



Hugo Bachmann

# Wenn Bauwerke schwingen

Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen  
in der Schweiz

—  
Geschichte und Geschichten

v/dlf

# Wenn Bauwerke schwingen

Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen  
in der Schweiz

—  
Geschichte und Geschichten

HUGO BACHMANN

Herausgegeben von der

Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen  
Fondation pour la Dynamique des Structures et le Génie Parasismique  
Fondazione per la Dinamica Strutturale e l'Ingegneria Sismica



## INHALTSVERZEICHNIS

Bilder zur Einstimmung . . . . .	9
Geleitwort von alt Bundesrat Moritz Leuenberger . . . . .	19
Vorwort. . . . .	21
<b>Kapitel 1 — Neues Wissen und Können . . . . .</b>	<b>23</b>
Anfänge und Entwicklungen von Lehre und Forschung in Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen an der ETH Zürich, der EPF Lausanne und an Fachhochschulen	
1.1 1973–1982: Einsteigen, fragen und wagen . . . . .	25
1.2 1982–1989: Lernen, verschnaufen, lehren und forschen. . . . .	37
1.3 1989–1995: Lehrbücher, ein «Rütteltisch», Schwingungstilger und Rituale . . . . .	51
1.4 1995–2000: Grossversuche, «Paulay-Wochen» und kein Ende . . . . .	73
1.5 2000–2013: Verformungsbasierte Verfahren und «Best Teacher of ETH». . . . .	90
1.6 1997–2013: Die EPF Lausanne holt auf . . . . .	102
1.7 2006–2013: Auch Fachhochschulen werden aktiv . . . . .	114
<b>Kapitel 2 — Vom «Erdbebenclub» bis zum Durchbruch . . . . .</b>	<b>125</b>
Ursprünge und Aktivitäten der Schweizer Gesellschaft für Erdbeben- ingenieurwesen und Baudynamik (SGEB)	
2.1 1977–1983: Initianten an die kurze Leine . . . . .	126
2.2 1983–1993: Ohne enges Korsett geht es besser . . . . .	134
2.3 1993–1998: Der «Handlungsbedarf» als politisches Unternehmen . . . . .	142
2.4 1998–2001: Erste Früchte auf Bundesebene . . . . .	158
2.5 1998–2004: Weitere Fortschritte . . . . .	168
2.6 2004–2014: Durchbruch auch im öffentlichen Bewusstsein. . . . .	183
<b>Kapitel 3 — Vom Gedankenaustausch zur etablierten Gemeinschaft. . . . .</b>	<b>209</b>
Die Zusammenarbeit mit den D-A-CH-Ländergesellschaften in Deutschland und Österreich	
3.1 1981–1987: Behutsamer Beginn. . . . .	210
3.2 1988–1996: Der Zusammenhalt festigt sich . . . . .	215
3.3 1997–2003: Willkommene Neuerungen . . . . .	221
3.4 2004–2014: Bewährte Gemeinschaft . . . . .	226

<b>Kapitel 4 — Interdisziplinäre Vernetzung</b> . . . . .	<b>235</b>
Die Fachgruppe der ETH Zürich für Erdbebeningenieurwesen (FEE)	
4.1 1978–1986: Ein neues Organ der ETH . . . . .	236
4.2 1986–1994: Auf kleinem Feuer weitermachen . . . . .	246
4.3 1994–2000: Aktiv bis zum sanften Ende . . . . .	250
<b>Kapitel 5 — Der «Handlungsbedarf» als Meilenstein</b> . . . . .	<b>261</b>
Umfassende Analyse und klare Zielsetzungen für das erdbebengerechte Bauen	
5.1 1997–1998: Ein grundlegendes Unternehmen . . . . .	262
5.2 2014: Was bisher geschehen ist – eine vorläufige Bilanz . . . . .	273
<b>Kapitel 6 — Verfassungsartikel, Konkordat oder Einzelgang der Kantone?</b> . . . . .	<b>281</b>
Politische Bestrebungen für wirksame Rechtsgrundlagen für den Erdbebenschutz	
6.1 2000–2005: Fast ein Verfassungsartikel. . . . .	282
6.2 2005–2009: Ein Konkordat wäre auch wirksam . . . . .	290
6.3 2009–2014: Kantone im Einzelgang . . . . .	299
<b>Kapitel 7 — Unberechenbare Bodenbewegungen</b> . . . . .	<b>309</b>
Seismologie und Schweizerischer Erdbebendienst	
7.1 1878–1974: Frühe Anfänge . . . . .	311
7.2 1974–1996: Stationsnetze und Dienstleistungen . . . . .	316
7.3 1996–2014: Erneuerungen und weiterer Ausbau . . . . .	319
<b>Kapitel 8 — Regeln für dynamisch beanspruchte Bauten</b> . . . . .	<b>321</b>
Entstehung und Entwicklung der SIA-Normenbestimmungen für Erdbeben und andere dynamische Einwirkungen	
8.1 1970–1975: In der Steinzeit der Erdbebenvorsorge . . . . .	323
8.2 1980–1989: Erste moderne Erdbebennormen . . . . .	325
8.3 1998–2003: Anpassungen an den Eurocode 8 und Integration in die bauweisespezifischen Normen . . . . .	339
8.4 2003–2004: Erdbebennormen auch für bestehende Bauten. . . . .	346
<b>Kapitel 9 — Förderung der Kompetenzen in der Praxis</b> . . . . .	<b>353</b>
Die Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen	
9.1 1998–2005: Eine besondere Institution. . . . .	354
9.2 2005–2010: Mit wenigen Mitteln viel bewirken . . . . .	356
9.3 2010–2014: Neue Chargen und Köpfe . . . . .	368

<b>Kapitel 10 — Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen in der Projektierung</b> . . . . .	<b>375</b>
Erfahrungen und Entwicklungen in den Ingenieurbüros	
10.1 1965–1989: In der Pionierzeit . . . . .	376
10.2 1989–2003: Langsam dämmert es . . . . .	383
10.3 2003–2014: Erdbebensicherung und Baudynamik emanzipieren sich	388
<b>Kapitel 11 — Zeitzeugen befragt</b> . . . . .	<b>395</b>
Interviews zu Anfängen und Fortschritten	
Interview mit Dr. Ernst C. Glauser . . . . .	396
Interview mit Dr. John P. Wolf . . . . .	398
Interview mit Dr. Martin Wieland . . . . .	399
Interview mit Dr. Dieter Mayer-Rosa . . . . .	401
Interview mit Dr. Reto Cantieni . . . . .	403
Interview mit Dr. Armin Ziegler . . . . .	405
Interview mit Gérard Rutishauser . . . . .	407
Interview mit Dr. Walter J. Ammann . . . . .	409
Interview mit Dr. Olivier Lateltin . . . . .	411
Interview mit Dr. Christian Furrer . . . . .	412
Interview mit Dr. Thomas Wenk . . . . .	414
Interview mit Ehrfried Kölz . . . . .	416
<b>Kapitel 12 — Marksteine</b> . . . . .	<b>419</b>
Wichtige Ereignisse chronologisch	
<b>Anhang</b> . . . . .	<b>423</b>
Abkürzungen . . . . .	423
Personenregister . . . . .	426
Sachregister . . . . .	428
Glossar . . . . .	431
Bildnachweis . . . . .	432
Dank an die Sponsoren . . . . .	433
Zum Autor . . . . .	434

## BILDER ZUR EINSTIMMUNG

- A – Erdbebenschäden
- B – Erdbebenforschung
- C – Schwingungsprobleme
- D – Ein «historischer» Fortbildungskurs
- E – Forscher und Lehrer
- F – Politische Aktionen und Öffentlichkeitsarbeit



A-1



A-2



A-3



A-4

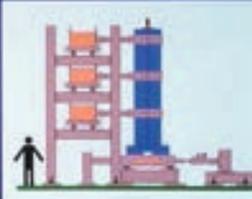


A-5



A-6

**Nichtlineare, dynamische Erdbebenbeanspruchung einer 3-stöckigen Stahlbetontragwand**

**Wirklichkeit**  
3-stöckiges Gebäude mit Stahlbetontragwänden  
Wandschlankheit:  $h_w/b_w=4.1$

**Versuch**  
Stahlbetontragwand im Modellmassstab 1:3

B-1



B-2

**The Munro Prize 2007**  
AWARDED ANNUALLY BY ELITEER ENGINEERING FOR THE BEST PAPER PUBLISHED IN  
*Engineering Structures*  
AWARDED TO  
**Pierino Lestuzzi and Hugo Bachmann**  
FOR THE PAPER  
*Displacement ductility and energy assessment from shaking table tests on RC structural walls*  
Volume 29, Issue 8, pp. 1208-1221 (2007)

