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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 89 (1997)

Heft: 3-4

Artikel: Vers und modèle rapide d'optimisation de la régulation des centrales hydroélectriques

Autor: Bagilishya, Japhet / Staubli, Thomas

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940168

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 02.07.2025

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

Vers un modèle rapide d'optimisation de la régulation des centrales hydroélectriques

Japhet Bagilishya, Thomas Staubli

1. Introduction

Le rôle d'un système de régulation d'une centrale hydroélectrique est d'assurer un équilibre entre l'énergie produite et l'énergie consommée par les utilisateurs branchées sur le réseau. L'efficience d'un tel système peut s'estimer à travers son aptitude à répondre en temps nécessaire à la demande des utilisateurs en assurant la sécurité de leurs appareils à travers la qualité (stabilité de la tension et de la fréquence) de l'énergie fournie. Or la rapidité du régulateur peut engendrer des instabilités dans l'installation hydroélectrique elle-même et l'étude d'optimisation s'impose.

C'est l'optimisation de la rapidité des régulateurs des centrales hydroélectriques qui sera l'objet de la modélisation discutée dans le texte suivant.

2. Pourquoi un modèle rapide?

La distorsion ou retard entre les fluctuations de l'énergie produite et celles de l'énergie consommée dans le réseau électrique de distribution est due à la rapidité des processus transitoires dans le système production/transport et au système de commande qui n'arrive pas à suivre. Pour les centrales hydroélectriques, ces processus transitoires englobent:

- le régime transitoire dans la conduite d'alimentation de la turbine,
- le comportement dynamique et surtout l'inertie de la turbine et du générateur,
- et les fluctuations dans le réseau électrique.

En comparaison avec les autres centrales de grande puissance, les centrales hydroélectriques peuvent s'adapter bien aux fluctuations dans le réseau. Pour optimiser la rapidité de la régulation on a besoin d'un modèle numérique capable d'effectuer rapidement le calcul de tous les processus ci-haut cités et de transmettre en un temps record la consigne de commande aux organes de régulation de la turbine.

Le but de la modélisation sera de mettre au point ce modèle numérique rapide pour améliorer la capacité de régulation des usines hydroélectriques. Cette modélisation visera les fluctuations situées dans la bande de fréquence bien déterminée, par exemple entre 0,01 et 1 Hz. Les centrales particulièrement visées sont des anciennes installations hydroélectriques, les installations munies de turbines Pelton et éventuellement les futures installations.

Les principaux objectifs visés sont:

- améliorer la réponse de la turbine aux fluctuations du réseau de distribution par un système de régulation rapide,
- appliquer ce modèle rapide à un cas concret (une centrale hydroélectrique).

L'application d'une telle régulation peut se situer dans le cadre de la libéralisation du marché d'électricité en Europe. L'interconnexion entre les réseaux Ouest et Est entraînera la diminution de la qualité du courant en amplifiant les problèmes de fluctuations dans le réseau.

Sur le plan national, les fluctuations causées par le démarrage des locomotives sur le réseau des Chemins de Fer Fédéraux peuvent également bénéficier de ce type de régulation.

3. Régulation et variables d'entrée du système

L'étude d'un système de régulation repose sur une bonne connaissance des processus transitoires invoqués dans le chapitre 2. La figure 1 montre d'une manière schématique la boucle de régulation, qui, suivant la variation du couple résistant, commande l'organe de régulation afin de fournir à la turbine le débit nécessaire pour développer le couple moteur proportionnel au couple résistant du générateur. C'est cette action sur le débit qui est à l'origine du régime transitoire dans la conduite alimentant la turbine.

Les systèmes de régulation actuellement utilisés offrent des résultats satisfaisants, mais il est possible d'améliorer leur efficacité grâce à l'avancement de nouvelles recherches dans le domaine, voir paragraphe 3.2.

Ces recherches concernent en général la turbine et son système d'alimentation et dans ce qui suit nous nous intéresserons à ces deux systèmes.

