

Berufserinnerungen

1957 - 2014

Erich Plate
Emeritus Professor Hydrologie und Wasser-
wirtschaft, Karlsruhe Institut für Technologie

Berufserinnerungen

Erich J. Plate

VORWORT

Dieser Teil meiner Erinnerungen besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil (Kapitel 1 und 2) will ich kurz meinen professionellen Werdegang skizzieren und die Konzepte aufzeigen, die mich in meiner Arbeit geleitet haben. Im zweiten Teil (Kapitel 3 bis 9) will ich einen Überblick über die Ergebnisse meiner beruflichen Tätigkeit geben und dabei vor allem meine Veröffentlichungen, die in meinen mehr als 50 Berufsjahren an der Colorado State University und der Universität Karlsruhe (TH) – später KIT Karlsruher Institut für Technologie - entstanden sind, einordnen in ein Gesamtbild. Einen Überblick geben soll heißen: in groben Zügen die Ideen und Konzepte zu skizzieren, die ich und meine Mitarbeiter mit der Institutsarbeit verfolgte, für die Details jedoch auf die Veröffentlichungen zu verweisen, die in Endnoten (zusammen mit ergänzenden Hinweisen, vor allem zu Personen) zitiert sind.

Für den zweiten Teil orientiere ich mich dabei an einen Vortrag, den ich anlässlich des 25. Jahrestags des Bestehens des Instituts Wasserbau III, später Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft gehalten habe, und werde mich wie dort auch hier im Wesentlichen auf die Forschung beschränken. Jedoch beschreibt die in Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Konferenzberichten dokumentierte Forschungstätigkeit nur einen kleineren Teil meiner beruflichen Wirksamkeit. Eine Übersicht der gesamten Aktivitäten ist in meinem offiziellen Lebenslauf zusammengefasst, der als Anhang 1 zu diesem Bericht erscheint. Natürlich stand im Mittelpunkt meiner beruflichen Tätigkeit als Professor die Lehre, auf die ich viel Mühe verwandte. Darüber will ich aber hier nur in kurzen Hinweisen berichten. Auch haben wir durch zahlreiche Gutachten zu Gebäudeaerodynamik und Hydrologie viele unserer Arbeiten direkt in die Praxis umgesetzt. Auch auf diese Gutachten gehe ich hier nur am Rande ein, zumal sie meistens Anwendungen bekannter oder von uns entwickelter Verfahren beinhalteten,

z.B. in Gutachten zu Windlasten oder Hochwasseruntersuchungen. Sie gehörten aber genauso zum wesentlichen Inhalt der Institutsarbeit, weil sie als Teil der Doktorandenausbildung eingeplant wurden.

Hinweis zur Veröffentlichungspraxis. Ich habe in diesem Bericht umfangreiche Endnoten eingefügt, die als Hochzahlen indiziert sind. In den Endnoten gebe ich einerseits kurze weiterführende Erläuterungen, und ich füge persönliche Bemerkungen zu Personen dazu, mit denen ich zu tun hatte und die mich in meiner Arbeit mehr oder weniger kurzzeitig begleitet oder beeinflusst haben. Andererseits werden in diesen Endnoten auch die wichtigeren meiner Veröffentlichungen zitiert. Ich unterscheide hier zwei Arten von Veröffentlichungen: die in „peer reviewed“ Zeitschriften erschienenen, die in diesem Bericht nur zitiert werden – wer sie lesen will, wird sie leicht in wissenschaftlichen Bibliotheken zu finden wissen. Für wichtig halte ich aber nicht nur die leicht zugänglichen Veröffentlichungen in international anerkannten Spitzenzeitschriften, sondern auch manche Konferenzbeiträge. Ich habe diese mit anderen nicht ohne weiteres zugänglichen Arbeiten gesamt und unter dem Namen (19xx Text) in einer CD zusammengefasst, die Teil dieser Erinnerungen ist. Der Titel der Dateien (19xx Text) ist die Kurzform des Zitates, die sich in diesen Berufserinnerungen jeweils am Ende des Zitates befindet. Ich hielt (zumindest in den ersten Jahrzehnten meiner Tätigkeit) solche Beiträge, wenn sie in den Tagungsberichten internationaler Konferenzen veröffentlicht wurden, für genauso gut dokumentiert wie Zeitschriftenartikel – und sie brauchten nicht so viel Zeit: ich habe mich immer sehr schwer getan mit dem Schreiben von technischen Aufsätzen – und dann war da immer schon die nächste Konferenz, möglicherweise als „invited lecturer“ – wer kann dem widerstehen? oder das nächste interessante Forschungsthema, oder die Notwendigkeit, Forschungsanträge zu stellen, sodass weitere Bearbeitungen liegen blieben. Ich muss zugeben, dass ich auch gerne die mühselige und lästige Auseinandersetzung mit Gutachtern von Fachzeitschriften vermied¹.

Nachträglich besehen war es aber ein Fehler, dass ich mich oft mit Veröffentlichungen in der „grauen Literatur“ begnügte. Daher schreibe ich diese Erinnerungen auch darum, um von meiner Warte aus hervorzuheben, welche der mehr als 400 Berichte und Veröffentlichungen aller Art mit meinem Namen drauf lesenswert sein mögen, und welche ich für besonders

gelingen hielt. Auch möchte ich einem möglichen Leser Wiederholungen ersparen. Denn dem heutigen Gebot, möglichst viel zu veröffentlichen, habe auch ich mehr oder minder widerwillig Folge geleistet und daher manches mehrfach vorgetragen - allerdings in verschiedenartigen Konferenzen mit verschiedenen Zuhörerschaften, und meistens mit kleineren oder größeren Veränderungen. Manches wurde auch in zwei Sprachen veröffentlicht und wird hier nur entweder auf Deutsch oder auf Englisch zitiert. Ich habe aber auch gelegentlich Beiträge gelistet (und auf die CD gescant), die nie veröffentlicht wurden, aber doch zur Abrundung des Gesamtbildes meiner Tätigkeit von Bedeutung sind.

Ein weiteres Kriterium für die Auswahl dieser Erinnerungen ist die Beschränkung, mit wenigen Ausnahmen, auf Beiträge, die ich selber verfasst habe, oder aber an deren Verfassung ich maßgeblich beteiligt war. Durch die zahlreichen Veröffentlichungen meiner Mitarbeiter, die ich immer ermutigt habe, reichte aber die Wirkung des von mir geleiteten Instituts weiter als nur über meine eigenen Arbeiten. Viele gute Beiträge zur Fachliteratur entstanden, zwar durch die Institutsarbeit veranlasst, aber ohne meine weitere Beteiligung und werden hier nicht zitiert, wie auch nicht die mehr als 60 Dissertationen. Ich verweise aber auch auf die Hefte der Mitteilungsreihe des IHW, die im Wesentlichen aus einer vollständigen Reihe aller am IHW entstandenen Dissertationen besteht. Manche von diesen sind leider anderweitig gar nicht oder nur durch Zusammenfassungen in Konferenzbeiträge archiviert.

Und damit komme ich zum Wesentlichen: den Berichten zum Erlebnis Forschung, das mich mein ganzes Berufsleben erfüllt und beglückt, enttäuscht und hochbefriedigt hat - ein Oxymoron, das man verstehen wird, wenn man sich durch diesen Bericht hindurch gearbeitet hat - wozu ich dem Leser Muße, Zeit und Interesse wünsche.