B-3



B-5

**Stahlbetongebäude unter Erdbeben**



Rotationsduktilität



Zeit 8.60

B-4



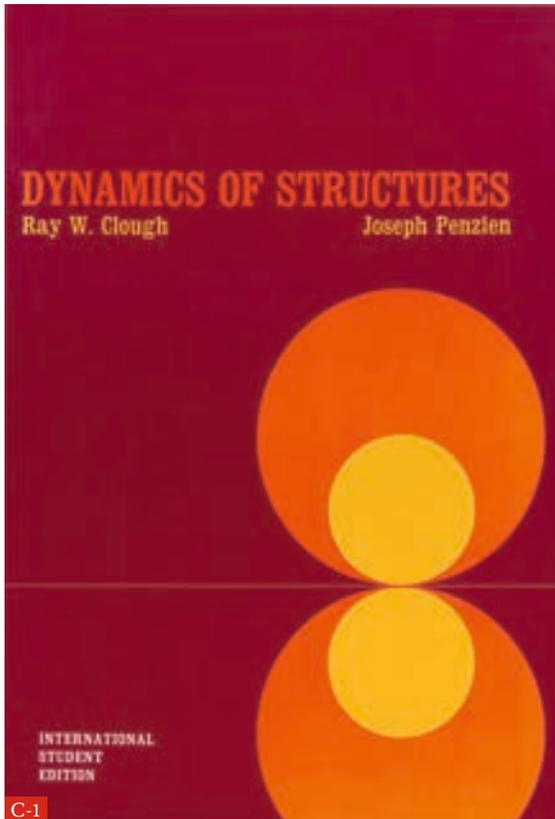
B-6



B-7

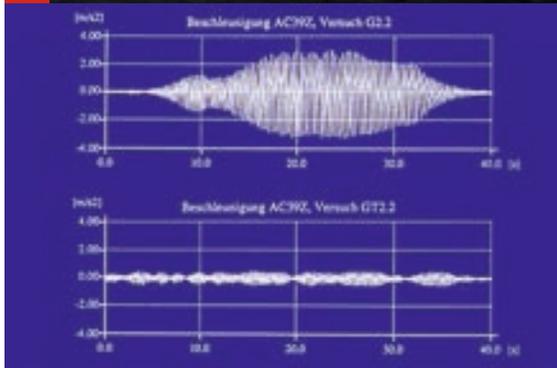


B-8





C-6



Figur 11: Zeitverläufe der Beschleunigung mit Markieren auf mit System Tüpfel (AC902, Versuche G2.2 und G2.2)

C-7



C-8



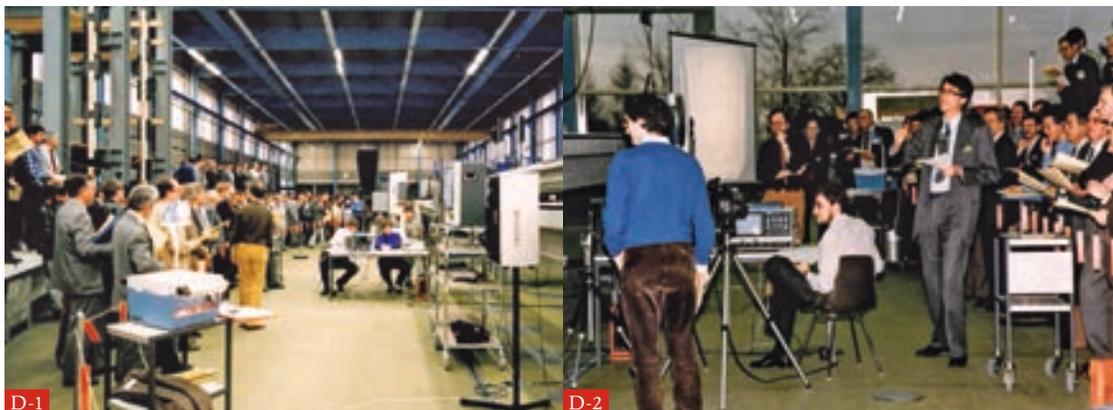
C-9



C-10

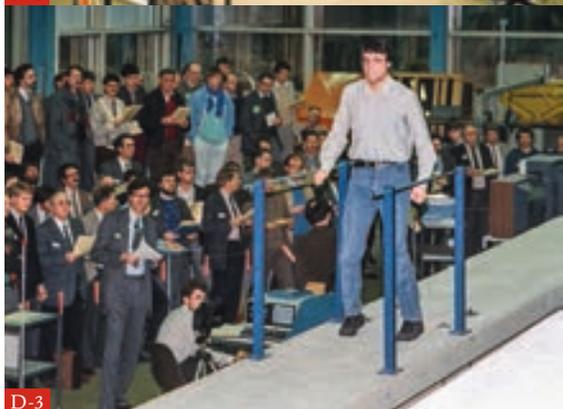


C-11



D-1

D-2



D-3



D-4



D-5

**Gleichgewichts - Differentialgleichung bei Tragwerken**

Statische Lasten:

$$\underline{K} \cdot \underline{x} = \text{Einw.}$$

Dynamische Einwirkungen:

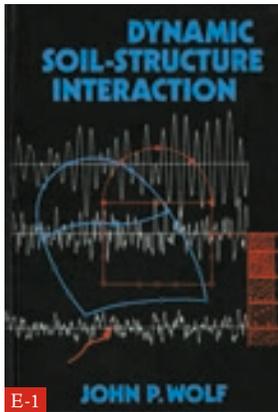
$$\underline{M} \cdot \ddot{\underline{x}} + \underline{C} \cdot \dot{\underline{x}} + \underline{K} \cdot \underline{x} = \text{Einw.}$$

D-6

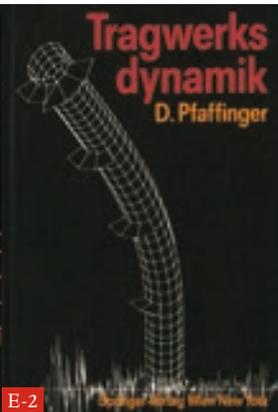
ETH Zürich



D-7



E-1



E-2



E-3

**Methode der Antwortspektren** *5/5*

abgeleitet: ASM  
 RMA (response model analysis)

$P$   $m$   
 $K$  aus  $m, k \rightarrow \omega, \text{res. } \zeta$

$\frac{a}{g}$   
 $\frac{a}{g}$   
 $T$   $\omega$   $P = \frac{a}{g} \cdot a_0 \cdot m$

Bemessungsbasis: Antwortspektrum

Anwendungsbereich:  
 • Bauten grosser Wichtigkeit oder  
 Gefährdungspotential (Stadion,  
 Sporthallen, Hochhäuser, Brücken, Kern,  
 Talsperren).

behandelt in:  
 • Abschnitt 5.4

E-4

**Methode im Zeitbereich** *5/5*

- modale Analyse  
 - direkte Integration

$a$   
 $t$

Bemessungsbasis: Accelerogramme  
 (Strong motion record)

Anwendungsbereich:  
 • Spez. Anforderungen an Anlagen  
 mit hohem Gefährdungspotential  
 für spezif. Ereignis.  
 • Behandlung nichtlinearer Probleme.

behandelt in:  
 • modale Analyse: Abschnitt 5.3  
 • direkte Integration: Abschnitt  
 Rückfragen an J.P. Wolf  
 in D. Pfaffinger

Wir laden ein:  
**Hugo Bachmann's  
 Sechzigster**

Festvorträge und Apéro  
 am Freitag, 22. September 1995  
 im Auditorium Maximum der ETH Zürich

E-5



E-6

## 10.1 Motion Schmidhalter “Gesetzgebung betreffend Erdbebensicherheit”

Am 22.6.1995 hatte Nationalrat Paul Schmidhalter (CVP, VS) die Motion 95.3314 “Gesetzgebung betreffend Erdbebensicherheit” mit folgendem Text eingereicht: “Der Bundesrat wird eingeladen, dem Parlament eine Gesetzgebung betreffend Erdbebensicherheit zu unterbreiten”. Einziger Mitunterzeichner war Nationalrat Simon Epiney (CVP, VS).

In der Begründung der Motion wurden umgehend Massnahmen in folgenden Bereichen verlangt:

### 1. Massnahmen zum Katastrophenmanagement

- Systematische Überprüfung und Verbesserung der organisatorischen Vorbereitungen für den Katastrophenfall Erdbeben.
- Systematische Information der Öffentlichkeit zum Verhalten vor, während und nach einem Erdbeben.
- Bildung interkantonalen Führungsstäbe mit nationaler Koordination.
- Schaffung eines Einsatzfonds für Ereignisanalysen im In- und Ausland.

### 2. Bauliche Massnahmen

- Systematische Überprüfung der Erdbebensicherheit bestehender Bauwerke und Anlageteile nach Dringlichkeitsgruppen.
- Verstärkung von Bauwerken mit ungenügender Sicherheit.

- Unterstützung der Normenarbeit.
- Intensivierung von Forschung, Lehre und Weiterbildung.

### 3. Versicherungstechnische Massnahmen

- Einführung einer Erdbebenversicherung mit Prämienabstufung.

### 4. Raumplanerische Massnahmen

- Raumplanerische Massnahmen für Bauwerksklassen II und III.
- Umfassender Einbezug des Untergrundes in die Bemessung der Bauwerke gegen Erdbeben

### 5. Gesellschaftspolitische Massnahmen

- Erarbeitung eines “Erdbeben-Masterplans” als Grundlage für die Prioritätensetzung bei den Massnahmen.
- Schaffung eines nationalen “Koordinationsgremiums Naturgefahren” (Forschung, Lehre, Politik, Behörden, Planung, Bau, Katastrophenmanagement, Versicherer usw.).

Der Vorstoss wurde am 21.12.1995 noch vor der Behandlung im Nationalrat abgeschrieben, da der Urheber der Motion aus dem Rat ausgeschieden war.

F-1

Un professeur zurichois l'année 2000 des bâtiments publics n'y résisteraient pas.

# Ein Versäumnis wird zum Verhängnis

## Erdbebensicherheit Gefährliche Bauwerke – Eine Untersuchung am Beispiel des Kantons Aargau

Beim nächsten stärkeren Erdbeben in der Schweiz wird uns ein Versäumnis zum Verhängnis werden: die ungenügende Erdbebensicherheit vieler bestehender Bauwerke.

HUGO BACHMANN

Rund ein Fünftel der Bauwerke in der Schweiz ist vermutlich nicht erdbebensicher und deshalb sind die Gebäude für die Bewohner gefährlich. Gestern hat der Aargauer Kantonsrat eine Aussage durch neue Untersuchungen bestätigt.

genügende Erdbebensicherheit aufweisen. Deshalb sind Untersuchungen auf einer zweiten Stufe erforderlich.