3.1 Variables d'état du système

Pour la turbine et son système d'alimentation, les variables les plus importantes à considérer sont: le débit, la charge (pression) en amont de la turbine, les fluctuations du niveau d'eau dans la cheminée d'équilibre, la fréquence du coup de bélier et le mouvement du servomoteur.

Cette affirmation peut s'appuyer par exemple sur les résultats de l'analyse multivariable appliquée par *File* et *Staubli* [1] au cas de l'usine hydroélectrique d'Etzel.

L'analyse des spectres d'auto- et intercorrélation montre une corrélation entre le débit, la pression et le mouvement du servomoteur d'une part et la puissance de la turbine d'autre part. Cette analyse s'est effectuée dans la bande de fréquence d'oscillation de la cheminée d'équilibre (0,09 Hz) et du coup de bélier (0,14 Hz).

Ces variables sont déterminées à partir du régime transitoire.

Dans la conduite d'alimentation de la turbine, le régime transitoire est décrit par deux équations: l'équation de continuité (1) et l'équation des moments (quantité de mouvement) (2).

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho a^2}\left(\frac{\partial p}{\partial t} + v\frac{\partial p}{\partial x}\right) = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho\left(v\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t}\right) + g\rho\frac{\partial z}{\partial x} + \rho\frac{\lambda}{2d}v|v| = 0 \qquad (2)$$

x: variable le long de la conduite
t: temps
v: vitesse d'écoulement, d: diamètre de la conduite d'adduction et ρ: la pression
a: vitesse de propagation de l'onde du coup de bélier,
$\rho\frac{\lambda}{2d}v|v|$: perte de pression par longueur
ρ: masse volumique de l'eau
g: accélération due à la pesanteur.

Plusieurs méthodes existent pour résoudre ce système d'équations. La méthode des caractéristiques (MOC: Method of Characteristic) [2] est la plus utilisée actuellement. L'utilisation de cette méthode numérique nécessite la connaissance des conditions aux limites: le niveau d'eau dans le barrage, les caractéristiques de la cheminée d'équilibre, des caractéristiques de la turbine et du niveau d'eau dans le plan aval de turbine en général.

