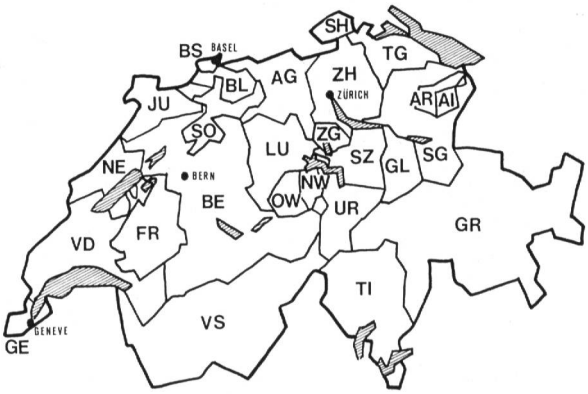
Nom	Fin de construction	Transformation	Canton	Type	Hauteur m	Longueur m	Retenue Niveau normal m s. m.	Retenue Volume total mio m³	Carte	But
Grande Dixence	1961		VS	PG	285,0	695,0	2364,00	401,000	C 4	H
Mauvoisin	1957	1991	VS	VA	250,0	520,0	1975,00	211,500	C 5	H
Luzzone	1963	1998	TI	VA	225,0	510,0	1606,00	108,000	F 3	H
Contra	1965		TI	VA	220,0	380,0	470,00	105,000	F 4	H
Emosson	1974		VS	VA	180,0	555,0	1930,00	227,000	C 4	H
Zeuzier	1957		VS	VA	156,0	256,0	1777,00	51,000	C 4	H
Göscheneralp	1960		UR	ER	155,0	540,0	1792,00	76,000	E 3	H
Curnera	1966		GR	VA	153,0	350,0	1956,00	41,100	E 3	H
Zervreila	1957		GR	VA	151,0	504,0	1862,00	100,500	F 3	H
Moiry	1958		VS	VA	148,0	610,0	2249,00	78,000	D 4	H
Gigerwald	1976		SG	VA	147,0	430,0	1335,00	35,600	F 3	H
Limmern	1963		GL	VA	146,0	375,0	1857,00	93,000	F 3	H
Valle di Lei	1961		GR	VA	141,0	690,0	1931,00	200,000	G 4	H
Punt dal Gall	1968		GR	VA	130,0	540,0	1804,70	164,600	H 3	H
Sambuco	1956		TI	VA	130,0	363,0	1461,00	63,000	E 4	H
Nalps	1962		GR	VA	127,0	480,0	1908,00	45,000	F 3	H
Hongrin Nord	1969		VD	VA	125,0	325,0	1255,00	53,200	C 4	H
Gebidem	1967		VS	VA	122,0	237,0	1437,00	9,200	D 4	H
Mattmark	1967		VS	TE	120,0	780,0	2197,00	101,000	D 5	H
Santa Maria	1968		GR	VA	117,0	560,0	1908,00	67,300	F 3	H
Albigna	1959		GR	PG	115,0	759,0	2162,60	71,000	G 4	H
Spitallamm (Grimsel)	1932		BE	VA	114,0	258,0	1908,74	101,000	E 3	H
Cavagnoli	1968		TI	VA	111,0	320,0	2310,00	29,000	E 4	H
Schräh (Wägital)	1924		SZ	PG	111,0	150,0	900,00	150,000	F 2	H
Oberaar	1953		BE	PG	100,0	526,0	2303,00	61,000	E 3	H
Räterichsboden	1950		BE	PG	94,0	456,0	1767,00	27,000	E 3	H
Malvaglia	1959		TI	VA	92,0	292,0	990,00	4,600	F 4	H
Marmorera (Castiletto)	1954		GR	TE	91,0	400,0	1680,00	62,600	G 3	H
Hongrin Sud	1969		VD	VA	90,0	272,0	1255,00	53,200	C 4	H
Cleuson	1950		VS	PG	87,0	420,0	2186,00	20,000	C 4	H
Les Toules	1963		VS	VA	86,0	460,0	1810,00	20,150	C 5	H