**Aargau für die Schweiz symptomatisch**  
Obwohl die 130 untersuchten Gebäude im Kanton Aargau nicht unbedingt repräsentativ für die durchschnittliche Bausubstanz in der Schweiz sind, aufgrund der Unübersichtlichkeit der Gebäude in der Schweiz...

# Séismes: la Suisse aux pieds d'argile

Un bâtiment public sur cinq ne tiendrait pas le coup en cas d'un tremblement de terre important les conséquences économiques? Quelles en seraient les conséquences économiques? Le professeur Hugo Bachmann a mené l'enquête: 20% des bâtiments publics construits dans notre pays n'ont pas une norme de sécurité suffisante. Et c'est en milliards de francs que se chiffreraient les dégâts.

Dr. Hugo Bachmann, Chef der Abteilung für Erdbebenbau und Mitglied der Schweizerischen Eidgenossenschaft, ist Mitarbeiter der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.

F-2

# Zum Geleit

In der Schweiz existiert ein reales Risiko für Erdbeben. Zwar haben solche in den letzten Jahrzehnten keine grossen Schäden verursacht, doch befinden wir uns, mit den Augen der Geologen gesehen, zwischen der europäischen und der afrikanischen Kontinentalplatte. Das schwerste Erdbeben Mitteleuropas im letzten Jahrtausend ereignete sich 1356 in Basel und hat die Stadt grösstenteils zerstört. Ein ähnliches Ereignis würde heute Schäden in ungeahnter Höhe verursachen. Unsere Gebäude und Infrastrukturen wachsen ohne Unterlass weiter, ebenso wie unser Bedürfnis nach Mobilität, Kommunikation und stetigem Austausch.

Der Beitrag der Politik erschöpft sich nur allzu oft darin, den Opfern von Erdbeben Mitgefühl auszudrücken und Hilfe zu leisten. Konkrete Vorschläge, mit denen die Auswirkungen zukünftiger Katastrophen verringert werden könnten, werden im Moment einer Katastrophe zwar diskutiert, doch verebbt das Engagement, und im Laufe der Zeit werden Bemühungen um systematische bauliche Erdbebenvorsorge als Panikmache verlacht. Doch unabhängig vom Auf und Ab politischer und medialer Wellen messen und orten Fachleute seit jeher die Risiken, analysieren frühere Erdbeben, überwachen die Bewegungen der Erdkruste und formulieren Regeln für erdbebensicheres Bauen. Ingenieure wissen, wie gebaut werden muss, damit ein Gebäude bei einem Erdbeben nicht einstürzt, und welche Massnahmen zu treffen sind, um die Schäden einer solchen Katastrophe zu minimieren.

Die politisch Verantwortlichen haben Möglichkeiten, um die Bevölkerung vor Erdbeben zu schützen. Sie müssen nur den seit Langem vorhandenen Erkenntnissen folgen und, wie in anderen Bereichen auch, das Vorsorgeprinzip anwenden. Sie müssen Vorschriften für erdbebensicheres Bauen erlassen, die natürlich den geografischen und geologischen Gegebenheiten der jeweiligen Region angepasst sein müssen. Ein öffentliches oder privates Versicherungssystem, wie wir es für andere Risiken auch kennen, entspräche zudem unserer bestehenden Gesetzgebung ideal. Ein Teil der Versicherungsprämien könnte für Vorsorgemassnahmen gegen Erdbeben eingesetzt werden.

In der Schweiz gibt es seit 1989 Baunormen zur Erdbebensicherheit. Doch rund 80 Prozent aller Gebäude wurden schon vorher gebaut. Ein Inventar über die Sicher-

heit ihrer Gebäude aufzustellen, insbesondere ihrer wichtigsten Infrastrukturen wie Spitäler, Energieversorgungsnetze, Feuerwachen, Staudämme, Kernkraftwerke, drängt sich auf. Fachleute sind sich darüber einig: Erdbeben stellen in der Schweiz wie in verschiedenen Gegenden Europas die grösste Naturgefahr dar, nämlich die, die am meisten zerstören und am meisten kosten würde.

Im vorliegenden Buch stellt der Autor leicht lesbar die Geschichte und Geschichten über die Anfänge der Erdbebenvorsorge in der Schweiz, wichtige Fortschritte und den gegenwärtigen «Stand der Nation» dar. Er beschreibt die politischen Entwicklungen, insbesondere beim Bund und seinen Bauten. Dabei können wir erhebliche Fortschritte feststellen. Sie sollen uns ermuntern, in unserem Land eine Erdbebensicherheit aller Bauten in einer Weise anzustreben, damit sich alle Verantwortlichen im Fall der Fälle keine Unterlassung vorwerfen müssten. Ich danke Prof. BACHMANN und seinen Mitstreitern für ihren Einsatz und wünsche dem Buch eine gute Aufnahme bei der Leserschaft.

Zürich, im Juni 2015

Moritz Leuenberger  
*Bundesrat von 1995 bis 2010*

# Vorwort

*«Als Mensch muss man loslassen,  
als Autor festhalten.»*

---

Erika Burkart

Am 6. Mai 1976 erschütterte ein schweres Erdbeben die Gegend des Friauls südöstlich von Graubünden mit gravierenden Folgen. Das Ereignis wirkte wie ein Paukenschlag: Es erinnerte daran, dass auch die Schweiz jederzeit von katastrophalen Schadenbeben betroffen sein kann. Und es weckte das Interesse von schweizerischen Bauingenieuren für die Wirkungen von Erdbeben auf die gebaute Umwelt – und damit für das Erdbebeningenieurwesen als Wissenschaft und Praxis des erdbebensicheren Bauens. Ebenfalls in den 1970er-Jahren traten bei Bauwerken immer mehr spektakuläre Fälle von Schwingungen auf – verursacht durch Verkehr, rhythmische menschliche Körperbewegungen, rotierende und stampfende Maschinen, Wind oder andere dynamische Einwirkungen. Hier ist die Baudynamik gefragt, die Wissenschaft und Praxis der Bauwerksschwingungen und deren Vermeidung.

Doch beide, das Erdbebeningenieurwesen und die Baudynamik, steckten noch in den Kinderschuhen. Aus bescheidenen Anfängen heraus entwickelte sich ein neues, modernes Fachgebiet der Bauingenieurwissenschaften. Dabei gab es bedeutende Interaktionen zwischen Theorie und Praxis und somit zwischen Forschung, Lehre und erfahrungsreichen Aufgaben und Problemfällen mit innovativen Lösungen.

Mit vermehrtem Wissen und Können der Fachleute ist es aber nicht getan. Für die Durchsetzung in der Praxis braucht es auch allgemein ein erhöhtes Bewusstsein bezüglich der vorhandenen Risiken und insbesondere der Möglichkeiten des erdbebensicheren Bauens. Hier sind eine wirksame Aufklärung durch kontinuierliche Öffentlichkeitsarbeit und die Politik mit ihren Fähigkeiten zur Schaffung wirksamer Rechtsgrundlagen gefordert.

Dieses Buch beschreibt die Entwicklungen in den genannten Bereichen in der Schweiz – und mit zahlreichen Bezügen zu andern Ländern. Im Vordergrund steht das Geschehen in den letzten vier Jahrzehnten bei den gewöhnlichen Bauwerken – vor allem Hochbauten und Brücken. Es sollen jedoch auch frühere Bestrebungen und Pioniertaten, zum Beispiel bezüglich der Erdbebensicherheit von Talsperren und Kernkraftwerken oder im Bereich der Tragwerksdynamik, gewürdigt werden.

Jegliche Geschichtsschreibung enthält stets auch subjektive Wertungen, und dies wohl umso mehr, je geringer die zeitliche und persönliche Distanz ist. Manches

habe ich selbst mitbegründet und mitgestaltet. Daher enthält das Buch auch etliche, oft selbst erlebte Geschichten, es ist somit kein «reines» Geschichtsbuch. Viel eher ist es eine Mischung von «objektiver» Geschichtsschreibung und dem Festhalten persönlicher Erinnerungen. Das Beschreiben von Fakten und das Schreiben von Geschichten war auch ein Akt des Loslassens von engagierten Tätigkeiten, die wesentliche Veränderungen bewirkt haben.

Es ist mir ein grosses Bedürfnis, zu danken: Ohne die Unterstützung von vielen Seiten wäre es nicht möglich gewesen, dieses anspruchsvolle und schliesslich recht umfangreich gewordene «Geschichts- und Geschichtenbuch» zu verfassen. Allen voran danke ich Herrn Dr. THOMAS WENK, der auf unserem gemeinsamen Weg während vielen Jahren als passionierter Fotograf wichtige Ereignisse festgehalten und nun zur Bebilderung dieses Buches entscheidend beigetragen hat. Ihm und Herrn Dr. PIERINO LESTUZZI, Frau Prof. Dr. KATRIN BEYER, Herrn EMIL HONEGGER und weiteren früheren Mitarbeitern und Doktoranden meines Lehrstuhls an der ETH sowie zahlreichen andern, hier nicht genannten Personen und Institutionen, danke ich auch für mannigfache Auskünfte und Recherchen zu oft schon fast versunkenen Geschehnissen. Herrn alt Bundesrat MORITZ LEUENBERGER danke ich für sein wohlwollendes Geleitwort. Ein weiterer Dank geht an die Gastautoren und die Interviewpartner für ihre wertvollen und das Ganze auflockernden Beiträge.