Im Frühjahr 2018, Erich Plate

Inhaltsverzeichnis

VORWORT.....	3
KAPITEL 1: LEHRJAHRE.....	11
1.1 Ausbildung	11
1.2 Erste Forschungserfahrungen	14
1.3 Lehrerfahrungen	17
1.4 Am Argonne National Laboratory	21
KAPITEL 2: AUFBAU DES INSTITUTS IN KARLSRUHE ...	23
2.1 Das Institut Wasserbau III	23
2.1.1 Entstehung des Instituts für Wasserbau III.....	23
2.1.2 Meine Regeln als Professor an der TU Karlsruhe	24
2.1.3 Arbeitskonzept für das Institut Wasserbau III.....	26
2.2 Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft.....	33
KAPITEL 3: HYDRAULISCHE ARBEITEN	36
3.1 Hydraulische Beiträge.....	36
3.2 Untersuchungen zum Feststofftransport	38
3.3 Dichtegeschichtete hydraulische Strömung.....	43
3.3.1 Einmischung über Schichtgrenzen.	44
3.3.2 Stabilität der Zwischenschicht.....	45
KAPITEL 4: GEBÄUDEAERODYNAMIK	48
4.1 Karrierebeginn als Windkanalkonstrukteur	48
4.1.1 Erste Gebäudeaerodynamische Untersuchungen in Ft. Collins.....	54
4.2 Gebäudeaerodynamik an der Uni Karlsruhe.....	56
4.2.1 Geplante Arbeitsschwerpunkte.	56
4.2.2 Die Abteilung Gebäudeaerodynamik am IHW.	56
4.3 Grenzschichtstruktur.	58
4.3.1 Grenzschichtmodellierung.	58
4.3.2 Gestörte Grenzschichten.	60
4.4 Dichtegeschichtete atmosphärische Strömungen.....	63
4.4.1 Windprofil mit Dichteunterschieden.	63
4.4.2 Konvektionsströmungen.....	64
4.4.3 Der Schichtenwindkanal.	66
4.5 Diffusionsvorgänge	69
4.5.1 Diffusion von Emissionen aus Schornsteinen und Kühltürmen.	70

4.5.2 Schadstoffquellen in bebauten Gebieten	71
4.5.3 Belastung durch Verkehr.....	74
4.6 Windkräfte auf Bauwerke	75
4.6.1 Überprüfung von Modellgesetzen bei Türmen.....	77
4.6.2 Statische Belastung typischer Gebäudeformen.....	79
4.6.3 Windkräfte in bebauten Gebieten.....	80
4.6.4 Dynamische Belastung – Dauerfestigkeitsuntersuchung.....	81
4.7 Engineering Meteorology	82

KAPITEL5: WELLENFORSCHUNG..... 83

5.1 Winddrift.....	83
5.2 Entwicklung von Windwellen	85
5.2.1 Wellenentstehung auf stehendem Wasser	86
5.2.2 Die dominierende Welle.....	90
5.3 Modellierung von Wind und Wellenkräften	92
5.4 Stoffeintrag durch die wellige Zwischenfläche.....	96

KAPITEL 6: HYDROLOGIE 99

6.1 Mein Weg zur Hydrologie.....	99
6.1.1 Erste Erfahrungen.....	99
6.1.2 Stochastische Grundlagen	100
6.2 Hydrologische Arbeiten zum Hochwasserschutz.....	103
6.2.1 Extremwertermittlung für das Bemessungshochwasser.....	105
6.2.2 Niederschlag – Abflussmodelle für den Hochwasserschutz.....	105
6.2.3 Hochwasservorhersage.....	111
6.2.4 Vorhersage für den Mekong.....	114
6.3 Hydrologische Gebietsforschung.....	117
6.3.1 Der Weg zur experimentellen Hydrologie.....	117
6.3.2 Feldversuche zur Prozessklärung.....	118
6.3.3 Das Weiherbachprojekt.....	119
6.3.4 Erfassung von Prozessen bei Skalenübergängen.....	124
6.3.5 Niederschlagsgenerierte Flächenerosion.....	126
6.3.6 Flächendeckende Modellierung in Baden – Württemberg.....	128

KAPITEL 7. WASSERWIRTSCHAFTLICHE ANWENDUNGEN DER HYDROLOGIE..... 130

7.1 Wasserwirtschaftliche Grundlagen.....	131
7.1.1 Modelle für Langzeitsimulationen	131
7.1.2 Langzeitmodelle für Feststoffprobleme.....	134
7.1.3 Langzeitmodelle für Niederschläge.....	136
7.2 Speicherplanung	138

7.2.1 Speicherplanung für den Hochwasserschutz	140
7.2.2 Speicherplanung für Bewässerung	143
KAPITEL 8: RISIKOMANAGEMENT	147
8.1 Bemessung nach Zuverlässigkeit.....	151
8.1.1 Anwendungen bei Bauwerken unter Windlasten.	152
8.1.2 Staudammsicherheit.	152
9.1.3 Deichversagen.	154
8.1.4 Gewässergüteprobleme.	155
8.1.5 Anwendung in der Stadthydrologie.....	156
8.1.6 Hangrutschungen durch Infiltration.	158
8.2 Risikoforschung	158
8.2.2 Stichwort Nachhaltige Entwicklung.....	163
KAPITEL 9: SCHLUSSWORT	166
ANHANG 1: MEIN LEBENSLAUF.....	168
ANHANG 2: VERGLEICH USA UND DEUTSCHLAND	171
ANHANG 3: ENDVERWEISE	178

KAPITEL 1: LEHRJAHRE

1.1 Ausbildung

Meine berufliche Tätigkeit baute auf dem Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Stuttgart auf, einem technischen Studienfach, in welchem die naturwissenschaftlichen Grundlagen eine eher untergeordnete Rolle spielen im Vergleich zu den anwendungsorientierten Fächern. Mathematik, Mechanik und Physik waren notwendige Voraussetzungen, aber das eigentlich Bauingenieur - spezifische war das Planen und Konstruieren, - und daher lag auch während meines Studiums der Schwerpunkt auf Konstruieren und Bemessen mit in der Praxis bewährten Verfahren, und nach den Regeln der Technik, die in den Vorlesungen erläutert wurden. Mit meiner Lehre als Betonbauer und das daran anschließende Bauingenieurstudium mit Schwerpunkt auf den Massivbau schien mein Weg als Konstrukteur vorgezeichnet zu sein. Als jungen Student begeisterte mich *Prof. Deininger* für dies Gebiet – und ich sah Entwurf und Bau von Brücken und anderen Großbauwerken als erstrebenswertestes Berufsziel: für mich galt immer, dass der konstruierende und bauende Ingenieur vorzüglichstes Ausbildungsziel in der Bauingenieur fakultät sein müsse, mit Ingenieuren wie z.B. dem Stuttgarter Professor *Fritz Leonhardt*, dem Erbauer des Stuttgarter Fernsehturms und vieler Rheinbrücken, und seinem ebenso genialen Nachfolger *Jörg Schlaich* als Vorbild. So zu werden wie diese Kollegen war mein Berufsziel während der ersten 4 Jahre meines Studiums.

Geblichen ist mir aus dieser und meiner Zeit als Betonbauerlehrling und Geselle, wie auch aus den Vorlesungen von *Deininger* (Massivbau) *Maier – Leibnitz* (Stahlbau), *Tietje* (Einführung in die Architektur) und *Tölke* (Bodenmechanik –Grundbau) an der TH Stuttgart ein Verständnis für das, was für die Praxis wesentlich ist. Ich glaube, auf Grund dieser praktischen Erfahrung unterscheiden zu können, welche theoretischen Grundlagen für die normale Praxis wichtig sein könnten, und wann das Spezialwissen nur für besonders Interessierte beginnt. Ich bin der Meinung, dass Grundlagenforschung im Bauingenieurwesen (und vermutlich in anderen Ingenieurgebieten auch) in erster Linie für die Praxis sein sollte, ausgerichtet auf Probleme der modernen Bauwirtschaft, und ich habe daher in meinem Institut in Karlsruhe vor allem die Schaffung von verbesserten Bemessungsgrundla-

gen für die Praxis und ihre Umsetzung zu einem der wichtigsten Grundprinzipien der Institutsarbeit gemacht. Auch in meinen Grundvorlesungen habe ich mich immer bemüht, die Anwendung des Vorlesungsstoffes zu betonen (was mir bei manchen, mir viel Vergnügen bereitenden theoretischen Vorlesungen nicht immer gelungen ist).

Die Kehrseite dieser einseitigen Ausrichtung auf die Bedürfnisse der Praxis ist, dass in meiner Studienzeit die Bauingenieurausbildung an der Uni Stuttgart ein vertieftes Grundlagenwissen, das für wissenschaftliches Arbeiten unbedingt erforderlich ist, weder vermittelt wurde, noch eine mentale Bereitschaft, sich dafür zu engagieren entstehen ließ. Natürlich waren wir Bauingenieurstudenten mit Mathematik belastet, aber nie so tiefschürfend, wie etwa unsere französischen Kollegen, sodass man (ich jedenfalls) die mathematischen Grundlagen während des Studiums kaum verinnerlichen konnte. Ich erinnere mich an das spätere Erfolgserlebnis, als ich z.B. die Schwingungslehre –lange nach dem eigentlichen Studium - richtig verstand. Erst als Fulbright Student in den USA habe ich vertiefende Mathematikvorlesungen gehört: je ein Textbuch zur Fourieranalyse und zur Potentialtheorie sollten (mussten!) erarbeitet und verstanden werden, was mir auch mehr oder weniger gut gelang. Eigene Beiträge hierzu habe ich zwar nie leisten können, aber die Theorie und mein gutes Vorstellungsvermögen halfen, dass ich später auch schwierige Aufgaben, z.B. aus der Wellentheorie als angewandte Potentialtheorie, sehr genau verstanden habe und in meinen Vorlesungen darzustellen wusste.