Rossens	1947		FR	VA	83,0	320,0	677,00	220,000	C 3	H
Naret I	1970		TI	VA	80,0	440,0	2310,00	31,600	E 4	H
Mapragg	1976		SG	PG	75,0	132,0	865,00	5,300	G 2	H
Châtelot	1953		NE	VA	74,0	150,0	716,00	20,600	B 2	H
Z'Mutt	1964		VS	VA	74,0	144,0	1970,00	0,850	D 5	H
Lucendro	1947		TI	CB	73,0	269,0	2134,50	25,000	E 3	H
Ova Spin	1968		GR	VA	73,0	130,0	1630,00	7,400	H 3	H
Palagnedra	1952		TI	PG	72,0	120,0	486,00	4,260	E 4	H
Vasasca	1967		TI	VA	69,0	107,0	728,00	0,400	E 4	H
Robiei	1967		TI	PG	68,0	360,0	1940,00	6,700	E 4	H
Roggiasca	1965		GR	VA	68,0	177,0	954,30	0,520	F 4	H
Ferden	1975		VS	VA	67,0	126,0	1311,00	1,890	D 4	H
Bärenburg	1961		GR	PG	64,0	110,0	1080,00	1,400	G 3	H
Solis	1986		GR	VA	61,0	75,0	823,75	4,070	G 3	H
Gries	1965		VS	PG	60,0	400,0	2386,50	18,600	E 4	H
Sufers	1962		GR	VA	58,0	125,0	1401,00	21,400	F 3	H
Montsalvens	1920		FR	VA	55,0	115,0	800,80	12,600	C 3	H
Molina	1951	1984	GR	PG	54,0	93,0	686,75	0,810	F 4	H
Panix	1989		GR	PG	53,0	270,0	1450,00	7,260	F 3	H
Salanfe	1952		VS	PG	52,0	616,0	1925,00	40,000	C 4	H
St-Barthélemy C	1984		VS	VA	51,0	54,0	685,00	0,500	C 4	C
Illgraben	1970		VS	PG	50,0	64,0	1050,00		D 4	C
Schiffenen	1963		FR	VA	47,0	417,0	532,00	65,000	C 3	H
Isola	1960		GR	VA	45,0	290,0	1604,00	6,500	F 4	H
Naret II	1970		TI	PG	45,0	260,0	2310,00	31,600	E 4	H
St-Barthélemy B	1975		VS	VA	45,0	93,0	1003,00	0,150	C 4	C
Vieux-Emosson	1955		VS	VA	45,0	170,0	2205,00	13,800	C 4	H
Zervreila Ausgleichbecken	1957		GR	ER	44,0	70,0	1734,80	0,100	F 3	H

Name	Fertig-stellung	Umbau	Kanton	Typ	Höhe	Länge	Stausee		Karte	Zweck
							Stauziel	Seeinhalt		
					m	m	m ü. M.	Mio m³		
Garichte Hauptmauer	1931		GL	PG	42,0	230,0	1623,35	3,290	F 2	H
Orden	1971		GR	VA	42,0	171,0	1786,50	1,670	G 4	C
Sanetsch	1965		VS	PG	42,0	215,0	2034,00	2,800	C 4	H
Seeuferegg (Grimsel)	1932		BE	PG	42,0	352,0	1908,74	101,000	E 3	H
Carmena	1969		TI	VA	40,0	100,0	636,50	0,300	F 4	H
Egschi	1949		GR	PG	40,0	80,0	1148,00	0,400	F 3	H