Ein besonderer Dank gebührt der Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (SGEB) als Hauptsponsor und den zahlreichen weiteren Sponsoren für grosszügige finanzielle Beiträge. Den amtierenden und gewesenen Stiftungsräten Herren Dr. MARTIN KOLLER, Dr. DARIO SOMAINI und Dr. MARTIN DEURING sowie dem Geschäftsführer YVES MONDET der Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen danke ich für ihre langjährige Unterstützung und Treue. Dem vdf-Verlag danke ich für das sorgfältige Lektorat und die professionelle Abwicklung bis zur Drucklegung. Und schliesslich danke ich meiner Frau MARGRITH BACHMANN-KOBELT für ihre stete und verständnisvolle Begleitung und Unterstützung, ohne die ich in mehreren schwierigen Phasen nicht durchgehalten hätte.

Dübendorf, im Juni 2015

Hugo Bachmann

# Neues Wissen und Können

Anfänge und Entwicklungen von Lehre und Forschung in Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen an der ETH Zürich, der EPF Lausanne und an Fachhochschulen

*Die Tragwerke werden leichter und schwingungsanfälliger, und auch das mögliche Auftreten von starken Erdbeben sollte nicht mehr länger ignoriert werden. Doch in der Schweiz gibt es kein Wissens- und Kompetenzzentrum zu diesen Themen. «Also schaffen wir es!» Das war kein rascher Entschluss. Der Beginn war langsam und beschwerlich, die Fortsetzung jedoch stetig und beharrlich. Ab 1978 entstehen an der ETH Zürich neuartige Vorlesungen, Fortbildungskurse, Labordemonstrationen, Lehrbücher, Forschungsprojekte, Grossversuche, Computerprogramme, Dissertationen – und manch anderes mehr. Ab dem Jahr 2000 geschieht Ähnliches an der EPF Lausanne und später auch an einzelnen Fachhochschulen.*

## Neuartige Fragen ...

In den frühen 1970er-Jahren kamen aus der Praxis, meist von Ingenieuren oder auch von Bauherren – vorerst vereinzelt, aber schliesslich immer mehr – Fragen zum dynamischen Verhalten von Bau- und Tragwerken und zu deren Sicherheit an die ETH: Schwingungsprobleme und Erdbebenprobleme. Wenn man als Ingenieur nicht mehr weiter wusste, suchte man Rat. Und da lag es nahe, sich an die Alma Mater zu erinnern. Wer weiss, vielleicht gibt es dort jemanden, der sich mit Fragen zu diesen, noch als ziemlich exotisch empfundenen Gebieten schon in wissenschaftlicher Weise befasst hat.

Um was ging es? Die Bau- und Tragwerke waren schwingungsanfälliger geworden. Immer öfter kam es vor, dass bald nach der Inbetriebnahme eines Bauwerks störende oder gar als gefährlich empfundene Schwingungen auftraten. Ursachen waren Einwirkungen aus Verkehr, rhythmischen menschlichen Körperbewegungen, rotierenden und stampfenden Maschinen, Wind usw. Die Bauwerke wurden «lebendiger» – im englischen Sprachgebrauch war bald von «lively structures» die Rede. Die grössere Schwingungsanfälligkeit hing vor allem mit modernen und meist schlankeren Bauweisen zusammen, wobei die Tragwerke aber nach wie vor nur für statische Lasten bemessen worden waren. Hauptsächliche Fragen waren: Was kann gegen die Schwingungen vorgekehrt werden? Hätte es bauliche oder andere Massnahmen gegeben, die Schwingungen von vornherein zu vermeiden? Hätte man zusätzlich zur «statischen» Bemessung eine «dynamische» Bemessung durchführen müssen?

*Die Bauwerke wurden «lebendiger» – es war bald von «lively structures» die Rede.*

*Was passiert eigentlich bei einem Erdbeben?*

Und auch Erdbebenprobleme: Fragen zur Einwirkung von Erdbeben auf Bauwerke und zur entsprechenden Sicherheit – lange Zeit kaum gestellt – tauchten vermehrt auf. Wüste Schadenbilder von Erdbeben im Ausland machten in den Medien zunehmend die Runde; dabei waren auch moderne, für Schwerelasten als statische Lasten gut konstruierte Bauwerke betroffen. Da und dort erinnerte man sich daran, dass in früheren Zeiten auch in der Schweiz Schadenbeben aufgetreten waren. Übliche Fragen waren etwa: Was für konzeptionelle und konstruktive Massnahmen könnten nützlich sein? Braucht es eine – aufwendige und schwierig durchzuführende – dynamische Bemessung für beziehungsweise gegen Erdbeben? Nur bei speziellen oder gar bei allen neuen Bauwerken? Und mehr grundsätzlicher Art: Was passiert eigentlich bei einem Erdbeben? Was passiert im Boden und was passiert bei den Bauwerken?

### ... und ein anspruchsvolles Ziel

*Ich interessierte mich zeitlebens für knifflige Fragen und Probleme, bei denen man nicht mehr weiter wusste.*

Meine älteren Professorenkollegen im Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK) der ETH waren mit anderweitigen Interessen und Verpflichtungen bereits stark belegt. Ich verstand zwar von der Tragwerksdynamik kaum etwas, das sozusagen über den Einmassenschwinger hinausging, und schon gar nichts von Erdbebenfragen. Doch interessierte ich mich zeitlebens für knifflige Fragen und Probleme, bei denen man nicht mehr weiter wusste, die einerseits theoretisch anspruchsvoll waren und andererseits das Denken und die Erfahrung des Ingenieurs auf konstruktivem Gebiet – dem Entwerfen und Konstruieren von Bau- und Tragwerken und deren Einzelheiten – erforderten. Das war schon in meiner früheren Tätigkeit im Planungs- und Entwicklungsbüro, dem sogenannten P- und E-Büro, der Firma Stahlton AG so gewesen, wo mich immer wieder solche Fragen erreichten. Nun keimte bald einmal die Idee, in das damals noch wenig entwickelte Wissenschaftsgebiet «Tragwerke unter dynamischen Einwirkungen» einzusteigen und schliesslich mitzuhelfen, es voranzutreiben. Dabei spielte die Motivation, Neues zu lernen, eine zentrale Rolle.

*Es ging darum, eine problemorientierte und anwendungsbezogene Baudynamik zu entwickeln.*

Ein bedeutender Aspekt war folgender: Es gab zwar schon seit einiger Zeit die klassische Schwingungslehre der Mechanik, einem wesentlichen Teilgebiet der Physik, wie sie Professor HANS ZIEGLER in seinen Vorlesungen an der ETH auf meisterhafte Weise darbot [1]<sup>1)</sup>, oder das hervorragende Buch «Dynamik der Baukonstruktionen» von Professor VLADIMIR KOLOUSEK von der Technischen Hochschule in Prag [2]. Diese Werke boten wichtige Grundlagen, sie pflegten jedoch eine stark theoretisch-analytisch orientierte Tragwerksdynamik – und hörten sozusagen auch mit dieser auf. Daher konnten die Bauingenieure nicht viel damit anfangen. Es fehlte gewissermassen der zweite und ebenso wichtige Teil, der Bezug zu den Realitäten, zu den wirklichen Problemen. So stellte ich mir die Aufgabe, in Forschung und Lehre die theoretische Tragwerksdynamik mit den Phänomenen und Erfordernissen in der praktischen Wirklichkeit zu verbinden. Es ging darum, eine problemorientierte und anwendungsbezogene Baudynamik zu entwickeln und den bisher nur «statisch» denkenden Bauingenieuren schmackhaft zu machen.

1) Allgemeine Referenzen [...] und Tabellen siehe am Schluss des Kapitels.

## 1.1 1973–1982: EINSTEIGEN, FRAGEN UND WAGEN

*Am Anfang stehen Neugier und Interesse für das Schwingungs- und Erdbebenverhalten von Bauwerken, unkonventionelles Hinterfragen von dem, was alle anderen sagen, erste experimentelle Eigenentwicklungen und Forschungsprojekte sowie schliesslich der Mut, eine Vorlesung zum erdbebensicheren Bauen anzukündigen.*

### «Aufwärmen» an der ersten teilweise vorgespannten Leichtbetonbrücke

Im Rahmen von ersten Forschungsprojekten hatte ich mich ab 1970 mit der Theorie und der konstruktiven Durchbildung von teilweise vorgespannten Tragwerken sowie mit der Materialtechnologie und ersten Anwendungen von konstruktivem Leichtbeton befasst und entsprechende Berichte publiziert. Darauf basierend wurde 1973 bei Schaffhausen die weltweit erste teilweise vorgespannte Leichtbetonbrücke gebaut. Dies geschah unter der Ägide des damaligen Kantonsingenieurs KURT SUTER, dem späteren Direktor des Bundesamtes für Strassen- und Flussbau (ASF), und gemäss dem Projekt des Zürcher Ingenieurs KLAUS WEHRLI. Die dreifeldrige Rahmenbrücke von 120 m Länge war bezüglich Vorspanngrad und Beton-technologie eine gänzlich neuartige Konstruktion. Als beauftragter Experte begleitete ich die Planung und die Ausführung des originellen und gut gestalteten Bauwerks (Bild 1-1).