Auch die Grundlagen der Hydraulik habe ich erst in Amerika recht verstanden. Dazu trugen Grundkurse bei, die dort in meiner Studienzeit (und auch während meiner Zeit als Professor an der CSU) jeder MS Kandidat hören mussten. *Jim Barton* gab diesen Kurs in Hydraulik, und er benutzte das Buch von *Hunter Rouse*: „Elementary Fluid Mechanics“, das mir zunächst gar nicht „elementary“ vorkam, mich aber vor allem durch die klare und einfache Darstellung geradezu begeistert hat. Was mir während des Studiums in Stuttgart in der einschlägigen Vorlesung von Professor *Marquardts* wie eine unverständlich Mischung geheimnisvoller Prozesse, ausgedrückt durch einen mir schwer verständlichen Formelsalat erschienen war, wurde auf einmal klar und deutlich.

*Hunter Rouse*² war für die Hydrauliker in Ft. Collins und auch weltweit der große Meister, dem es gelungen war, die klassische Hydraulik mit den neueren Erkenntnissen der Strömungsmechanik zu verbinden.³ Der Beitrag von *Hunter Rouse* zur modernen Hydraulik bestand in erster Linie in der Übernahme der Erkenntnisse von *L. Prandtl* zur Grenzschichttheorie, und an diese Basis wurde ich in Ft. Collins herangeführt durch die Vorlesung „Boundary layer theory“, gehalten von *Jack E. Cermak*, die ich in meinem zweiten Jahr in Ft. Collins hörte, und durch die ich in das Buch „Grenzschichttheorie“ von *H. Schlichting* eingeführt wurde – ein Buch, das mich zutiefst beeindruckt hat. Die gründliche Einarbeitung in die Grenzschichttheorie mit Hilfe dieses Buches hat mir in ganz besonderem Maße in meiner späteren Arbeit geholfen, denn die Gebäudeaerodynamik, die mich später jahrelang hauptsächlich beschäftigte, baut ja ganz wesentlich auf dieser Theorie auf⁴.

Auf jeden Fall erhielt ich aus diesen Tätigkeiten und aus den Vorlesungen und Übungen zur Hydraulik an der Colorado State University einen vorzüglichen Kenntnisstand zur Hydraulik, der mir später in den Jahren 1970 bis 1980 zustattenkam, als ich an der Uni Karlsruhe den zweiten Teil der Vorlesung Hydromechanik hielt (den ersten Teil las *Eduard Naudascher*) und die Studenten in die Geheimnisse von Rohrhydraulik, Ähnlichkeitstheorie, Grundwasser etc. einführte. Auf das Halten dieser Vorlesung hatte ich damals übrigens trotz inzwischen ganz anderer wissenschaftlichen Interessen sehr viel Wert gelegt: zum einen, weil dies wichtige Fach wunderbar anschaulich gelehrt werden kann und für den Studierenden die praktische Bedeutung der Vorlesungsinhalte sehr einsichtig ist. Dadurch hat auch mir die Vorlesung sehr viel Spaß gemacht. Zweitens war die Vorlesung aber auch eine wichtige Werbeveranstaltung für mein Institut, denn sie gab mir die Gelegenheit, mit gescheiterten Studenten frühzeitig (im 2. Semester) in Kontakt zu kommen – meine Vorlesung und die Hilfsbereitschaft und Hilfe des betreuenden Assistenten führten dazu, dass so mancher gute Student bei uns Hilfsassistent wurde und einige auch als Assistent oder wissenschaftlicher Mitarbeiter nach dem Diplom an „meinem“ Institut bis zur Promotion blieben. Diese Vorlesung gab ich erst auf, als nach der Umbenennung des Lehrstuhl Wasserbau III in Lehrstuhl für Hydrologie und Wasserwirtschaft im Jahr 1981 die Lehraufgaben in den Spezialfächern zunahmen. Die Beteiligung an der Lehre auch für andere Vertieferrichtun-

gen des Bauingenieurwesens blieb aber erhalten durch die Vorlesung „Statistik für Bauingenieure“, die ich bis zu meiner Emeritierung hielt.

Mit der Übernahme des Arbeitsgebietes Hydrologie kamen neue Lehrinhalten, deren analytische Grundlagen sich erstaunlich wenig von denen der Strömungsmechanik unterschieden: Zeitreihenanalyse und die Theorie linearer Systeme, verbunden mit den physikalischen Erhaltungssätzen, bilden einen wichtigen Teil des theoretischen Grundlagenwissen der Hydrologie wie auch der Turbulenzforschung. Dazu kamen noch die Aufgabenstellungen des Operations Research und Risikokonzepte – alles Gebiete, die ich schon kannte, ehe ich mich vertieft der Hydrologie zuwandte.

Eher durch Zufall, durch meine Fulbright Studienzeit in den USA, schlug ich eine Laufbahn als Forscher und Lehrer ein, die mich immer weiter von dem frühen Ideal des Konstrukteurs entfernte. Denn in den meisten USA Universitäten - und so auch in Ft. Collins - war es weniger das Ziel der Forschung, die Praxis zu verbessern – das hat man dort in hohem Maße der Praxis selbst überlassen. Die Lehre in den Graduate Schools der Universitäten sollte vor allem dem Doktoranden vertieftes Grundlagenwissen vermitteln, um ihn zu befähigen, durch seine Forschung zur Erweiterung dieses Wissens beizutragen, ohne nach dem Nutzen zu fragen. Ich werde hierauf in Anhang 2 noch zurückkommen. In diesem Sinne war auch meine Forschungstätigkeit in den 60-er Jahren in den USA im wesentlichen Grundlagenforschung. Grundlagenforschung ist auch ein Teil der Arbeit meines Karlsruher Instituts geblieben, aber mir schwebte immer vor, durch verbessertes Verständnis der Grundlagen auch zur Verbesserung der Anwendung zu gelangen.

1.2 Erste Forschungserfahrungen

In den USA wurde ich mit den Methoden der hydraulischen Grundlagenforschung durch eigene umfangreiche Experimente vertraut gemacht, die ich als Mitarbeiter von *Harry (Hsing Khuan) Liu*⁵ als „Research Engineer“ durchführte. Meine Aufgabe war es, an einer riesigen Versuchsrinne Laborversuche zum Brückenstau h_b an verschiedenen Brückenwiderlagerformen zu machen. Hunderte von Versuchen habe ich in den Jahren 1956/57 durchgeführt, und in zahlreichen Diagrammen versucht, die Ergebnisse systematisch darzustellen auf der Basis von empirischen, in Dia-

grammen erkennbaren Zusammenhängen - eine theoretische Begründung für meine Kurven konnte ich aber nicht liefern. Nachdem ich voll Stolz meine wunderbaren Diagramme dem Auftraggeber (dem US Bureau of Public Roads) vorstellte, musste ich erleben, dass diese völlig ignoriert wurden. Stattdessen setzte *J. Bradley* einfach den Stau h_b proportional zur Energiehöhe, und berechnete den Proportionalitätsfaktor aus unseren Daten, den er dann in numerischen Tabellen als Funktion der Geometrie und des Brückentyps darstellte. Diese Tabellen haben zwar die Beiwerte nicht so gut zusammengefasst wie meine Diagramme, machten sie aber mühelos für die übliche hydraulische Bemessungspraxis verwendbar. Die Ergebnisse sind in einem Bericht veröffentlicht und wurden von *J. Bradley* ins Design Manual des Bureaus of Public Roads für Straßenbrücken über Gewässer eingearbeitet⁶.

Ich habe aus diesem frühen Projekt die wichtige Einsicht gewonnen, dass eine Datenanalyse ohne eine theoretische Basis nicht viel nützt. Zwar kann man durch umfangreiche Versuchsreihen, wie die für den Brückenstau genannten, durchaus über systematisches Variieren von Parametern Erkenntnisse gewinnen, die zu guten Darstellungen unbekannter theoretischer Zusammenhänge führen – insbesondere im Zusammenhang mit Dimensionsanalysen, bei denen mehrere Parameter in modelltechnisch gültige dimensionslose Parameter kombiniert werden (ein Weg, der insbesondere durch *Hunter Rouse* und seine Schüler vertreten wurde). So wurde z.B. auch der Brückenstau behandelt. Auch bei Untersuchungen von Bauwerken des Wasserbaus an wasserbaulichen Modellen ist es nützlich, das Experiment dort einzusetzen, wo die Theorie nicht weiter hilft. Das ist oft genug bei hydraulischen Problemen der Fall, z.B. für die Formgebung von Leitbauwerken. Es gilt auch für andere Arbeitsgebiete, wie z.B. die Hydrologie, vornehmlich weil die Komplexität der Randbedingungen oder die natürliche Variabilität von Parametern eine theoretische Behandlung zu aufwendig oder gar unmöglich macht.