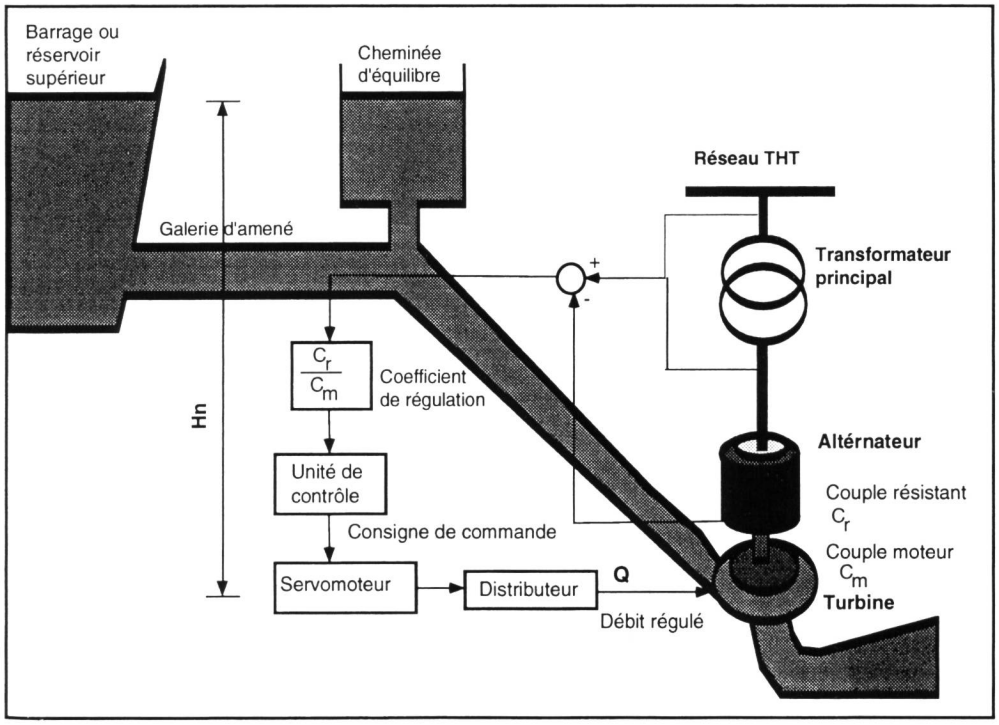

Figure 1. Schéma illustrant le processus d'interaction entre la production et le transport.

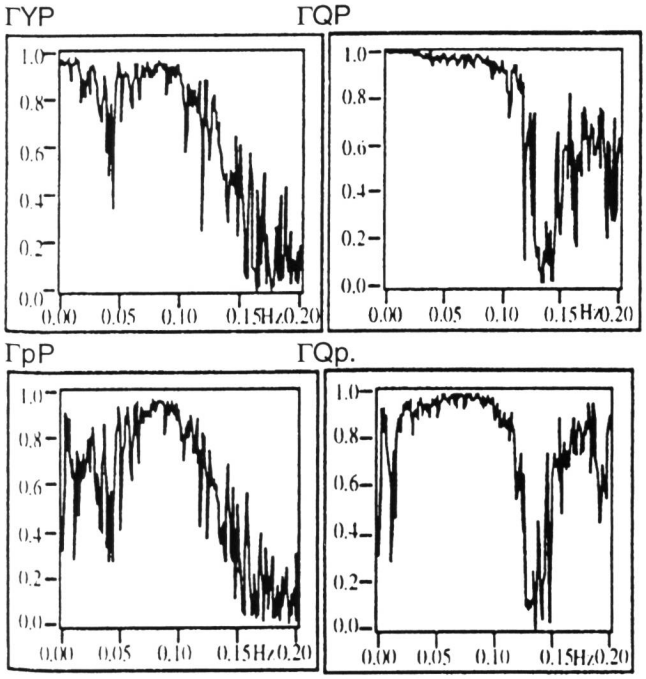

Figure 2. Spectres de cohérence ordinaire entre les différentes variables: ΓYP, ΓQP, ΓpP, ΓQp.
p: charge (pression), Q: débit de la turbine,
Y: mouvement du servomoteur, P: puissance de la turbine.
(Graphiques tirés de *File* et *Staubli,* 1995)

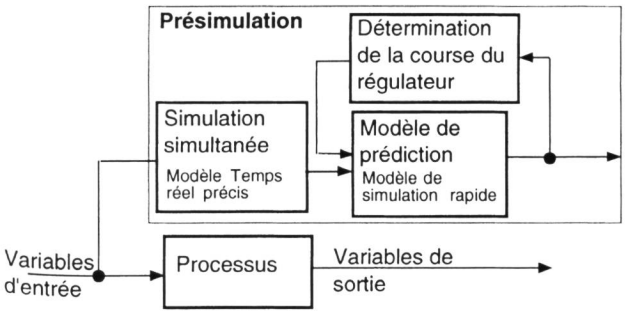

Figure 3. Modélisation rapide selon *Feyrer,* 1994.

Comme l'a souligné Chaudhry [2], il manque des caractéristiques dynamiques des turbines en régimes transitoires, et on utilise actuellement des caractéristiques à l'état stationnaire.

3.2 Nouvelles recherches dans le domaine

Parmi les recherches citées en introduction de ce chapitre 3 on peut citer pour:

Comportement dynamique:
Par exemple les recherches menées par le laboratoire des machines hydrauliques de l'EPF à Lausanne [3]. Grâce aux résultats sur le comportement des machines hydrauliques, on pourra disposer des conditions aux limites beaucoup plus précises pour le régime transitoire dans la conduite d'alimentation de la turbine.