Die Brücke sollte vor der Inbetriebnahme durch eine übliche «statische» Belastungsprobe geprüft werden. Ich schlug vor, zusätzlich eine frequenzgesteuerte Schwingungserregung und somit auch eine «dynamische» Belastungsprobe durchzuführen. Vorbild waren die Schwingungsversuche der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) unter der Leitung von Dr. ALFRED RÖSLI an der zum Abbruch bestimmten Brücke Opfikon [3]. Auch bei der Leichtbetonbrücke wurden die Schwingungen durch einen auf der Fahrbahn im Mittel- und

*Die Versuche dienten der Annäherung an die uns noch wenig vertraute «dynamische» Materie.*



**Bild 1-1:** Die dynamisch geprüfte, weltweit erste teilweise vorgespannte Leichtbetonbrücke bei Schaffhausen.

Randfeld der Brücke angesetzten Unwuchterreger erzeugt. Sie führten zu ausgeprägten Resonanzkurven. Anschliessend versuchten wir, diese an dynamischen Stabmodellen nachzurechnen. Dabei ergaben sich wichtige Erfahrungen bezüglich der Modellbildung und der Annahmen für die Dämpfung [4]. Bei solchen Versuchen mit zugehörigen Auswertungen und Nachrechnungen handelte es sich noch nicht um kreative Forschungsprojekte. Doch sie dienten der Annäherung an die uns noch wenig vertraute «dynamische» Materie und waren – rückblickend gesehen – wertvolle «Aufwärmübungen» im anspruchsvollen Gebiet der praktischen Baudynamik.

### Ein servohydraulischer Schwingungserreger

*Die Eigenentwicklungen des servohydraulischen Schwingungserregers und der Messgrössenaufnehmer waren eine Weltpremiere.*

1975 begannen wir mit vorsichtigen Gehversuchen in der experimentellen Dynamikforschung. Unser erstes Forschungsprojekt hatte den Titel «Dynamisches Verhalten von Leichtbeton- und Betonkonstruktionen» (1)<sup>2)</sup>. Dabei ging es um den Einfluss der Betonart, der Rissbildung und des nichtlinearen Verhaltens bis zur Fließgrenze der Biegebewehrung auf die dynamischen Kenngrössen Dämpfung, Amplituden und Eigenfrequenzen {1}<sup>3)</sup>. Für die Schwingungsversuche an 8 m langen Balken wurden durch den Laborchef MARKUS BAUMANN und den begabten Mechaniker KURT BUCHER zuerst neuartige Belastungs- und Messeinrichtungen entwickelt [5]. Innovatives Kernstück war ein neuartiger, elektronisch gesteuerter, servohydraulischer Schwingungserreger (Bild 1-2). Er erlaubte – im Gegensatz zu den bisher gebräuchlichen Unwuchterregern mit frequenzabhängigen Kräften –, in einem weiten, baudynamisch interessanten Frequenzbereich innerhalb bestimmter Grenzen beliebige dynamische Kräfte aufzubringen. Zur Registrierung von Stahl- und Betondehnungen dienten speziell konzipierte Messgrössenaufnehmer für die Aufzeichnung des zeitlichen Ablaufs als auch von Spitzenwerten. Diese Eigenentwicklungen des servohydraulischen Schwingungserregers und der Messgrössenaufnehmer waren eine Weltpremiere; beide wurden später an der EMPA und durch andere Laboratorien nachgebaut.

### Flucht aus der schwingenden Turnhalle

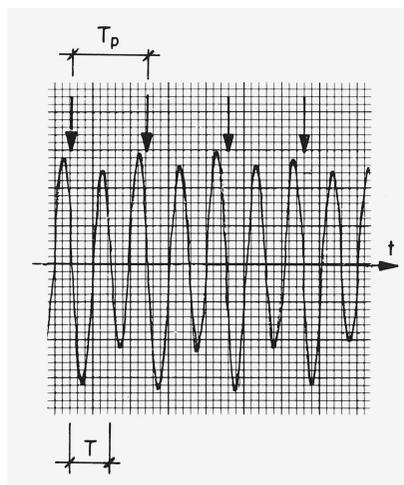
Im Frühjahr 1977 erhielt ich den Anruf eines besorgten Liegenschaftsverwalters. Bei der soeben in Betrieb genommenen doppelstöckigen Turnhalle einer Sportanlage in Zürich-Fluntern traten starke Schwingungen auf, wenn in der oberen Halle mit grösseren Gruppen zu rhythmischer Musik moderne Konditionstrainings, das heisst Lauf-, Hüpf- und Sprungübungen, durchgeführt wurden. Die Schwingungen äusserten sich vor allem in der unteren Halle durch sichtbare Durchbiegungen der durch die Turnenden direkt belasteten Zwischendecke, durch horizontale Fassadenbewegungen und durch einen erheblichen Lärm, hervorgerufen durch das Mitschwingen und Klappern von Ausstattungsteilen und Turngeräten. Und bei geöffneter Eingangstüre konnte ein starker rhythmischer Luftzug infolge Kompression und Dekompression des Hallenvolumens verspürt werden. Diese Wirkungen führten dazu, dass immer wieder Personen die untere Halle fluchtartig verliessen, wenn in der oberen Halle Konditionstrainings durchgeführt wurden [6].

2) Forschungsprojekte (...) siehe Tabelle 1-2.

3) Referenzen von Basispublikationen zu Forschungsprojekten {...} siehe Tabelle 1-1.



**Bild 1-2:** Der neuartige servohydraulische Schwingungserreger im Einsatz bei dynamischen Versuchen an Leichtbetonbalken.



**Bild 1-3:** «Stoss der Hüpfenden in jedes zweite Wellental der Bauwerksschwingung» bei der Turnhalle Zürich-Fluntern.

Ich zögerte nicht lange und schlug vor, systematische dynamische Versuche und entsprechende Messungen durchzuführen. Bis zu 130 Studenten und Studentinnen mussten rhythmisch hüpfen und laufen. Dabei wurde die Hüpf- und Lauffrequenz mithilfe eines Metronoms, das sonst meiner Tochter beim Cellospiel diente, vorgegeben und über Lautsprecher verstärkt. Die Decke ging sichtbar hoch und nieder, und hätte ich aus Vorberechnungen nicht gewusst, dass keine unmittelbare Einsturzgefahr bestand, hätte ich ebenfalls die Flucht ergriffen.

*Hätte ich aus Vorberechnungen nicht gewusst, dass keine unmittelbare Einsturzgefahr bestand, hätte ich ebenfalls die Flucht ergriffen.*

### Ein Phänomen entdeckt – und auch erklärt

Die stärksten Bauwerksschwingungen mit Beschleunigungen bis zu  $5.1 \text{ m/s}^2$  traten bei Anregung durch Hüpf- und Lauffrequenzen von 2.45 Hz auf; die Grundfrequenz der Bauwerksschwingung betrug jedoch 4.9 Hz, das heisst das Doppelte der Anregungsfrequenz. Vorerst waren wir perplex und ratlos, hatte man doch immer gemeint, Resonanzschwingungen bei Bauwerken würden nur dann auftreten, wenn die Anregungsfrequenz gleich der Bauwerksfrequenz ist. Doch noch auf dem Platz fiel mir eine anschauliche Erklärung ein: «Stoss der Hüpfenden in jedes zweite Wellental der Bauwerksschwingung» (Bild 1-3). Später konnte ich dann mithilfe der mathematischen Fourier-Zerlegung des Zeitverlaufs der dynamischen Einwirkung auch eine theoretische Erklärung finden: «Anregung der Grundschwingung des Bauwerks durch Resonanz mit der zweiten Harmonischen des zeitlichen Verlaufs der dynamischen Einwirkung». Diese Erklärung war einfach und einleuchtend, und – wie oft in Fällen neuer Erkenntnisse – man war geneigt,

*Noch auf dem Platz fiel mir eine anschauliche Erklärung ein.*

auszurufen «Das ist ja klar!». Aber damit war ein Phänomen entdeckt und erklärt – ich nannte es den «Fluntereffekt» –, das unseres Wissens vorher noch nie in dieser Weise konkret beobachtet und in der Literatur beschrieben oder gar in Normen berücksichtigt worden war.

### Der Dämpfung auf der Spur

Schon bald nachdem ich begonnen hatte, mich intensiver mit Schwingungsproblemen zu befassen, kam die klassische Gleichgewichtsgleichung der Dynamik in Matrizenschreibweise ins Blickfeld:

$$[M] \cdot \{\ddot{x}\} + [C] \cdot \{\dot{x}\} + [K] \cdot \{x\} = -[M] \cdot \{e\} \cdot \ddot{x}_g(t)$$

*Warum sollte die Dämpfungskraft proportional zur Geschwindigkeit sein?*

Dass es – von links nach rechts – einen Massenterm, einen Dämpfungsterm, einen Steifigkeitsterm und einen Einwirkungsterm gibt, leuchtete ein. Auch dass die Massenkraft als Trägheitskraft proportional zur Masse und zur Beschleunigung  $\ddot{x}$  und die Steifigkeitskraft proportional zum Weg  $x$  ist, war plausibel. Aber warum sollte die Dämpfungskraft proportional zur Geschwindigkeit  $\dot{x}$  sein? Bei einer Flüssigkeitsdämpfung – von dort stammt der Ansatz ursprünglich, eine sogenannte viskose Dämpfung – mochte das wohl stimmen, aber bei einem Tragwerk aus Stahlbeton oder Stahl? Unsere ersten Erfahrungen bei schwingenden Strukturen nährten ernsthafte Zweifel. Erkundigungen bei Kollegen, die an der Entwicklung von Computerprogrammen für dynamische Berechnungen beteiligt waren, führten nur zur lapidaren Antwort «Das hat man schon immer so gemacht». Es war aber wirklich erstaunlich, dass offenbar noch niemand diesen Ansatz hinterfragt hatte. Das umso mehr, als die Schwingungsamplituden invers proportional zur Dämpfung sind – je grösser die Dämpfung, desto kleiner die Auslenkungen. Ein weiteres Argument, vielleicht das Hauptargument, war, dass sich mit diesem Ansatz bei einem Mehrmassenschwinger die verschiedenen Eigenformen entkoppeln und je einzeln als Einmassenschwinger behandeln lassen. Tatsächlich war dieser Ansatz, wonach die Dämpfungskraft proportional zu einem Dämpfungskoeffizienten und zur Schwinggeschwindigkeit ist, für Berechnungen sehr bequem. Aber entsprach er auch der Wirklichkeit?