Allerdings werden die Grenzen für das, was möglich ist, immer weiter gesteckt, da solche Modelluntersuchungen in Strömungsmechanik oder Hydraulik heute immer mehr mit numerischen Modellen auf der Basis physikalischer Grundgleichungen bearbeitet werden können. Numerische Methoden sind schneller und erlauben aufwendige Parameterstudien, die im

Labor nicht durchführbar sind – meistens aus Kostengründen. Sie haben jedoch ihre Mängel in der notwendigen Vereinfachung der numerischen Gitternetze und in der Verwendung empirischer Parameter, die oft für solche Berechnungen etwa aus systematischen Grundlagenversuchen eingebracht werden müssen. Im Gegensatz dazu haben Untersuchungen am Versuchsstand den Vorteil, die Natur genauer mit allen inhärenten Gesetzmäßigkeiten nachzubilden – allerdings im verkleinerten Maßstab, und das setzt voraus, dass die Modellgesetze stimmen, damit die experimentellen Ergebnisse auch auf naturgroße Bauwerke übertragbar werden. Modellgesetze als Grundlage für die maßstabgetreue Nachbildung natürlicher Verhältnisse haben mich während meiner Karriere immer wieder beschäftigt.

Neben den beiden genannten Versuchsarten: systematische Parameterstudien (auch numerisch) und durch praktische Projekte bestimmte Fallstudien, gibt es eine dritte, besonders befriedigende Art der Experimente, nämlich solche, die zur Bestätigung einer Theorie dienen. So hat mir die Forschung immer besonders viel Spaß gemacht, wenn es darum ging, Ergebnisse theoretisch vorherzusagen und dann experimentell zu zeigen, dass die Theorie richtig (oder aber falsch) ist. So habe ich bereits mit meiner MS Thesis und später noch öfters versucht, schöne Theorien, etwa zur Wellenentstehung, nicht einfach zu übernehmen, sondern durch kritische Experimente zu verifizieren. Erst später habe ich gelernt, dass dies die vorzuziehende Vorgehensweise ist, um Mängel einer Theorie oder ihre Grenzen aufzuzeigen, – im Sinne der „Falsifizierung“ von *Karl Popper*.

Zusammenfassend meine ich, dass die Forschung der Art, wie sie im Wasserbau betrieben wird, im wesentliche zwei Ziele verfolgen muss: Entweder sollte die Forschung dem Ziel dienen, direkt verbesserte Verfahren für die Praxis zu liefern, und diese Aufgabe sah ich als einen wichtigen Schwerpunkt an. Oder sie sollte wesentliche Lücken in Lehrbüchern schließen. In diesem Sinne war ich seit meinem Dienstantritt in Karlsruhe 1970 bestrebt, rein wissenschaftliche Untersuchungen nur zum Erkenntnisgewinn - mit der Veröffentlichung in wissenschaftlichen Zeitschriften als alleinigem Ziel - zu vermeiden. Sie sollten immer einen Bezug zu praktischen Problemen behalten.

1.3 Lehrerfahrungen

Etwa ab 1962 wurde ich auf meinen Wunsch hin an der CSU in die Lehre eingebunden (auch um für die Projekte Geld zu sparen, denn anders als in Deutschland kam die Finanzierung der in der Forschung tätigen Professoren aus den Forschungsmitteln, und die Finanzierung der offiziellen Lehrveranstaltungen aus dem Staatshaushalt: eine 3 stündige Vorlesung im Vierteljahr wurde mit 1 Monatsgehalt honoriert, das dann an Forschungsmitteln gespart wurde). Ich musste, wie in Ft.Collins üblich, als jüngster Professor nach einem Textbuch die Grundvorlesung in Statik und Dynamik halten, und damit begannen meine Vorlesungserfahrungen. Statik und Dynamik las ich aber nur ein- oder zweimal, und bald bot ich eine eigene Vorlesung ohne Textbuch zum Thema Messtechnik an: ich war fasziniert von der Theorie linearer Systeme, einschließlich Schwingungslehre, und die Kenntnisse für die Anwendungen dieser Theorie auf die Turbulenzmessungen, die ich mir erarbeitet hatte, konnte ich so weitergeben. Und als *Jack Cermak* im Jahre 1964 einen (gut besuchten) Lehrgang über Strömungsmechanik im Bauwesen an der Colorado State University veranstaltete, konnte ich meine ausgearbeitete Vorlesung dazu beitragen – und so kamen auch viele Hydrologen, die damals den Lehrgang besuchten, in den Genuss dieses Themas – und wenn ich mich nicht irre, hat die später als bahnbrechend empfundene Arbeit des Lehrgangsteilnehmers *Chester Kisiel* zum Thema Zeitreihenanalyse in der Hydrologie in dieser Vorlesung eine ihrer Wurzeln. Überhaupt wurden die Studierenden der Hydrologie zu meinen besten Zuhörern, da *Vujica Yevjevich*, der das Fachgebiet Hydrologie vertretende Professor an der CSU, seine Studenten zur Teilnahme an dieser Vorlesung veranlasste. Dies galt besonders für die Vorlesung „Zeitreihenanalyse“, die aus dieser Vorlesung als Spezialvorlesung entstand (in der ich die Wienerische Zeitreihentheorie mit Grundlagen der Wahrscheinlichkeitslehre verband⁷). Da viele von *Yevjevichs* Studenten später in der modernen Hydrologie eine wichtige Rolle spielen sollten, habe ich mit diesen meinen späteren Kollegen schon Kontakt gehabt, ehe ich mich in Karlsruhe ernsthaft mit der Hydrologie befasste.

Das Manuskript zur Vorlesung Zeitreihenanalyse bildete übrigens die Grundlage für die letzten Kapitel in meinem 1992 erschienenen Buch „Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure“⁸. Die ersten Kapitel des Buches umfassen den Stoff der Einführungsvorlesung

zum Thema „Statistik für Bauingenieure“, die ich viele Jahre für die Karlsruher Bauingenieure gehalten habe und die ihre Wurzeln bereits in der Vorlesung zur Statistik hatte, die ich seinerzeit im Jahr 1958 für Prof. Röhnisch vorbereiten musste.

Um mich auf dem Gebiet linearer System zu vertiefen, nahm ich (im Herbst 1963) an einem Lehrgang in Wichita (Kansas) teil, wo Prof. *Tou* sein neuestes Buch zum Thema Regelungstechnik einführte. Zurückgekehrt nach Ft. Collins stellte ich fest, dass es keine Vorlesung zum Thema Regelungstechnik an der CSU gab: die Maschinenbauer konnten offensichtlich darauf (noch) verzichten! Als ich den Leiter des Department der Maschinenbauer darauf hinwies, beauftragte er mich, diese Vorlesung zu halten und einzuführen. Das tat ich, allerdings nur einmal, dann übernahm ein Mitglied der Maschinenbauakademie die Vorlesung: das ging doch über den Stolz der Maschinenbauer, dass ein Bauingenieur ihre Spezialvorlesungen hält!

In den letzten Jahren meiner Tätigkeit in Ft. Collins hielt ich die Vorlesung „Intermediate Fluid Mechanics“. Das war die grundlegende strömungsmechanische Vorlesung, die von allen jährlich etwa 20 - 30 MS und PhD Kandidaten gehört werden musste. Dabei verwendeten wir ein Lehrbuch von *Shames*, das aufgebaut war auf den Erhaltungssätzen der Physik, angewendet auf das aus einer Strömung herausgeschnittene Kontrollvolumen. Die daran abgeleiteten physikalischen Erhaltungssätze für Masse, Stoffbeimengungen, Impuls und Energie wurden mir im Laufe der Zeit fast visuell so deutlich, dass ich sie mühelos in vielen Vorlesungen anwenden konnte – z.B. in der Wellenlehre, wie auch in Aufgaben anderer Gebiete, und ich habe später bei vielen neuen Forschungsaufgaben geprüft, wie weit der Kontrollvolumenansatz mich führen kann⁹. Es war mir immer ein wichtiges Anliegen, den Studenten diese Denkweise beizubringen.