Carassina	1963		TI	VA	39,0	115,0	1701,00	0,310	F 3	H
Bannalp	1937	1976	NW	TE	37,0	235,0	1586,80	1,700	E 3	H
Punteglias	1973	1997	GR	TE	37,0	270,0	975,30	0,160	F 3	C
Göschenerreuss	1949		UR	PG	36,0	70,0	1083,75	0,100	E 3	H
Sella	1947		TI	PG	36,0	334,0	2256,00	9,200	E 3	H
Zöt	1967		TI	VA	36,0	145,0	1940,00	1,500	E 4	H
Gelmer	1929		BE	PG	35,0	370,0	1850,24	14,000	E 3	H
Godey	1974		VS	TE	35,0	170,0	1398,00	0,930	C 4	H
Verbois	1943		GE	PG	34,0	340,0	369,15	12,000	A 4	H
Châtelard CFF	1975		VS	TE	33,0	125,0	1116,00	0,250	C 4	H
In den Schlagen (Sihlsee)	1936		SZ	PG	33,0	127,0	889,34	96,500	F 2	H
Lessoc	1976		FR	CB	33,0	70,0	773,70	1,500	C 3	H
Runcahez	1961		GR	PG	33,0	182,0	1277,00	0,480	F 3	H
Turtmann	1958		VS	VA	32,0	110,0	2177,00	0,800	D 4	H
Ambra	1965		TI	TE	32,0	105,0	603,00	0,400	F 4	H
Les Clées	1955		VD	PG	32,0	100,0	742,70	0,740	B 3	H
Pfaffensprung	1921		UR	VA	32,0	64,0	806,70	0,150	E 3	H
Rempen	1924		SZ	PG	32,0	128,0	642,00	0,500	F 2	H
Alp Dado	1995		GR	TE	24,0	210,0	2059,00	0,058	F 3	I, S
Fionnay GD	1957		VS	TE	31,0	100,0	1486,00	0,300	C 5	H
Rhodannenberg (Klöntal)	1910		GL	TE	30,0	217,0	846,84	56,400	F 2	H
Rossinière	1972		VD	PG	30,0	35,0	860,00	2,900	C 4	H
Tobel	1989		UR	VA	30,0	60,0	600,00	0,100	E 3	C
Barcuns	1947		GR	PG	29,0	128,0	1360,00	0,120	F 3	H
Mühleberg	1920		BE	PG	29,0	250,0	480,90	25,000	C 2	H
Muslen	1908	1982	SG	PG	29,0	55,0	606,20	0,083	F 2	H
Wettingen	1933		AG	PG	29,0	137,0	380,24	6,170	E 1	H
Ferpècle	1964		VS	VA	28,0	91,0	1895,00	0,100	D 4	H
Innerferrera	1961		GR	PG	28,0	61,0	1443,00	0,300	G 3	H
Mattenalp	1950		BE	PG/TE	27,0	140,0	1876,10	2,100	E 3	H
Piora (Ritom)	1920	1952	TI	PG	27,0	309,0	1850,10	53,900	E 3	H
Lago Bianco Süd	1912	1942	GR	PG	26,0	190,0	2234,65	18,600	G 4	H
Loebbia	1959		GR	PG	26,0	90,0	1418,00	0,300	G 4	H
Illsee	1923	1943	VS	PG	25,0	270,0	2360,00	6,600	D 4	H
Schlattli	1965		SZ	PG	25,0	40,0	550,00	0,360	E 2	H
Tannensee	1958		OW	TE	25,0	640,0	1975,00	3,800	E 3	H