Modélisation des processus en temps réel et rapide
Feyrer [4] a présenté une thèse originale dans laquelle il a étudié la centrale d'accumulation de Witznau en Allemagne. Au cours de cette thèse, il a mis au point un modèle on-line basé sur un présimulateur rapide, voir figure 3, pour la gestion de la variation de la puissance dans cette centrale hydroélectrique.

Construite en 1939, Witznau est une centrale d'accumulation dotée d'un système d'adduction très complexe alimentant des unités pompes/turbines.

Le but de son étude était de mettre au point un modèle de calcul continue pour contrôler la variation admissible de la puissance de la centrale, dans le but de maîtriser les variations, souvent inadmissibles, de pression et de débit aux points sensibles du système d'adduction, lors de la mise en service ou hors service des groupes de la centrale.

Son modèle on-line intègre à la fois un module temps réel et un module de simulation rapide. Le module temps réel permet la synchronisation des processus dans le système tandis que le module de simulation rapide permet, à partir des résultats du module temps réel, un calcul très rapide (300 à 350 fois le temps réel) de prédiction de la variation de la puissance admissible et ajuste le débit de la turbine

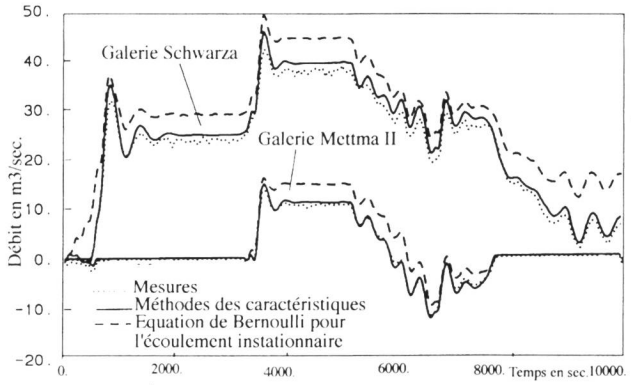

Figure 4a). Comparaison des résultats du modèle et des mesures du débit dans les galeries de Schwarza et Mettma II (turbines en service).

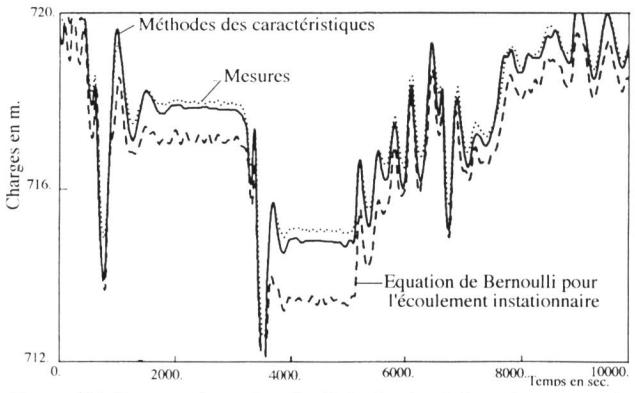

Figure 4b). Comparaison des résultats de simulation et mesures de la charge au pieds de la cheminée d'équilibre d'Eichholz (turbines en service d'après *Feyrer,* 1994).

pour rester dans une fourchette de valeurs évitant le déversement de l'eau par dessus la cheminée d'équilibre et les dépressions dans la galerie. Les fortes variations qu'on observe dans les graphiques des figures 4 a) et b), correspondent bien à la mise en service de la première (450 s), puis la deuxième turbine (3600 s), suivies de la coupure de la première puis la deuxième turbine.

3.3 Régulation rapide du système production/réseau

On ne peut pas avoir une régulation reproduisant parfaitement les fluctuations dans le réseau électrique. L'inertie du système mécanique étant l'un des handicaps au problème de régulation rapide. Mais la rapidité dans la prédiction des fluctuations dans le réseau et dans l'incitation du régulateur peuvent offrir la possibilité d'améliorer la réponse de la production aux fluctuations dans le réseau.