Diese Vorlesung brachte mich mit vielen jungen Leuten zusammen, denen ich später bei den verschiedensten Anlässen wieder begegnete. Da in der CSU zu der Zeit ein sehr großer Anteil von Asiaten als Graduate Students tätig waren, von denen viele in die Heimat zurückkehrten, um in ihrem Lande wichtige Positionen in Forschung und Praxis einzunehmen, traf ich später bei meinen vielen Weltreisen immer wieder frühere Teilnehmer dieser Kurse¹⁰. Andere Studenten blieben in den USA und wurden Profes-

soren und Forscher, und immer wieder traf ich später bei Konferenzen den einen oder anderen Wissenschaftler, der freudestrahlend auf mich zu kam und sich an meine Vorlesung erinnerte. Man darf wohl sagen, dass zu dieser Zeit das Hydraulic Program, dem unser Windkanalprogramm wie auch das Hydrologieprogramm unter Prof *Yevjevich* zugeordnet waren, ein international hochangesehenes Schwerpunktprogramm an der Colorado State University war, aus dem eine Vielzahl der angesehensten Forscher auf diesen Gebieten hervorgegangen sind.

Ich habe mich in Ft.Collins und in den ersten Jahren in Karlsruhe auch mit anderen Grundlagenthemen der Strömungsmechanik befasst und auch Vorlesungen gehalten, so z.B. mit der Turbulenztheorie - einen großen praktischen Wert habe ich daraus nicht gezogen, nur die grundsätzliche Idee der virtuellen Schubspannung (oder der Scheindiffusivität, oder virtuellen Wärmeleitfähigkeit) habe ich daraus in meine Praxis übernehmen können. Brauchbar wurden diese Theorien erst für numerische Modelle, und dafür habe ich mich nur wenig interessiert. Ich habe zwar in Argonne Programmieren mit FORTRAN gelernt -mit Lochkarten! Die wurden per Hand hergestellt und am Abend an der Rechnerbedienung abgegeben mit (vor allem später in Karlsruhe) endlosem Warten auf die Ergebnisse am nächsten Morgen, die immer wieder wegen eines Kommas oder anderer Kleinigkeiten nicht berechnet werden konnten. Nach wenigen Monaten in Karlsruhe habe ich dann des Programmieren aufgegeben und das Arbeiten mit Großrechnern meinen Mitarbeitern überlassen. Auch später, als das Rechnen mit PCs immer einfacher wurde, habe ich mich bei eigenen Arbeiten auf Excel Rechnungen und Mathcad beschränkt.

Für mich war der Computer vor allem in der Strömungsmechanik immer so etwas wie ein digitales Versuchsgerät, dessen Ergebnisse „automatisch“ entstehen, und nicht auf Grund tieferer Einsichten in die strömungsmechanischen Zusammenhänge - um die es für wissenschaftliche Erkenntnisse doch letztlich gehen sollte. Die hochkomplexen numerischen Modelle, mit denen sich heute fast alle Strömungsvorgänge - bei turbulenten Strömungsproblemen näherungsweise - lösen lassen, haben mich nie gereizt, da ihre Anwendung eigentlich keine grundsätzlich neuen physikalischen Erkenntnisse gebracht haben. Damit habe ich natürlich den Trend der Zeit ausgesprochen für mich verschlafen - allerdings gilt das nicht für viele

meiner Mitarbeiter, und es war selbstverständlich, dass sich diejenigen, die später Professoren wurden, mit dem Rüstzeug der numerischen Strömungsmechanik vertraut machten. Das gilt auch für die Numerik bei hydrologischen Fragestellungen, in der es allerdings in der Regel zunächst nur um einfache mathematische Aufgaben geht, die mit ein paar FORTRAN Zeilen zu bewältigen sind. Erst mit der Verfügbarkeit größerer Rechner mit unbegrenztem Speicherplatz konnte die räumliche Verteilung von hydrologischen und meteorologischen Größen modellmäßig berücksichtigt werden. Heute (2018) gibt es riesige Programme, um zusammen mit der Klimamodellierung auch Langzeitvorhersagen hydrologischer Größen wie Niederschlag und Abfluss zu modellieren.

Zusammenfassend kann ich sagen, dass ich dankbar dafür bin, vor der Professur in Deutschland die Lehrzeit in den USA durchgemacht zu haben. Ich habe mir dort, ohne es eigentlich zu planen, ein breites Fundament an Grundwissen in vielen interessanten, von der Forschung her neuen Gebieten aneignen können, auf dem ich das Arbeitsprogramm am Institut Wasserbau III und dann IHW aufbauen konnte. Insbesondere durch die Wertschätzung, die ich dann am Argonne National Laboratory fand, habe ich auch den Mut und das Selbstvertrauen bekommen, ein ganzes Programm aus eigenen Ideen zu gestalten und mit eigenen Gedanken zu befruchten. Denn Mut brauchte es schon, weil die Forschungen, die ich machen wollte, zwar für die Praxis sein sollten – sie aber für die Praxis noch neu waren oder auch unbrauchbar sein könnten und daher nicht ohne weiteres berufsqualifizierend sein würden. Und wenn ich junge Menschen für meine Forschungsideen einwarb, so war ich mir bewusst, dass ich die Verantwortung dafür übernahm, dass der Doktorand von dem, was er durch die Promotion usw. lernte, auch für seinen künftigen Berufsweg Nutzen ziehen konnte. Es ist ja so, dass der Professor durch seine Führungsrolle seine Doktoranden dazu veranlasst, viele Jahre ihres Lebens in der Verfolgung von wissenschaftlichen Ideen zu verbringen, und diese sollten zu einer guten beruflichen Karriere und nicht auf ein totes Gleis führen – von wie vielen jungen Leuten weiß man doch, dass sie nach einer langen Karriere als wissenschaftlicher Mitarbeiter oder Mitarbeiterin schließlich in einem völlig anderen Gebiet eine berufliche Zukunft finden mussten – meine größte Furcht war, ich könnte meine Mitarbeiter in zukunftslose Bereiche führen. Dass es mir gelungen ist, dies bei den meisten (allen?) meiner Dok-

toranden zu vermeiden, ist die größte Befriedigung aus meiner mehr als 25 jährigen Tätigkeit an der Technischen Universität Karlsruhe.

1.4 Am Argonne National Laboratory

Ab Herbst 1967 wurde mir klar, dass ich aus Ft. Collins weg musste. Und damit begann der Weg zurück nach Deutschland und an die Universität Karlsruhe, wohin ich den Ruf auf den Lehrstuhl Wasserbau III der Universität Karlsruhe im Sommer 1968 erhielt. Ehe ich das Amt in Karlsruhe antrat, nahm ich noch ein Angebot des Argonne National Laboratory (ANL) in Chicago an und legte noch eine sehr fruchtbare und lehrreiche 15 monatliche Zwischenphase (vom 21. April 1969 bis 1. Juli 1970) als Gastforscher in der chemisch - meteorologische Abteilung des ANL ein, das damals eine Einrichtung der US Atomic Energy Commission war. Dort fand ich unter den dortigen Meteorologen sehr unterstützende und erfreuliche Kollegen: *Phil Gustavson*, der Leiter der Abteilung, wurde rasch ein sehr guter Freund – eine Freundschaft, die sich bis zu seinem frühen Tod erhielt¹¹. *Harry Moses*, durch den ich nach Argonne kam – er hatte mich in Ft. Huachuca, bei einem der Treffen der Windkanalleute mit den Meteorologen der US Army aufgefordert, doch nach Chicago zu kommen – sowie einige anderen, die aber bis auf *Paul Frenzen* keine mikrometeorologischen Kenntnisse hatten.

Die Abteilung war hauptsächlich für die Abschätzung der Wirkung großräumiger Ausbreitung von Nuklearstoffen eingerichtet worden. Sie sollte jedoch, im Zuge der Erweiterung des Aufgabenspektrums für das ANL durch Einbeziehung von Umweltforschung, umgeformt werden, und auch kleinräumigere Ausbreitungsvorgänge untersuchen. Hierfür war ein mikrometeorologisches Programm zu entwerfen. Zu diesem wollte ich beitragen, und ich schlug *Phil Gustavson* zwei Beiträge für ein solches Programm vor, die ich in wenigen Monaten abarbeiten wollte, und für die ich seine volle Unterstützung erhielt. Der erste Beitrag war Entwurf und Bau eines kleineren Forschungswindkanals, der für die Untersuchung lokaler Ausbreitungsvorgänge im Grenzschichtbereich geeignet sein sollte. Für diesen entwarf ich die notwendigen Fertigungspläne, konnte ihn aber nur kurz einweihen, ehe wir nach Deutschland umsiedelten.