Gübsensee Ost	1900		SG	PG	24,0	105,0	682,33	1,500	F 1	H
Maigrauge	1872	1942	FR	PG	24,0	195,0	553,30	0,400	C 2	H
Preda	1961		GR	VA	23,0	99,0	1948,00	0,370	G 4	H
Le Pontet	1970		VD	PG	22,0	54,0	792,00	0,070	B 3	H
Rütiweiher	1836	1996	SG	TE	22,0	140,0	839,30	0,200	F 1	R
Serra	1952		VS	VA	22,0	75,0	1278,00	0,200	E 4	H
Zen Binnen	1953		VS	VA	22,0	46,0	1308,00	0,170	E 4	H
Darbola	1958		GR	PG	22,0	120,0	1152,00	0,110	F 4	H
Loré	1996		TI	TE	21,0	44,0	836,60	0,065	F 4	C
Hospitalet	1962		VS	PG	21,0	28,0	2095,00	0,010	C 5	H
Secada	1982		TI	VA	21,0	45,0	1024,00		E 4	C
Airolo	1968		TI	PG/TE	20,0	98,0	1135,00	0,370	E 3	H
Bortelsee	1989		VS	ER	20,0	310,0	2463,65	3,660	E 4	H
Chapfensee Nord	1948		SG	PG	20,0	120,0	1030,00	0,430	F 2	H
Les Esserts	1973		VS	TE	20,0	310,0	1516,00	0,260	C 5	H
Isenthal	1955		UR	PG	20,0	35,0	765,10	0,025	E 3	H
Plans Mayens	1971		VS	TE	20,0	180,0	1574,00	0,130	D 4	I,S
Prä	1961	1986	GR	PG	20,0	21,0	1079,90	0,200	G 4	H
Proz-Riond (Zeuzier)	1957		VS	TE	20,0	155,0	1777,00	51,000	C 4	H
Simmenporte	1908	1983	BE	PG	20,0	43,0	629,00	0,250	D 3	H
Sosto	1963		TI	VA	20,0	49,0	1019,00		F 3	H
Burvagn	1949		GR	PG	20,0	71,0	1117,00	0,250	G 3	H
Totensee	1950		VS	PG	20,0	74,0	2160,00	2,600	E 3	H

Nome	Compimento	Trasformazione	Cantone	Tipo	Altezza m	Lunghezza m	Lago di acumulazione Invaso massimo m s. m.	Lago di acumulazione Volume totale mio m³	Carta	Scopo
Bremgarten-Zufikon	1975		AG	PG	19,0	135,0	380,00	2,200	E 2	H
Buchholz	1892		SG	PG	19,0	48,0	612,00	0,250	F 1	R
Sihl-Höfe	1961		SZ	PG	19,0	50,0	751,55	0,080	E 2	H
Les Marécottes	1925		VS	MV	19,0	225,0	1119,50	0,050	C 4	H
Brigels	1960		GR	TE	18,0	312,0	1255,00	0,300	F 3	H
La Fouly	1972		VS	PG	18,0	58,0	1574,00	0,020	C 5	H
Garichte Nebenmauer	1931		GL	PG	18,0	250,0	1623,35	3,290	F 2	H
Käppelistutz	1945		NW	PG	18,0	51,0	795,50	0,060	E 3	H
Arnensee	1942	1956	BE	TE	17,0	140,0	1542,50	10,500	C 4	H
Gübsensee West	1900		SG	TE	17,0	170,0	682,33	1,500	F 1	H