L'amélioration de la performance du système de régulation se fera par:

- l'augmentation de la précision du modèle du régime transitoire par l'introduction des caractéristiques dynamiques des turbines comme conditions aux limites,
- le développement d'un modèle très rapide de prédiction capable de calculer et de transmettre très rapidement les variables et paramètres d'état du système entier à régler.

4. Approche méthodologique

Suivant les observations du paragraphe 3.3 ci-dessus, le schéma de la figure 5 montre les principales étapes nécessaires pour le développement d'un modèle rapide. On peut distinguer deux principales étapes:

1) Une étape de spécification et de définition du système, au cours de laquelle les installations visées sont classées suivant leurs aptitudes à la régulation rapide.

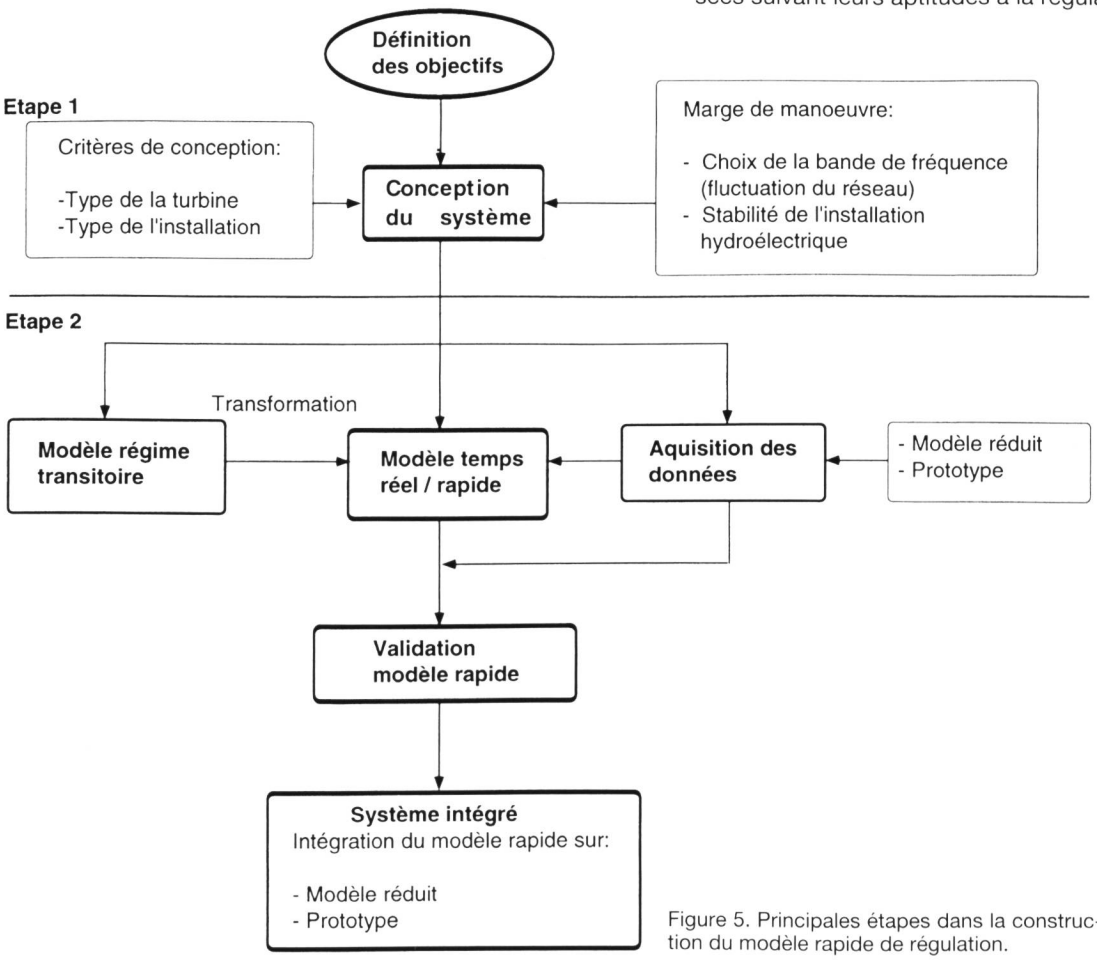

Figure 5. Principales étapes dans la construction du modèle rapide de régulation.