Der zweite Beitrag bestand darin, in einer Reihe von Vorlesungen die strömungsmechanischen Grundlagen für die mikrometeorologischen Prozesse in der bodennahen Luftschicht, d.h. in der atmosphärischen Grenzschicht, darzustellen - ein Thema, das ich schon in Ft. Collins gerne zusammenfassend bearbeitet hätte. Ich wollte vor allem auch auf offene Fragen der Theorie hinweisen und in meinen Vorlesungen zur Diskussion stellen. Für die Vorbereitung der Vorlesungen stand eine vorzügliche Bibliothek zur Verfügung, die alle gewünschten Zeitschriften und Artikel in kürzester Zeit beschaffte, und so konnte ich in vier Vorlesungen zusammenstellen, was ich für die wichtigsten Felder der Forschung für atmosphärische Grenzschichtströmungen hielt. Die Vorlesungsmanuskripte sollten zunächst nur für die Mitglieder des Argonne Laboratoriums vervielfältigt werden. Das ANL entschied aber, dass die 4. Kapitel nicht als Berichte sondern am besten in Form einer Monographie herauskommen sollten. Das Buch: „Aerodynamic characteristics of atmospheric boundary layers“¹² war das Ergebnis. Diese Monographie fand sehr weite Verbreitung und erschien in mehreren Auflagen, obwohl ich nie versucht habe, sie über einen Verlag als „richtiges Buch“ herauszugeben. Es wurde trotzdem (auch wegen der niedrigen Kosten!) viel verwendet und fand für viele Meteorologen als Textbook Eingang in ihr kollektives Bewusstsein, sodass ich immer wieder Meteorologen fand, die es kannten und wenigstens in der Universität verwendet hatten. Ich schloss jedes Kapitel mit einer Übersicht des von mir erkannten Forschungsbedarfs zum Thema des Kapitels ab, und ich konnte mit Befriedigung feststellen, dass später viele meiner Vorschläge nicht nur von mir, sondern auch von anderen aufgegriffen und bearbeitet wurden.

Auch für meine spätere Tätigkeit erwies sich diese Arbeit als nützliche Vorleistung, denn ich musste mich ja auch für die mich in Deutschland erwartenden Aufgaben vorbereiten. Damals entstand in Karlsruhe unter Leitung von *Eduard Naudascher* bereits das Programm für den Sonderforschungsbereichs (SFB 80) zum Thema „Turbulente Transportvorgänge“, und hierzu waren dringend Vorschläge von mir erwünscht, die ich u. A. auch aus dem ANL Bericht ableiten konnte. Im Zuge dieser Vorbereitung konnte ich in Argonne auch einige der noch zu beschreibenden Windwellenarbeiten abschließen - das sollte die Grundlage für weiterführende Arbeiten im SFB zum Thema Wellenlehre und Küstenschutz legen. So wurde die Zeit am ANL sicherlich eine der fruchtbarsten Perioden meiner Karriere, und ich

bin dankbar, dass ich die Gelegenheit dieses Aufenthalts noch kurz vor dem Eintritt in die ganz andere Tätigkeit eines Ordinarius an einer Deutschen Technischen Universität gehabt habe¹³.

KAPITEL 2: AUFBAU DES INSTITUTS IN KARLSRUHE

Im Sommer 1968 erhielt ich den Ruf auf den Lehrstuhl Wasserbau III der Universität Karlsruhe, den ich dann nach dem 15 monatigen Intermezzo in Chicago zum 1. Juli 1970 übernahm. Das war nicht nur ein persönlicher Wechsel, sondern auch ein Wechsel in ein ganz anderes Ausbildungssystem, wie ich im Anhang 2 genauer darstelle.

2.1 Das Institut Wasserbau III

2.1.1 Entstehung des Instituts für Wasserbau III

Der Lehrstuhl war im Zuge der Erweiterung der deutschen Universitäten nach dem Sputnik Erlebnis neu geschaffen worden, hatte ursprünglich Lehrstuhl für landwirtschaftlichen Wasserbau heißen sollen, den ein bewährter alter Mitarbeiter¹⁴ erhalten sollte – aber die Fakultät unter dem Einfluss des mächtigen Kollegen und ehemaligem Rektors *Leussingk* (der dann unter Kanzler Willy Brandt für einige Jahre Wissenschaftsminister wurde) entschied anders. Die Konzeption der Fakultät sah vor, dass das neue Institut ein Teil eines Großinstituts mit drei gleich berechtigten und gleich ausgestatteten (so dachte ich) Lehrstühlen sein sollte, mit kollegialer Leitung durch drei Ordinarien, wobei das neue Institut Wasserbau III im Wesentlichen die Betreuung eines geplanten Sonderforschungsbereichs im Wasserbau übernehmen sollte. Auf den zugehörigen Lehrstuhl wurde im Jahre 1967 Eduard *Naudascher*, damals Associate Professor an der University of Iowa, berufen, der tatkräftig und erfolgreich an der Einwerbung dieses Sonderforschungsbereichs zu arbeiten begann. Dann starb unerwartet der Inhaber des Lehrstuhls Hydromechanik, Prof. *Breitenöder*, *Naudascher* wechselte auf den verwaisten Lehrstuhl, und ich erhielt im Sommer 1968 den Ruf auf den nunmehr freigewordenen Lehrstuhl Wasserbau III.

Aber wie ich nach meinem Dienstantritt am 1. Juli 1970 feststellen musste, hatte sich in den 2 Jahren zwischen Ruferteilung und meinem Dienstantritt die Situation im Wasserbau an der Universität Karlsruhe grundlegend ge-

ändert. Von einem Großinstitut mit drei Teilinstituten war keine Rede mehr, ein Aufgabengebiet Sonderforschungsbereich stand für mich nicht mehr zur Diskussion: *Naudascher* hatte diese Aufgabe auch als Inhaber des Lehrstuhls Hydromechanik nicht aufgegeben, und der dritte im Bunde, Prof. *Emil Mosonyi* scheute sich von Anfang an, gemeinsame Sache zu machen. Die Neuordnung verlief aber nicht nur im Wasserbau, sondern in allen Universitäten nach wenigen Jahren im Sande, die alte Hierarchie kehrte zurück – mir war das gerade recht: so konnte ich mein Institut gestalten, wie ich es für richtig hielt.¹⁵

Also begann am 1. Juli 1970 die Geschichte eines unabhängigen, auch weiterhin Institut für Wasserbau III genannten Instituts in zwei Räumen im 4. Obergeschoß des Kollegengebäudes für Bauingenieure. An diesem Tag nämlich betrat ich besagte Räume, nachdem mir Rektor *Draheim* die Urkunde meiner Berufung überreicht hatte, und richtete mich erst einmal zusammen mit meinem neuernannten Oberingenieur *Gert A. Schultz* in dem mit kargen Stühlen und Schreibtischen ausgestatteten großen Zimmern ein und begannen, ein Institut zu planen.

2.1.2 Meine Regeln als Professor an der TU Karlsruhe

„Ein gescheiter Mann muss so gescheit sein, Leute einzustellen, die noch gescheiter sind als er“. (Zitat von US Präsident J.F. Kennedy, aus unbekannter Quelle)

Ich stelle dieses Zitat an den Anfang der Berichterstattung über die Tätigkeiten als Professor an der TU Karlsruhe, denn wenn von mir bearbeitete Themen zu einem gewissen Nutzen führten – und mit Nutzen meine ich entweder einen wichtigen Erkenntnisgewinn, oder aber einen Beitrag, um der Praxis die Arbeit genauer oder aber leichter zu machen – dann waren dies in Karlsruhe fast immer meine Mitarbeiter, die die von mir angeregten Arbeiten zu interessanten, oft nützlichen und manchmal auch mich überraschenden Ergebnissen führten. Und es waren meistens diese Mitarbeiter, die die Ergebnisse unserer Arbeit weiter entwickelten und in die Praxis umsetzten. Ich konnte erleben, wie sie sich durch die Bearbeitung der ihnen zugewiesenen Aufgaben soweit weiterbilden konnten, dass sie in der Praxis neue Wege einzuschlagen vermochten - ich habe mit großer Befriedigung verfolgt, wie einige die bei mir gelernten Grundlagen und am IHW

gewonnene Erkenntnisse direkt umsetzen und damit erfolgreiche und zukunftsgerichtete Ingenieurbüros aufbauen konnten – was mich natürlich mit Stolz erfüllte, wie auch, dass viele andere nachher selbst Professoren geworden sind. In ihrer Arbeit, mehr noch als in Veröffentlichungen, lebt das Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (IHW) der Universität Karlsruhe fort.