Hühnermatt (Sihlsee)	1937		SZ	TE	17,0	191,0	889,34	96,500	F 2	H
Icogne	1962		VS	TE	17,0	52,0	1417,00	0,040	D 4	I
List	1901	1982	AR	PG	17,0	42,0	714,35	0,035	G 1	H
Pilgersteg	1920		ZH	PG	17,0	41,0	534,80	0,067	F 2	H
Plan-Dessous	1957		VD	PG	17,0	90,0	558,00	0,100	B 3	H
Schöni	1961		UR	PG	17,0	66,0	1889,00	0,020	E 3	H
Sternenweiher	1874	1991	ZH	TE	17,0	118,0	583,20	0,100	E 2	R
Greuel	1984		AG	TE	17,0	157,0	501,00	0,109	E 2	C
Ual dal Mulin	1962		GR	TE	16,0	80,0	1060,00	0,062	F 3	H
Esslingen	1988		ZH	TE	16,0	170,0	470,95	0,100	E 2	C
Le Châlet	1894	1950	VD	PG	15,0	35,0	465,10		B 3	H
Croix	1955		VS	TE	15,0	100,0	918,00	0,090	C 4	H
Gietroz-du-Fond	1965		VS	PG	15,0	22,0	1815,80	0,020	C 4	H
Lago Bianco Nord	1912	1942	GR	PG	15,0	280,0	2234,65	18,600	G 4	H
Safien-Platz	1957		GR	TE	15,0	840,0	1295,00	0,240	F 3	H
Schwänberg	1916		AR/SG	VA	15,0	38,0	652,03	0,075	F 1	H
Teufenbachweiher (Waldhalde)	1895		ZH	TE	15,0	120,0	683,20	0,230	E 2	H
La Luette	1918	1923	VS	PG	15,0	22,0	943,00	0,400	C 4	H
Waldialp Nord	1961		SZ	TE	15,0	68,0	1405,00	0,249	F 3	H
Vordersee	1986		VS	TE	15,0	145,0	2360,45	0,560	E 4	I,S
Arniboden	1910		UR	TE	14,0	310,0	1371,00	0,260	E 3	H
Aabachweiher	1883	1995	ZH	TE	14,0	85,0	534,01	0,078	E 2	H
Handeck	1942		BE	TE	14,0	145,0	1301,74	0,080	E 3	H
Waldialp Süd	1961		SZ	TE	14,0	300,0	1405,00	0,249	F 3	H
Wanna	1957		GR	TE	14,0	950,0	1720,00	0,310	F 3	H
Wenigerweiher	1821		SG	TE	14,0	120,0	839,20	0,157	F 1	R
Zermeiggern	1964		VS	TE	14,0	350,0	1738,00	0,100	D 4	H
Fully	1914	1917	VS	PG	14,0	110,0	2139,00	5,200	C 4	H
Palü I	1928		GR	PG	13,0	67,0	1923,74	0,190	G 4	H
Frid	1966		VS	TE	13,0	165,0	1740,50	0,050	E 4	H
Chapfensee Ost	1948		SG	PG	12,0	140,0	1030,00	0,430	F 2	H
Isel	1969	1982	GR	TE	12,0	45,0	1606,35	0,350	G 3	H
Palü II	1928		GR	PG	12,0	45,0	1923,74	0,190	G 4	H
Peccia	1954		TI	TE	12,0	250,0	1302,00	0,120	E 4	H
Zwirgi	1927	1989	BE	VA	12,0	26,0	998,55	0,014	E 3	H
Châtelard ESA	1972		VS	PG	11,0	230,0	1122,00	0,090	C 5	H