*Bei altbekannten Ansätzen reizte uns immer wieder die Frage «Stimmt das eigentlich?».*

Bei manchen Forschungsarbeiten reizte uns bei altbekannten Ansätzen und scheinbar feststehenden Erkenntnissen immer wieder die Frage «Stimmt das eigentlich? Ist es wirklich so?». Bei der Dämpfungsfrage war eine solche «Unverfrorenheit» ausgesprochen erfolgreich. Im Forschungsprojekt <sup>(1)</sup> mit Schwingungsversuchen an Stahlbetonbalken stellten wir bald fest, dass die Dämpfung mit zunehmender Schwingungsamplitude stark abnimmt – das Gegenteil von dem, was bis anhin in der Literatur überall angenommen wurde <sup>{1}</sup>. In der Dissertation von RUDOLF DIETERLE <sup>{3}</sup> gelang es dann, ein Dämpfungsmodell zu entwickeln, das die Wirklichkeit gut erfasst; es zeigte auf, dass für das Dämpfungsverhalten vor allem Reibungsdämpfung beim Zusammenwirken von Stahl und Beton in der gerissenen Zugzone massgebend ist <sup>[7]</sup>. Es war dies die erste Dissertation an der ETH auf dem Gebiet der problemorientierten Baudynamik (Tab. 1-3).

## Warum mit Leichtbeton?

Unsere ersten Arbeiten auf dem Gebiet der Baudynamik, sowohl die Versuche an der Brücke in Schaffhausen als auch die Forschungsprojekte (1) und (2), hatten mit Tragwerken aus Leichtbeton zu tun. Zu Beginn der 1970er-Jahre war konstruktiver Leichtbeton mit Zuschlagstoffen aus Blähton und konventionellem Sand ein neuartiger Baustoff. Gegenüber normalem Beton mit Kies als Zuschlagstoff und etwa gleicher Festigkeit hat er ein um gegen einen Drittel reduziertes Raumgewicht, eine entsprechend kleinere Masse und einen ähnlich verringerten Elastizitätsmodul. An meinem Lehrstuhl hatten wir ab 1970 statische Biege- und Schubversuche und auch Langzeitversuche an teilweise vorgespannten Leichtbetonbalken durchgeführt. Dabei zeigten sich im Vergleich zum Verhalten von analogen Tragwerken aus Normalbeton keine grundlegenden Unterschiede. Bezüglich Schwingungen konnte jedoch vor allem wegen der kleineren Masse eine grössere «Lebendigkeit» von Leichtbetontragwerken erwartet werden. Während die Eigenfrequenzen sich nicht wesentlich ändern, sind bei gleichem Energieeintrag durch eine dynamische Anregung grössere Amplituden zu erwarten. Zudem war über das Dämpfungsverhalten solcher Konstruktionen noch kaum etwas bekannt. So war es naheliegend, bald einmal Fragen des Schwingungs- und Erdbebenverhaltens von Leichtbetontragwerken anzugehen und auch dort womöglich den Vergleich zu Normalbeton zu suchen.

*Wegen der kleineren Masse konnte eine grössere «Lebendigkeit» von Leichtbetontragwerken erwartet werden.*

## Erste Schritte im Erdbebeningenieurwesen

Dass Erdbeben rasche Bodenbewegungen sind, die Bauwerke in Schwingungen versetzen, und dass die Bauwerke, je nach ihren Eigenfrequenzen, dabei enorm grosse oder auch nur sehr kleine Verformungen und Beanspruchungen erfahren können, erscheint heute als Selbstverständlichkeit. Das war aber lange nicht so. Das Erdbebeningenieurwesen – die Wissenschaft und Praxis des erdbebensicheren Bauens – war in den frühen 1970er-Jahren in Europa und insbesondere in der Schweiz noch kaum bekannt und steckte im Vergleich zu den – auch wegen den Anwendungen im Kernkraftwerksbau – führenden USA noch in den Kinderschuhen. Ein tieferes Verständnis zur Frage, was bei einem Erdbeben wirklich geschieht, konnte erst durch jahrelanges, intensives Befassen mit der Materie entwickelt werden. Anfänglich ging es vor allem um den Nachvollzug bestehender Modelle und Berechnungsverfahren. Nur nach und nach entstanden eigene Ideen für neue Modellbildungen. Ähnliches gilt für den auch die Gefühlsebene ansprechenden «Erdbebenblick» bei der Betrachtung von im Bau befindlichen neuen oder von bestehenden Bauten. Das Urteilsvermögen war während längerer Zeit noch nicht wirklich entwickelt.

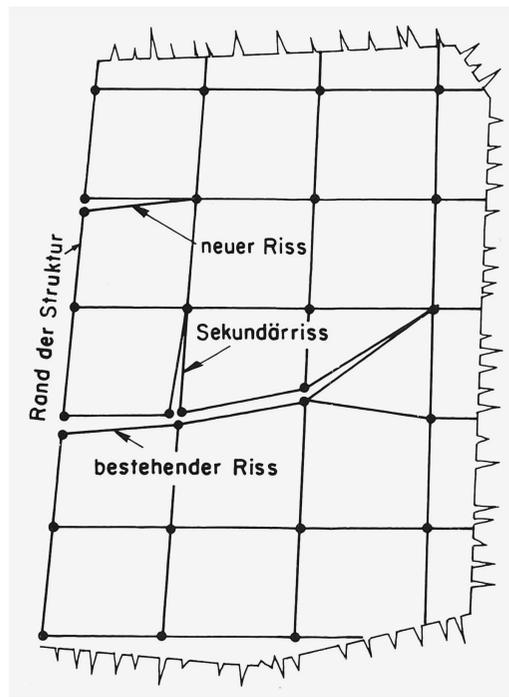
*Ein tieferes Verständnis, was bei einem Erdbeben wirklich geschieht, konnte erst durch jahrelanges, intensives Befassen mit der Materie entwickelt werden.*

So mussten wir uns Schritt für Schritt in ein vorerst noch unbekanntes Wissensgebiet einarbeiten; auch hier, ähnlich wie im Bereich der Schwingungsprobleme, gab es einen wesentlichen «Aufwärmbedarf». 1975 begannen wir mit dem Forschungsprojekt (2). Dessen Hauptzweck bestand darin, uns mit gängigen Berechnungsverfahren und – weltweit gesehen – neueren Normen vertraut zu machen. Die Arbeiten führten schliesslich zu der aus späterer Sicht recht harmlos erscheinenden Publikation {2}.

## Diskrete Rissmodellierung in Staumauern

*Die Berechnungsverfahren hatten sich dank der Methode der Finiten Elemente erheblich verfeinert.*

Nach dem Friaul-Erdbeben 1976 (s. Bild 2-1) wurden auch in der Öffentlichkeit vermehrt Fragen zur Erdbebensicherheit der schweizerischen Staumauern gestellt. Die oft riesigen, in den 1950er- und 1960er-Jahren errichteten Bauwerke waren in der Regel mit einer Ersatzkraft entsprechend einem seismischen Koeffizienten von 0.1 statisch bemessen worden. Inzwischen hatten sich die Kenntnisse erweitert und die Berechnungsverfahren dank der Methode der Finiten Elemente erheblich verfeinert, und lineare dynamische Berechnungen im Zeitbereich waren möglich geworden. Das für die Aufsicht über die Staumauern zuständige Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW) begann, sich auch für nichtlineare Berechnungsverfahren zu interessieren, und bald entstand das Forschungsprojekt (4). Es hatte zum Ziel, in Schwergewichtsmauern die Entstehung und Ausbreitung von Rissen und deren Schliessen und Wiederöffnen während eines Erdbebens im Zeitbereich näherungsweise zu erfassen. Dies gelang durch eine neuartige, sogenannte diskrete Rissmodellierung [8]. Wenn die Zugspannung die Zugfestigkeit des Betons überschreitet, werden Knoten verschoben, Elemente geteilt, ein Risselement mit Simulation der Verzahnung eingeschoben und die Elementmatrizen entsprechend angepasst (Bild 1-4). Diese neuartige Modellbildung wurde in der Dissertation von PETER SKRIKERUD {9} eingehend dargestellt.



**Bild 1-4:** Simulation der Rissbildung im Finite-Elemente-Netz von Staumauern.

## Ein Lehr- und Lerntipp von Hans Ziegler

Prof. Dr. HANS ZIEGLER verdanke ich viel. In seinen Mechanikvorlesungen für Ingenieure, Physiker und Mathematiker in der Mitte der 1950er-Jahre an der ETH Zürich hat er uns Studenten fundamentale Einsichten und ein tieferes Verständnis von grundlegenden Zusammenhängen sowie entsprechende Fähigkeiten vermittelt. Davon habe ich sozusagen ein Leben lang gezehrt und profitiert. H. ZIEGLER war damals einer der profiliertesten und weltweit bekanntesten Professoren der ETH. Im Fachgebiet Mechanik – grundlegend für viele Disziplinen der technischen Wissenschaften – war er einsame Weltspitze, umworben von den besten Universitäten der Welt. Seine Lehrbücher [9] sind von grosser Klarheit und begrifflicher Prägnanz, und auch seine Vorlesungen hat er jeweils gründlich vorbereitet und überzeugend vorgetragen. Auf der Webseite [10] gibt es dazu faszinierende Geschichten.