Arbeitskonzept für die Doktorandenausbildung. Es war meine Strategie, neue Mitarbeiter zuerst an den vielen von uns bearbeiteten Gutachten Erfahrungen sammeln zu lassen - und zwar zunächst unter Betreuung durch die Fachbereichsleiter. Denn ein frisch aus der Uni kommender Diplomingenieur (oder Diplomphysiker oder Diplomhydrologe) muss erst noch lernen, wie man ein Projekt zügig behandelt, und er muss sich mit den Methoden und Verfahren des Fachgebietes vertraut machen, um nach 2 bis 3 Jahren von dritter Seite geförderte Forschungsvorhaben selbständig bearbeiten zu können und damit zügig zu promovieren. Dass die Forschungsvorhaben trotzdem nur selten in der vorgesehenen Zeit von etwa 2 bis 3 Jahren durchgeführt werden konnten, war dabei eingeplant: die durch die Gutachten erworbenen Drittmittel ermöglichten eine durchgängig gleichmäßige tarifgerechte Bezahlung aller Mitarbeiter – sowohl der durch Drittmittel geförderten, als auch der 3 Assistenten, die auch ohne Rücksicht auf ihre Finanzierung in gleichem Maße für das Institut eingesetzt wurden. Dann kam die Phase der Promotion, in welcher der Doktorand nicht nur an seiner Promotion arbeitete sondern auch als Betreuer für eine seinem Fachgebiet naheliegende Vorlesung eingesetzt wurde. Er musste Übungen abhalten und Studenten beraten, auch gelegentlich selbst eine oder die andere Vorlesungsstunde ausfüllen, wenn ich mal gerade auf Reisen war (was ich aber weitest möglich zu Vorlesungszeiten vermied).

Grundsätzlich behielt ich es mir vor, die Themen für Promotionen vorzugeben. In Verfolgung der wissenschaftlichen Schwerpunkte der Institutsarbeit entwickelte ich, aufbauend auf früheren Arbeiten oder neueren Erkenntnissen über die Bedürfnisse der Praxis, eine weiterführende Fragestellung, die ich meistens durch eine Art Bestandsaufnahme präzisierete – z.B. durch Aufzeigen offener Fragen zur Mikrometeorologie in meiner in Argonne entstandenen Monographie „Aerodynamic characteristics of atmospheric boundary layers“ (siehe Abschnitt 2.1), oder durch einen Be-

richt in den Mitteilungen des Instituts (ein Beispiel ist die Zusammenfassung des Erkenntnisstandes zu dichtegeschichtete Strömungen im Heft 3 der Mitteilungen) oder durch einen Konferenzbeitrag. Daraus abgeleitet wurde dann ein Forschungsvorhaben bei einschlägigen Forschungsförderungern beantragt. Durch die Formulierung des Vorhabens im Forschungsantrag und die dort skizzierte Vorgehensweise war der Weg der Bearbeitung des Vorhabens angedeutet, aber keineswegs fixiert: in gemeinsamer Arbeit konkretisierten dann Doktorand und ich nach Bewilligung des Vorhabens den Weg der Bearbeitung, die dann in möglichst großer Selbständigkeit durch den Doktoranden selbst erfolgte. Die Besprechungsdichte zwischen mir und Doktorand wurde erst wieder intensiviert bei der Anfertigung und dann Beurteilung der Dissertation und der eventuellen Veröffentlichung. Es war mir bewusst, dass dies Konzept den Doktoranden sehr viel Freiheit ließ – gegen einen nicht motivierten oder faulen Mitarbeiter hätte ich kein richtiges Mittel gehabt. Deshalb war es entscheidend, dass es mir gelang, fast ausschließlich hoch motivierte Mitarbeiter zu finden, die die ihnen gebotene Freiheit würdigten und nutzten.

2.1.3 Arbeitskonzept für das Institut Wasserbau III

Im Gegensatz zu den meisten Lehrstühlen der Universität waren die Aufgaben des Lehrstuhls für Wasserbau III, auf den ich berufen wurde, nur vage umrissen. Aber ich betrachtete den mir erteilten Ruf mit seiner unklaren Zuständigkeit als eine Aufforderung, durch neue Inhalte die nicht durch andere Lehrstühle abgedeckten Bedürfnisse einer modernen wasserwirtschaftlichen Praxis zu erfüllen.

Als erstes habe ich ein Lehrangebot zusammengestellt, das einerseits die Bedürfnisse nach theoretischen Grundlagen für den geplanten Sonderforschungsbereich abdecken sollte – also Spezialvorlesungen über Zeitreihenanalyse, dichtegeschichtete Strömungen oder Turbulente Transportvorgänge, Wellenlehre. Andererseits sollte es mich aber auch in die Lehre für die Grundausbildung aller Bauingenieure einbinden. Die Lehre hat immer, soweit es ging, Vorrang vor allen anderen Aktivitäten gehabt. Dies sollte auch allen Mitarbeitern immer bewusst sein: daher habe ich jede Vorlesung durch einen Assistenten oder Mitarbeiter mit betreuen lassen, der in der Regel in der Vorlesung anwesend war und sie in den zur Vorlesung parallelen Übungen ergänzte, sie auch gelegentlich wegen meiner

vielen internationalen Engagements halten musste. Ob meine Vorlesungen besonders erfolgreich waren weiß ich nicht, aber ich weiß, dass die betreuenden Mitarbeiter sehr viel gelernt haben und später die Betreuung der Lehre als eine der wichtigsten Komponenten der am Institut erfahrenen Ausbildung würdigten.

Stochastischer Wasserbau Grundprinzip der Forschungsarbeit des Instituts sollte es sein, getreu der deutschen ingenieurwissenschaftlichen Tradition für die wasserwirtschaftliche Praxis dort, wo nötig, verbesserte, auf den Ergebnissen von Grundlagenforschung basierende Verfahren zur Lösung ihrer traditionellen und neuen Aufgaben zu entwickeln. Ich hatte in meinen Tätigkeiten in Ft. Collins erkannt, dass durch die Erfassung der Variabilität natürlicher Prozesse bei allen Bemessungsaufgaben ein wesentlicher Fortschritt in der Behandlung von Ingenieuraufgaben erreicht werden kann, und zwar einerseits durch Einführung von Verfahren der Statistik und der Theorie stochastischer Prozesse in die Bemessungspraxis, und andererseits durch die Berücksichtigung natürlicher Prozesse in der Erstellung von Bemessungskriterien. Daneben wollte ich jedoch auch meine Arbeiten aus Ft. Collins weiterführen. So entstand das Konzept "Stochastischer Wasserbau". Dieses Konzept, das im Wesentlichen durch die nächsten 28 Jahre hindurch verfolgt wurde - stellte ich Kollegen und allen wissenschaftlichen Mitarbeitern und Studierenden der Vertieferrichtung Wasserbau in einem Seminarvortrag im Frühjahr 1971 vor:

Aufgaben des Instituts Wasserbau III (im Jahre 1970 aufgestellt):

1. Verbesserung der Lastannahmen für Bauwerke, die natürlichen Strömungen ausgesetzt sind.
Windkräfte auf Bauwerke
Wellenkräfte auf Küstenschutz, Fluss- und Seebauwerke
2. Verbesserung von Qualitätskriterien für Luft- und Wasserreinhaltung
3. Zusammenarbeit mit Behörden in der Anwendung der erarbeiteten Kriterien
4. *Bearbeitung und Lösung von strömungsmechanischen Problemen der Landwirtschaft und Klimatologie*
5. Verbesserung hydrologischer Entwurfskriterien

Vertieftes Verständnisses von Teilprozessen des Wasserkreislaufes

Systemtheorie hydrologischer Systeme und Anwendung auf Hochwasserschutz, Wassergütewirtschaft und Wasserspeicherung

6. Grundlagenforschung für obige Aufgaben

Erforschung turbulenter Austauschvorgänge mit idealisierten Randbedingungen, -wie Diffusion von Gasen in Luft und Wasser, Feststofftransport, Transport von Lösungen und Feststoffen im Wasser.

7. Wasserwellenlehre, insbesondere Wechselwirkung von Wind- und Wellen in offenen Gerinnen und ihre Einwirkung auf Transportvorgänge, Wind-Wellen Wirkung in Küstennähe und auf Bauwerke

8. Theorien stochastischer Zeitreihen, in Weiterführung der bestehen den Theorien über Auswertung und Deutung experimenteller und gemessener Datenreihen.