Fionnay FMM	1956		VS	TE	11,0	250,0	1492,50	0,170	C 5	H
Linthal	1964		GL	TE	11,0	550,0	676,00	0,239	F 3	H
Louvie	1966	1986	VS	PG	11,0	40,0	2213,00	0,200	C 4	I
Motec	1957		VS	TE	11,0	300,0	1561,00	0,150	D 4	H
Oberems	1927		VS	MV	11,0	176,0	1382,00	0,030	D 4	H
Corina	1959		GR	TE	11,0	450,0	1190,00	0,124	F 4	H
Pradella	1993		GR	TE	11,0	250,0	1143,00	0,274	H 3	H
Obermatt	1962		OW	TE	11,0	410,0	659,50	0,100	E 3	H
Eimatt	1997		BL	TE	11,0	190,0	489,50	0,026	D 1	C
Hintersand	1962		GL	TE	10,0	400,0	1298,00	0,113	F 3	H
Sonvico	1945	1989	TI	PG/TE	10,0	70,0	584,25	0,006	F 4	H
Waldnacht	1963		UR	TE	10,0	70,0	1385,00	0,032	E 3	H
Heidsee Stausee	1919		GR	TE	10,0	180,0	1484,19	0,490	G 3	R
Crestawalddamm (Sufers)	1962		GR	TE	10,0	244,0	1401,00	21,400	F 3	H
Baslerweiher	1872	1989	SO	TE	9,0	75,0	559,00	0,150	D 1	R
Trübtensee	1950		BE	PG	9,0	46,0	2365,20	1,100	E 3	H
Pfaffnau Schiessstand	1993		LU	TE	8,0	185,0	508,00	0,057	D 2	C
Waldweiher	1835	1992	ZH	TE	8,0	70,0	545,46	0,100	E 2	R
Pallazuit	1958		VS	TE	8,0	350,0	1327,00	0,100	C 5	H

Name	Completion	Transformation	Canton	Type	Height m	Length m	Reservoir Elevation m a.s.l.	Reservoir Capacity mio m³	Map	Purpose
Melchsee	1958		OW	TE	8,0	295,0	1893,30	3,500	E 3	H
Gübsensee Nord	1900		SG	TE	7,0	210,0	682,33	1,500	F 1	H
Sulgenbach	1988		BE	TE	7,0	180,0	602,00	0,063	C 3	C
Tremorgio	1927		TI	PG	7,0	15,0	1830,00	13,000	E 4	H
Weiermatt	1990		BE	TE	7,0	120,0	585,00	0,061	C 3	C
Bettmersee	1949	1995	VS	TE	7,0	96,0	2008,65	0,560	D 4	I
Spiezmoos	1908	1983	BE	TE	7,0	800,0	628,00	0,400	D 3	H
Mattsand	1958		VS	TE	6,0	560,0	1230,50	0,210	D 4	H
Vissoie	1959		VS	TE	6,0	300,0	1119,50	0,050	D 4	H
Wichelsee	1957		OW	TE	6,0	168,0	458,60	0,400	E 3	H
Rodi	1940		TI	PG	6,0	150,0	945,00	0,130	E 3	H
Murgsee Mittel	1925		SG	PG	5,0	55,0	1819,45	1,900	F 2	H
Oberer Meretschiesee	1927		VS	TE	5,0	70,0	2361,00	0,200	D 4	H
Heidsee	1919		GR	TE	5,0	360,0	1484,19	0,490	G 3	R
Unterer Meretschiesee	1927		VS	TE	4,0	80,0	2307,00	0,200	D 4	H