Après analyse de tous les éléments déterminants dans la conception du modèle, le système répondant le mieux à la régulation rapide sera modélisé.

2) Une deuxième étape consiste en la modélisation du système défini en étape 1. En premier lieu, un modèle du régime transitoire fondé sur le comportement dynamique des turbines sera réalisé. Ce modèle pourra également servir pour l'étude des régimes transitoires dans d'autres installations hydrauliques. Ce programme du régime transitoire sera le noyau du modèle temps réel, puis rapide selon la philosophie de Feyrer, mais en se référant aux fluctuations dans le réseau électrique. Ce programme temps réel équipera un système on-line qui va piloter le système de régulation de toute la centrale hydroélectrique.

5. Conclusion

Grâce au développement des recherches sur le comportement dynamique des turbines hydrauliques et de leur système d'alimentation, on peut envisager d'améliorer l'efficacité des systèmes de régulation des centrales hydroélectriques pour réagir mieux aux fluctuations de la demande dans le réseau. Cette amélioration ne peut se faire qu'à travers un modèle on-line rapide pilotant le système de régulation. Cette rapidité permettra d'améliorer la qualité du courant électrique des réseaux alimentés par les centrales hydroélectriques équipées de ces systèmes de commande rapide.

Bibliographie

[1] *File G. & Staubli S.*, 1996: Understanding the Dynamic Behavior of a Hydro Power Plant using Multiple Input/Output Model Analysis; Modelling, Testing & Monitoring for Hydro Power Plants – II, Lausanne, July 1986.

[2] *Chaudhry H.*, 1987: Applied Hydraulic Transients; Second Edition: Van Nostrand Reinhold Company.

[3] *Jacob T.*, 1993: Evaluation sur modèle réduit et prédiction de la stabilité de fonctionnement des turbines Francis; Thèse Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne: IMHEF.

[4] *Feyrer R.*, 1994: Kontinuierliche On-line-Berechnung der zulässigen Leistungsänderung in einem Pumpspeicherwerk; Mitteilung der Universität Stuttgart: Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen.

Auteurs: *Japhet Bagilishya,* EPFL/IMNEF, 33, av. de Cours, CH-1007 Lausanne, et *Thomas Staubli,* Zentralschweizerisches Technikum Luzern, CH-6048 Horw.

Sündenböcke gesucht?

Gewöhnlich enthalten schon die ersten Meldungen über ein aktuelles Hochwasserereignis einen Hinweis auf die Schuldigen. Erst sehr viel später, wenn die einschlägigen hydrologischen Untersuchungen abgeschlossen sind, folgen differenziertere Aussagen. Doch interessiert sich dann die Öffentlichkeit kaum mehr dafür.

Zu den stereotypen Schuldzuweisungen gehören heute:

- die Versiegelung der Landschaft durch Viehtrieb, modernen Ackerbau und Verbetonierung;
- die Skipisten;
- die Verbauungen, die eine falsche Sicherheit vortäuschen, aber dann doch versagen;
- das vom sauren Regen bewirkte Waldsterben;
- die anthropogene Klimaveränderung.