*H. Ziegler war einer der profiliertesten und weltweit bekanntesten Professoren der ETH.*

In meiner späteren Tätigkeit als ETH-Professor war mir HANS ZIEGLER in didaktischer Hinsicht ein stets leuchtendes Vorbild. Natürlich erreichte ich in meinen Vorlesungen nie seine Klarheit und Prägnanz. Aber ich verdanke ihm noch etwas ganz anderes, fast noch Wichtigeres. Rund anderthalb Jahrzehnte nach dem «Genuss» der Mechanikvorlesungen war ich 1969 – nach Lehr- und Wanderjahren in der Praxis sowie einer glücklich gelungenen und weit herum bekannt gewordenen Dissertation zur Anwendung der Plastizitätstheorie auf Stahlbetontragwerke – im Alter von erst 34 Jahren als Assistenzprofessor für Massivbau an die ETH berufen worden. Damit war ich zum Junior-Kollegen meines verehrten Lehrers mutiert. Und ich empfand es als grosse Ehre, dass er mir eines Tages das Du antrug. Bei einem Anlass diskutierten wir zusammen über die Notwendigkeit des ständigen und lebenslangen Lernens der Professoren und über die Möglichkeit, allenfalls auch neue Lehr- und Forschungsgebiete anzupacken. Dabei sagte HANS ZIEGLER in seiner bekannten, direkten Art: «Wenn du etwas wirklich Neues lernen willst, musst du eine Vorlesung ankündigen über ein Thema, von dem du noch nichts weisst. Aber dann weisst du, was du zu tun hast!» Bald gab es eine Gelegenheit, diesen aussergewöhnlichen Ratschlag zu befolgen.

*«Du musst eine Vorlesung ankündigen über ein Thema, von dem du noch nichts weisst. Aber dann weisst du, was du zu tun hast!»*

## Ein gewagter Schritt

Im Sommersemester 1978 hatte mein verehrter Doktorvater und späterer Kollege Professor BRUNO THÜRLIMANN ein Sabbatical, ein Urlaubssemester. Trotz bereits grosser Unterrichtsbelastung erklärte ich mich bereit, eine seiner Vorlesungen stellvertretend zu übernehmen. Es war dies «Baustatik AK» (Ausgewählte Kapitel der Baustatik) mit 2V und 1U, das heisst zwei Wochenstunden Vorlesung und eine Wochenstunde Übungen im 8. und damals letzten Studiensemester an der Abteilung für Bauingenieurwesen, Vertiefungsrichtung Konstruktion. Hier musste nicht ein ganz bestimmter Stoff vermittelt werden, er konnte frei gewählt und auch variiert werden. In dieser Situation war der Ratschlag von Kollege HANS ZIEGLER eine ganz besondere und enorm wertvolle Ermutigung. So schrieb ich bei der konkreten Angabe des Vorlesungsthemas «Einführung in die Erdbebensicherung von Bauwerken». Nun wusste ich eben, was ich zu tun hatte! Das war im Spätherbst 1977. Es blieben also gerade noch etwa vier Monate, um mich in die mir noch wenig vertraute Materie einzuarbeiten, den Stoff auszuwählen, zu strukturieren und das

*Hans Ziegler sei Dank!*

Vorlesungsmanuskript vorzubereiten. Das wurde zu einem fast unglaublichen Rennen gegen die Zeit, mit sehr viel Nacharbeit. Eigentlich war diese Ankündigung ein sehr gewagter Schritt, und nun wurde daraus auch ein im wahrsten Sinne des Wortes «zwingender» Vorgang. Doch insgesamt: HANS ZIEGLER sei Dank!

### Die erste Erdbebenvorlesung

Im Jahresbericht des IBK 1977/1978 [11] steht unter «Baustatik AK» die folgende Inhaltsangabe:

*«Einführung in die Erdbebensicherung von Bauwerken.  
Seismologische Grundlagen: Ursachen und Erklärungsmodelle, Skalen,  
Registrierung, Bodenbewegungsgrössen, Antwortspektren, Bemessungserdbeben.  
Berechnungsmethoden: Eigenwertproblem, Antwortspektrums-Methode,  
Zeitverlauf-Methode, Berücksichtigung plastischer Verformungen.  
Konstruktive Massnahmen: Grundrissformen und Tragsysteme, Schubwände,  
Foundationen, Brücken, konstruktive Einzelheiten verschiedener Bauweisen,  
Stand verschiedener Normen, Bemessung und Sicherheitsprobleme. Erddämme,  
Staumauern.»*

*Im Sommersemester  
1978 war die erste  
Vorlesung im Erdbeben-  
ingenieurwesen an der  
ETH Zürich.*

Wegen der vielen laufenden andern Verpflichtungen war es mir nicht möglich, die ganze Vorlesung in allen Einzelheiten vollständig selbst zu erarbeiten und vorzutragen. Gemäss dem zur Selbstkontrolle stets geführten Arbeitsrapport wendete ich vom 3. Februar bis zum 26. Juni 1978 insgesamt rund 140 Stunden auf für den Entwurf meiner Vorlesungsteile. Zum Glück hatte ich auch Unterstützung durch tüchtige Mitarbeiter. Dr. MARTIN WIELAND, Oberassistent an meinem Lehrstuhl (s. 11), übernahm das relativ grosse Kapitel Berechnungsmethoden und damit rund die Hälfte der Vorlesung. Und er war auch für die Übungen zuständig. Es handelte sich um eine ausgesprochen günstige Konstellation und erlaubte ein kreatives Arbeiten im Verbund, wir hatten beide einen jederzeit ansprechbaren Diskussionspartner.

Die Vorlesung im Sommersemester 1978 – es war die erste Vorlesung im Erdbebeningenieurwesen an der ETH Zürich (s. 12) – wurde durch rund 50 Studenten besucht, und 45 absolvierten die Übungen vollständig – ein schöner Anfangserfolg. Erst kürzlich erzählte mir ein später sehr prominent gewordener Student von seinen Erinnerungen an diese Unterrichtsveranstaltung – und auch an die entsprechende Prüfung – über ein damals in der Schweiz noch ziemlich exotisches Thema.

### Unentbehrliche Wandtafel

*«Wenn man nicht nur  
sieht und hört, sondern  
auch selbst formuliert  
und schreibt, lernt man  
viel rascher und besser.»*

In den 1970er-Jahren gab es in den Hörsälen noch keine Hellraumprojektoren und schon gar keine Beamer. Die von den Dozenten benutzten Medien waren fast ausschliesslich das gesprochene Wort und Notizen an der Wandtafel. Hie und da wurde auch ein Diaprojektor benützt, der immerhin zur Standardausrüstung der grösseren Auditorien gehörte. Bei Semesterbeginn erteilte ich meinen Studenten jeweils eingehende Ratschläge zu deren Arbeits- und Lerntechniken. Vor allem forderte ich sie auf, in klassischer Weise sich Notizen zu machen. Die von meinem

Kollegen Prof. Dr. HARDY FISCHER übernommene These war: «Wenn man nicht nur sieht und hört, sondern auch selbst formuliert und schreibt, lernt man viel rascher und besser. Je mehr Sinne aktiviert werden, desto intensiver ist der Lernprozess!»

Doch das aufmerksame Hören und das gleichzeitige Formulieren und Notieren des vorher Gehörten will gelernt sein, man beherrscht diese intellektuell anspruchsvolle Technik erst nach längerer Übung. Um den Studenten das Mitschreiben etwas zu erleichtern, teilte ich jeweils zu Beginn der Stunde – es waren netto rund 40 Minuten – die beiden grossen Wandtafeln in zieglerscher Manier in sechs gleich grosse Felder ein und füllte sie kontinuierlich. In meinen noch vorhandenen ersten, stets handgeschriebenen Vorlesungsmanuskripten [12] war wortgenau vorbereitet und vermerkt, was ich während den mündlichen Erklärungen an die Tafel schreiben und zeichnen wollte. Sofern die Studenten mindestens das notierten, was dort stand, hatten sie ein gutes «Gerüst», und mindestens die Geschickteren unter ihnen konnten es noch durch Selbstformuliertes ergänzen.

### Fest in den Studienplan

Nachdem die Erdbebenvorlesung 1978 im Rahmen von «Baustatik AK» als Versuch erfolgreich gewesen war und das Thema ohnehin vermehrt in der Luft lag, entstand die Idee, sie als festes Lehrangebot zu installieren. Dazu waren sorgfältige Abklärungen und Gespräche mit den «Alphatieren» unter meinen Professorenkollegen erforderlich. Eine zusätzliche Vorlesung schuf vermehrte Konkurrenz um die Gunst der Studenten bei der Auswahl der Unterrichtsveranstaltungen im Rahmen der zu belegenden Minimalstundenzahl – je mehr angebotene Vorlesungen, desto weniger Studenten pro Vorlesung. Nicht überall war man erfreut, und teilweise wurde das Thema im Sinne von «Erdbeben in der Schweiz?» infrage gestellt oder hintenherum gar verspöttelt. Doch nach einiger Überzeugungsarbeit stellte ich im Oktober 1978 den offiziellen Antrag zuhanden von Abteilungskonferenz und Abteilungsrat, im 8. Semester des Normalstudienplanes Bauingenieurwesen eine neue Wahlfachvorlesung «Erdbebensicherung von Bauwerken» einzuführen, erstmals auf das Sommersemester 1979. Gleichzeitig sollte ein Lehrauftrag für eine Wochenstunde Vorlesung an Dr. MARTIN WIELAND erteilt werden. Dabei argumentierte ich auch mit dem Hinweis, dass vermehrt Schweizer Ingenieurfirmen im Ausland Erdbebenprobleme bearbeiten müssten. Die Anträge wurden schliesslich ohne grössere Opposition angenommen und an den Präsidenten der ETH und von dort zum Schweizerischen Schulrat als Oberbehörde von ETHZ und EPFL weitergeleitet, der damals noch sämtliche Änderungen von Normalstudienplänen genehmigen musste.