Murgsee Süd	1925		SG	PG	3,0	20,0	1819,45	1,900	F 2	H
Murgsee Nord	1925		SG	PG	3,0	46,0	1819,45	1,900	F 2	H
Murgsee Süddamm	1925		SG	TE	2,0	25,0	1819,45	1,900	F 2	H

Symboles Symbole Simboli Symbols	Légende	Legende	Leggenda	Legend
VA	Barrage-voûte	Bogenmauer	Diga ad arco	Arch dam
PG	Barrage-poids	Gewichtsmauer	Diga a gravità	Gravity dam
CB	Barrage à contreforts	Pfeilermauer	Diga a contraforti	Buttress dam
MV	Barrage à voûtes multiples	Mehrfachbogenmauer	Diga ad archi multipli	Multi-arch dam
ER	Digue en enrochements	Steindamm	Diga di pietrame	Rockfill dam
TE	Digue en terre	Erdamm	Diga di terra	Earth dam
H	Hydroélectricité	Hydroelektrizität	Idroelettricità	Hydropower
I	Irrigation	Bewässerung	Irrigazione	Irrigation
S	Alimentation en eau potable	Wasserversorgung	Approvvigionamento idrico	Water supply
C	Défense contre les crues, barrage en torrent	Hochwasserrückhalt, Geschiebesperre	Controllo delle piene, briglia	Flood control, dam for sediment retention
R	Loisirs, biotope	Erholung, Biotop	Ricreazione, biotopo	Recreation, biotope



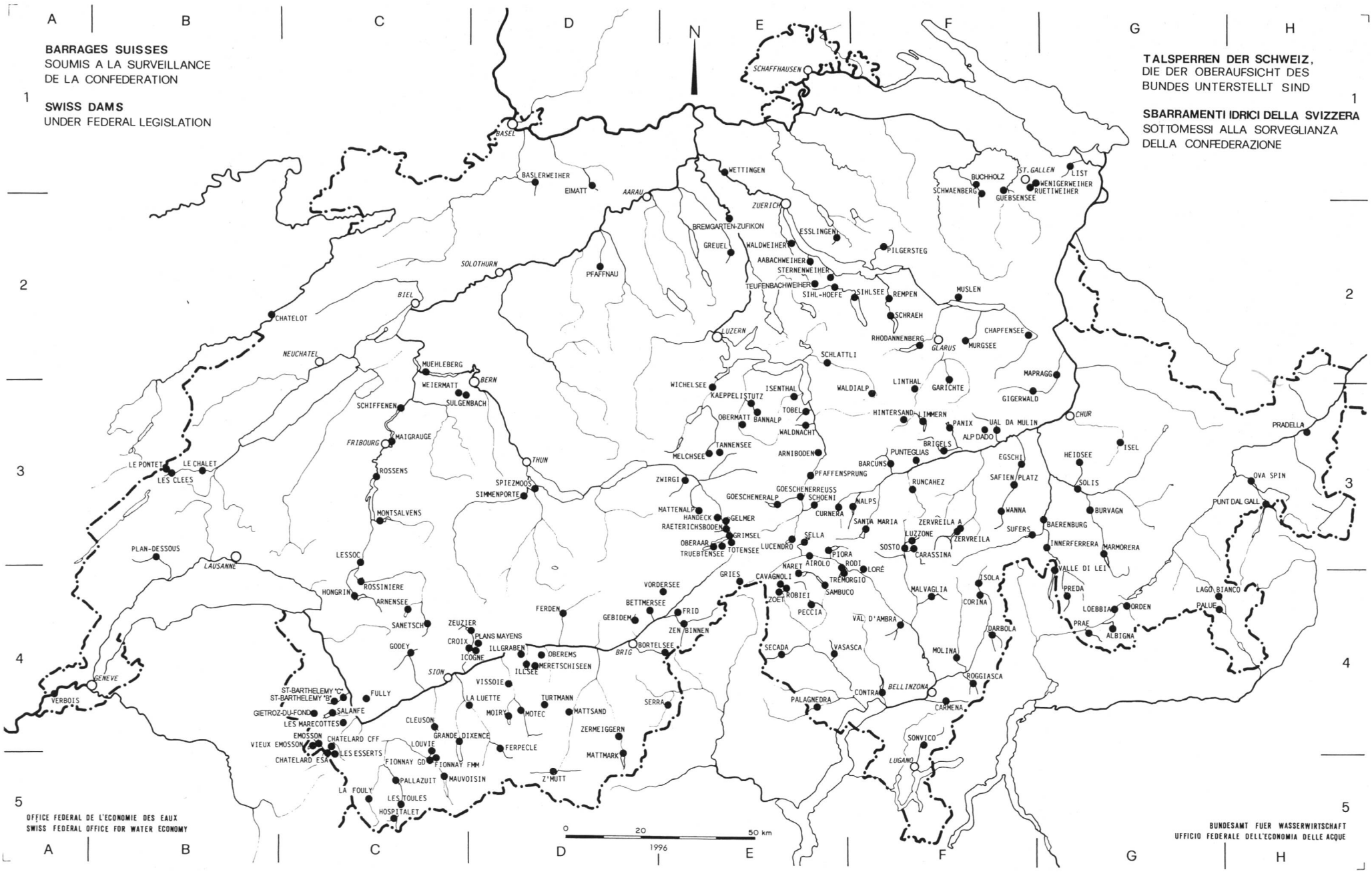
Les cantons de la Suisse Die Kantone der Schweiz		I cantoni della Svizzera The cantons of Switzerland	
ZH	Zürich	SH	Schaffhausen
BE	Bern	AR	Appenzell A. Rh.
LU	Luzern	AI	Appenzell I. Rh.
UR	Uri	SG	St. Gallen
SZ	Schwyz	GR	Graubünden
OW	Obwalden	AG	Aargau
NW	Nidwalden	TG	Thurgau
GL	Glarus	TI	Ticino
ZG	Zug	VD	Vaud
FR	Fribourg	VS	Valais
SO	Solothurn	NE	Neuchâtel
BS	Basel-Stadt	GE	Genève
BL	Baselland	JU	Jura

BARRAGES SUISSES
SOUMIS A LA SURVEILLANCE
DE LA CONFEDERATION

SWISS DAMS
UNDER FEDERAL LEGISLATION

TALSPERREN DER SCHWEIZ,
DIE DER OBERAUFSICHT DES
BUNDES UNTERSTELLT SIND

SBARRAMENTI IDRICI DELLA SVIZZERA
SOTTOMESSI ALLA SORVEGLIANZA
DELLA CONFEDERAZIONE



OFFICE FEDERAL DE L'ECONOMIE DES EAUX
SWISS FEDERAL OFFICE FOR WATER ECONOMY

BUNDESAMT FUER WASSERWIRTSCHAFT
UFFICIO FEDERALE DELL'ECONOMIA DELLE ACQUE