Warum erfolgen diese Schuldzuweisungen? Es gibt einen gehobenen und einen weniger gehobenen Grund. Zum ersten gehört die heute weit verbreitete Meinung, der Mensch habe die Natur im Griff. Gerade die Städter, die in hochgradig organisierten Strukturen leben, denken so. Für sie ist eine Naturkatastrophe bloss so etwas wie ein Verkehrszusammenbruch, der sich bei mehr Disziplin und geschickter Lenkung vermeiden lässt. Tritt die Naturkatastrophe dennoch auf, so hat eben jemand versagt – selbstverständlich jemand *anders*. Dem muss aber entgegengehalten werden, dass der Mensch die Natur nur sehr bedingt im Griff hat. Es gibt noch heute zahlreiche Naturgefahren, die nicht «man-made» sind oder nur zu einem kleinen Teil.

Der zweite Grund ist weniger gehoben. Kaum ist ein Unglück passiert, beeilen sich einige politische Gruppierungen, daraus Nutzen zu ziehen. So im Stil: Wir haben es ja immer gesagt; und die Gegner unserer Ziele sind im Unrecht! Das war schon früher so. Nur war es damals eher die Geistlichkeit, die den Menschen jeweils bei Naturkatastrophen «die Hölle heiss machte». Ein entsprechendes Beispiel liefert die Strafpredigt von Jeremias Gotthelf «Die Wassernot im Emmenthal» von 1837.

Für Fachleute wirken solche Schuldzuweisungen oft geradezu lächerlich. Doch versucht man sie durch Pseudofachleute zu belegen. So liess nach den verheerenden Hochwassern von 1987 eine grosse schweizerische Tageszeitung zuallererst einen Wiener zu Wort kommen. Sein Name war in Fachkreisen zwar unbekannt, doch trug er immerhin den Titel eines Professors. Er brandmarkte sämtliche von Menschen im Alpenraum vorgenommenen Änderungen, darunter insbesondere die *«Beweidung der Wälder»*. Eine solche Beweidung aber gibt es in der Schweiz schon längst nicht mehr.

Nun haben gerade die Hochwasser von 1987 zu einer umfassenden, vom Bundesamt angeordneten Hochwasseranalyse geführt. Das Ergebnis zeigt, dass die Katastrophen durch Niederschläge verursacht wurden, die in seltener Reihenfolge und in seltenem Ausmass auf hochgelegene Regionen fielen. Bei der Abflussbildung spielten dort weder die Versiegelung noch der Waldzustand eine Rolle. Ein Zusammenhang mit der Klimaänderung liess sich nicht herstellen. Und welcher Einfluss kam den Verbauungen zu? – Es ist klar, dass sich die Menschen im Schutze von Verbauungen sicherer fühlen. Das äussert sich in einer Inbesitznahme einstiger Überflutungsflächen durch eine intensivere Landwirtschaft, die Anlage von Verkehrswegen und Industrien sowie die Ausdehnung von Wohnquartieren. Versagen diese Verbauungen, die ja nicht auf eine Sintflut ausgerichtet sind oder sein dürfen, so ergeben sich dann zwangsläufig höhere Schäden. Doch ist anzumerken, dass diese Schäden dann auch eine zahlreichere und meist zahlungskräftigere Bevölkerung treffen. Von grosser Bedeutung ist jedoch der Umstand, dass die heutigen Hochwasser im Unterschied zu früher nur wenig Todesopfer fordern. 1987 waren es in der ganzen Schweiz bloss sechs und in den Jahren 1972 bis 1992 insgesamt bloss 33. Vergleicht man diese Zahlen mit den Todesopfern in anderen Gefahrenbereichen, so ist der Erfolg der Hochwasserschutzmassnahmen evident.

Selbstverständlich kann menschliches Fehlverhalten bei Hochwassern und Hochwasserschäden manchmal ausschlaggebend sein. Vielleicht gibt es dann tatsächlich auch *echte Sünder* und nicht nur *Sündenböcke*. Hier soll jedoch wieder einmal lapidar, aber mit Nachdruck festgehalten werden: *Hochwasser werden selbst heute meistens und vor allem durch Starkniederschläge verursacht!*

Gedanken im Nachgang zur Tagung Hochwasserschutz des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes vom 21. November 1996 in Grangeneuve FR von

Daniel Vischer.