*Ich argumentierte auch mit dem Hinweis, dass vermehrt Schweizer Ingenieurfirmen im Ausland Erdbebenprobleme bearbeiten müssten.*

### Bald eine Autografie

Bereits zu der erstmals 1978 gehaltenen Erdbebenvorlesung gaben wir den Studenten rund 20 sogenannte Autografieblätter ab. Sie enthielten Informationen wie Intensitätsskalen, Erdbebenkarten, Seismogramme usw., die sich nicht eigneten, an die Tafel geschrieben bzw. gezeichnet und von dort abgeschrieben zu werden. Bereits auf das Sommersemester 1979 hin erarbeiteten wir von der ganzen Vorlesung eine vollständige Autografie (Bild 1-5). Wie der Name sagt, handelt es sich um einen Autograf, also um einen «vom Gelehrten selbst geschriebenen und autorisierten

*Die Autografie fand grossen Zuspruch und wurde auch von zahlreichen Firmen und Ingenieuren in der Praxis bestellt.*



*Bild 1-5:* Erste Autografie der Vorlesung «Erdbebensicherung von Bauwerken» (1979).

Text» der gesamten Vorlesung. Die Autografie basierte auf den nach dem ersten Vortragen überarbeiteten Manuskripten. Als Anhang eingefügt waren die bereits erwähnten rund 20 Blätter, Ergänzungen zu einzelnen Kapiteln sowie Übungsbeispiele. Die Autografie fand grossen Zuspruch, und sie wurde im Sinne eines Lehr- und Weiterbildungsbuches auch von zahlreichen Firmen und Ingenieuren in der Praxis bestellt und – so hofften wir jedenfalls – studiert und benützt.

### Fallenergie für die Landesverteidigung

*Im Ernstfall hätte es mehrere Wochen gedauert, bis die wichtigsten Brücken zur Sprengung vorbereitet gewesen wären.*

Schwingungsprobleme, Erdbebenprobleme und Stossprobleme, das sind die drei Kerngebiete der problemorientierten Tragwerksdynamik, wie ich bald einmal definierte. 1978 begannen wir, uns intensiv auch mit Stossproblemen zu beschäftigen. Anlass dazu bot ein aktuelles Bedürfnis der Schweizer Armee. Seit dem 2. Weltkrieg gab es rund 3'000 Sprengobjekte an ausgesuchten Stellen, wo Verkehrswege – Strassen und Eisenbahnen – auf wirksame Weise unterbrochen werden konnten, vor allem in Schluchten, an Abhängen und bei Flussübergängen. Dazu gehörten rund 1'000 wichtige Brücken, die meisten waren Stahlbeton- und Spannbetonbrücken. Beim traditionellen Sprengkonzept wurden in meist mehreren Querschnitten einer Brücke sogenannte V-Ladungen angebracht, bei deren Explosion eine Stahlplatte in den Beton eindrang und die Bewehrungsstäbe und Spannglieder durchschnitten wurden. Das Laden einer Brücke war für die Mineurkompagnien eine verhältnismässig aufwendige Arbeit, im sogenannten Ernstfall – bei einem drohen-



Bild 1-6: Ein Stahlbetonbalken nach mehreren Fallversuchen.

---

den militärischen Konflikt – hätte es mehrere Wochen gedauert, bis die wichtigsten Brücken zündfertig zur Sprengung vorbereitet gewesen wären.

Mitte der 1970er-Jahre wurde durch das damalige Bundesamt für Genie und Festungen nach einem neuen Konzept gesucht, bei dem die wichtigen Brücken in nur zwei bis drei Tagen zur Sprengung vorbereitet werden konnten. Dabei wurden auf Schnitte mit V-Ladungen verzichtet und stattdessen grosse Mengen Sprengstoff vor allem in den Brückenwiderlagern permanent platziert. Zur Sprengvorbereitung mussten dann nur noch die Zünder eingesetzt werden. Die Explosion der konzentrierten Sprengladungen hätte das Herunterfallen einer Brücke in die Sprenggruben von mehreren Metern Tiefe bewirkt. Dabei stellten sich Fragen wie: Was für ein Mechanismus wird sich bilden? Wird in den entstehenden plastischen Gelenken die Rotationsfähigkeit mit Sicherheit überschritten? Welchen Beitrag leistet die Fallenergie zur plastischen Verformung und Zerstörung einer Brücke? Und somit: Wie tief muss die Sprenggrube sein, damit die Brücke ganz sicher ihre Tragfähigkeit verliert und nicht mehr benützt werden kann?

Zur Entwicklung wissenschaftlicher Grundlagen für das neue Sprengkonzept starteten wir das pionierhafte Forschungsprojekt (3). Bei umfangreichen, an der EMPA durchgeführten Versuchen wurden einfach gelagerte Stahlbetonbalken an einem Ende hochgezogen und anschliessend aus verschiedenen Höhen fallen gelassen. Durch den Aufprall bildeten sich verteilte oder auch mehr oder weniger konzentrierte plastische Verformungen (Bild 1-6). Die Ergebnisse wurden in den Versuchsberichten {4} bis {8} publiziert. Theoretische Betrachtungen und an den Versuchen kalibrierte Computermodelle erlaubten eine gute Abbildung des wirklichen Geschehens im Zeitbereich. Dazu gehörte auch eine praktische Anleitung für die Projektierung der neuartigen Brückensprengungen. Zum Abschluss des Forschungsprojekts entstand die Dissertation von WALTER AMMANN {10}.

*Welchen Beitrag leistet die Fallenergie zur Zerstörung einer Brücke?*

*Durch den Aufprall bildeten sich verteilte oder auch konzentrierte plastische Verformungen.*

## Forschung, Lehre und Praxis im Verbund

*An der ETH basiert vieles auf fruchtbaren Synergien aus Forschung, Lehre und Praxis.*

Es hat eine lange Tradition und ist ein ausgeprägtes Qualitätsmerkmal der ETH, dass Forschung und Lehre sowie Kontakte mit der Praxis eng miteinander verbunden sind. Vor allem die Vorlesungen in den höheren Semestern, damals im 7. und 8. Semester des Normalstudienplanes, nährten und nähren sich oft zu einem guten Teil aus eigenen Forschungsarbeiten der Professoren und Mitarbeiter. Dazu kommen wenn möglich auch berufliche Erfahrungen in den Lehr- und Wanderjahren und bei aktuellen Expertentätigkeiten der Dozierenden. Es ist dies eine Art glückliche Symbiose. Auch neue Zweige der technischen Wissenschaften lassen sich so auf optimale Weise entwickeln. Neuartige Forschungsgebiete und praktische Tätigkeiten ausserhalb der Hochschule können zu neuen Vorlesungen führen. Das war auch hier bald einmal der Fall. An der ETH basiert vieles auf fruchtbaren Synergien aus Forschung, Lehre und Praxis.

## Sollen Doktoranden geführt werden?

Als Inhaber eines Lehrstuhls an der ETH stand ich immer wieder vor Fragen wie: Wie soll ich meine Zeit einsetzen? Tue ich eigentlich das Richtige? Was mache ich selber und was delegiere ich an meine Mitarbeiter? Zahlreiche Aufgaben und Notwendigkeiten in Lehre, Forschung, Beratung, Expertentätigkeit, SIA-Kommissionen und ETH-internen Gremien, dazu Administrations- und Personalfragen, ständiges Selbststudium und Lesen der weltbesten Zeitschriften, und manch anderes mehr waren ständig präsent. Sich selbst effizient und angemessen zu organisieren, war nicht einfach; die Tage hatten ja wirklich immer nur 24 Stunden, und obwohl ich in der Nacht recht gut arbeiten konnte, war dies auf die Dauer kein praktikabler Ansatz.

*Hervorragende Mitarbeiter suchen – und sie an einer möglichst langen Leine lassen! Und daran nur hie und da ein wenig zupfen.*

Was die Mitarbeiter betrifft: Bereits bei ERNST BASLER, mit dem ich in jungen Jahren als enger Vertrauter zusammenarbeiten durfte, und ebenso bei meinem Doktorvater BRUNO THÜRLIMANN hatte ich etwas beobachtet, das diese zwar kaum je aussprachen, aber mit grosser Könnerschaft praktizierten, es wurde zu meinem wichtigsten Führungsprinzip: Gute, ja hervorragende Mitarbeiter suchen – und sie an einer möglichst langen Leine lassen! Und daran wenn immer möglich nur hie und da ein wenig zupfen. Das tönt vielleicht etwas sehr idealistisch, und natürlich spielte sich nicht immer alles genau so ab. Aber den Mitarbeitern vertrauen und sie kreativ arbeiten lassen, ist x mal besser, als ihnen mit Misstrauen begegnen und alles und jedes vorschreiben und kontrollieren zu wollen. Vielleicht wird man einmal von zehnmal enttäuscht und ärgert sich zutiefst, aber das ist immer noch viel weniger schlimm als die kleinliche Alternative, die einen im Übrigen auch viel mehr eigene Arbeit und Zeit kosten würde. Natürlich geisterte einem das im Militär indoktrinierte KKK – Kommandieren, Kontrollieren, Korrigieren – immer wieder mal im Kopf herum. Doch volles Vertrauen schenken schafft eine ganz andere und viel bessere menschliche Atmosphäre. So versuchten wir an meinem Lehrstuhl stets in einem möglichst harmonischen Team zu arbeiten und einander zu unterstützen, aber auch in Ausgewogenheit zum eigenen Recht kommen zu lassen. Sollen Doktoranden geführt werden? Ich meine: Ja, aber eben nur an einer recht langen Leine.