Alle diese Themen, mit Ausnahme der in der Tabelle gesperrt bezeichneten, wurden in den folgenden Jahren bearbeitet. Es war mir natürlich klar, dass dieses Programm „Stochastischer Wasserbau“ eine Mischung von Fragestellungen aus sehr verschiedenen Fächern ist. Auf all diesen Gebieten tätig zu sein, bedeutet auf Breite anstatt auf Tiefe zu setzen. Das habe ich in Kauf genommen, und wir haben trotzdem dieses Programm mit einigem Erfolg bearbeitet, - allerdings mit im Laufe der Zeit veränderten Schwerpunkten. So lagen in den ersten Jahren die Schwerpunkte auf Gebäudeaerodynamik und auf der Hydraulik dichtegeschichteter Strömungen, letztere als Beitrag zum Sonderforschungsbereich (SFB). Nicht meinen ursprünglichen Interessen aus der Tätigkeit in den USA, sondern der Logik einer vernünftigen Gliederung des Fachgebiets Wasserbau folgend, verlagerte ich aber die Schwerpunkte der Institutstätigkeit im Laufe der Zeit immer mehr von der Hydraulik und Strömungsmechanik zu Hydrologie und Wasserwirtschaft.

Die gemeinsame Grundlage vieler Teile unseres Programm sollte die in der Tabelle an letzter Stelle genannte Theorie stochastischer Zeitreihen bilden, und daher habe ich gleich zu Anfang meiner Tätigkeit in Karlsruhe erst einmal die wichtigsten bekannten Unterlagen dieser Theorien für kontinuierliche Prozesse zusammengestellt und als Heft 1¹⁶ der Institutsmitteilun-

gen herausgegeben. Ergänzt habe ich dies durch einen Aufsatz zur Extremwertanalyse¹⁷, in dem ich verschiedene Aspekte der Anwendung solcher Modelle, u. A. in der Hydrologie besprochen habe.

Die Untersuchung hydrologischer Zeitreihen war für mich Veranlassung, mich auch mit der Intermittenz¹⁸ als Ergänzung zu kontinuierlicher Zeitreihen zu befassen. Die Turbulenztheoretiker haben diesen Begriff eingeführt, um Prozesse zu beschreiben, die zwischen zwei Zuständen (on – off) wechseln, und ich habe versucht, diesen Begriff auf seine Anwendbarkeit auf hydrologische Prozesse zu überprüfen. Denn es ist ja klar, dass es nicht immer regnet, so dass ein über lange Zeiten gemessener Niederschlag erkennbar diese Eigenschaft hat. Allerdings sagt die Intermittenz nichts über den Prozess innerhalb der on und off Phasen aus. Daher habe ich diese Grundlagen noch durch praktische Arbeiten zu diskreten stochastischen Prozessen ergänzt durch eine für mich wichtige Zusammenstellung von Punktprozessen vom Neyman – Scott Typus¹⁹. Einige wichtige Aspekte zur Behandlung von diskreten Zeitreihen finden sich auch in den letzten Kapiteln meines bereits erwähnten Buches zur angewandten Wahrscheinlichkeitslehre.

Konzept für Beteiligung am internationalen Erfahrungsaustausch. Der deutsche Wasserbau hat eine große Tradition. In Dresden und in Karlsruhe entstanden die ersten Wasserbaulaboratorien der Welt, und im Anfang des 20. Jahrhunderts hatten die deutschen Wasserbauer eine führende Rolle gespielt, nicht nur in der Praxis, sondern auch im internationalen Erfahrungsaustausch, der im Jahr 1935 zur Gründung der International Association of Hydraulic Research and Engineering (IAHR), wie sie heute heißt, führte, mit dem Gründungsmitglied *Theodor Rehbock* aus Karlsruhe als Mitglied Nr.1. Unter Einwirkung des 2. Weltkrieges²⁰ waren die Deutschen ausgeschlossen und die deutsche Sprache als Vereinssprache (neben Englisch und Französisch) abgeschafft worden –einer der Gründe, weshalb viele der alten deutschen Kollegen²¹ sich bisher vom IAHR ferngehalten hatten. Hier konnten die Amerikaner (*Eduard Naudascher* und ich) eine Brücke schlagen. In Karlsruhe habe ich mir daher von Anfang an vorgenommen, auch international tätig zu sein, um zur Wiederherstellung des Ansehens des deutschen Wasserbaus beizutragen, und zwar sowohl durch

Forschungsprojekte als auch durch Beteiligung an internationalen professionellen Gesellschaften. Dazu bot sich mir bald die Gelegenheit.

Es ist eine Tradition, dass sich die Wasserbauprofessoren der deutschsprachigen Länder jährlich einmal treffen. Neu in Karlsruhe angekommen, nahm ich bereits am Wasserbauertreffen 1970 teil, das in Obernach am Walchensee in Oberbayern stattfand. Ich wurde im Kollegenkreis sehr freundlich und ich möchte sagen, erwartungsvoll angenommen, und man war gern bereit, mich als deutschen Vertreter in internationalen Gesellschaften anzuerkennen. (Ein Grund für diese Bereitschaft war sicherlich, dass meine deutschen Kollegen in der Regel nicht sehr gut englisch sprechen konnten - was hat sich hier seitdem geändert! - jedoch Wert darauf legten, wieder international vertreten zu sein). Mit diesem Mandat, das auch für *Naudascher* galt, begannen wir beide, uns um die Vereinsarbeit im IAHR zu kümmern. *Naudascher* war mehr an der inhaltlichen Seite der Vereinsarbeit interessiert – er gründete eine sehr erfolgreiche Reihe von IAHR - Monographien über wichtige Spezialprobleme der wasserbaulichen Praxis, zu denen er selber zwei wichtige Bücher beitrug, - während ich mich an der organisatorischen Arbeit beteiligte – zunächst durch die Organisation eines der alle zwei Jahre stattfindenden IAHR Kongresse. (Er fand im Jahr 1977 in Baden – Baden, statt)²². Dann als Mitglied des Councils, dem Leitungsgremium, Vizepräsident und schließlich Präsident 1985 -89.²³

Das war der Anfang meines Engagements im internationalen Vereinsleben, dem noch viele weitere Funktionen in internationalen wissenschaftlichen Vereinen im In – und Ausland folgen sollten. Bei der Mitarbeit in nationalen und internationalen Arbeitsgruppen ging es mir zwar auch darum, die gewonnenen Erkenntnisse aus unserer Arbeit einem breiteren Fachpublikum vorzustellen, - aber in erster Linie um den Kontakt zu nationalen und internationalen Fachkollegen und ihren Arbeiten. Besonders bereichernd waren die durch solche Aktivitäten gewonnenen Kontakte mit führenden Wissenschaftlern in den entsprechenden Fachgebieten, und manche gute Berufsfreundschaften sind dadurch entstanden. Mit manchen von diesen Kollegen, die ich durch die Tätigkeit in vielen internationalen Organisationen und Verbänden kennenlernte, fühlte ich mich mehr verbunden - auch freundschaftlich - als mit den Fakultätskollegen der eigenen Universität. Zu nennen sind *Jack F. Kennedy*,²⁴ zufällig mit gleichem Namen wie der be-

liebte amerikanische Präsident, *Egbert Prins*²⁵, dem holländischen Generalsekretär der IAHR, mit dem ich jahrelang die Geschicke dieses Vereins mitbestimmte, und *Yoshiaki Iwasa*,²⁶ Professor an der Kyoto Universität, dem vor allem ich meine schönen und erlebnisreichen Besuche in Japan zu verdanken habe.

Auch meinen Mitarbeitern versuchte ich diese Verbundenheit zu vermitteln und ermutigte sie, ihre Arbeit in Fachkonferenzen vorzustellen und dort auch den Kontakt mit Fachkollegen anderer Universitäten und Länder zu suchen. Natürlich hat mich aber auch erfreut, dass ich durch mein Engagement eine gewisse Prominenz erwarb, sodass ich in Deutschland mehrfach als Festredner zu besonderen Anlässen oder bei internationalen Konferenzen als „keynote lecturer“ eingeladen wurde. Dabei habe ich auch die wichtige Rolle gesehen, die internationalen Vereine mit ihren Konferenzen und Programmen als Wissensvermittler und Helfer für Kollegen in den Entwicklungsländern spielen sollten- dies habe ich als einen wichtigen Punkt meiner Vorstellung von den Aufgaben der Forscher an den Universitäten in meinem Festvortrag zum 25 jährigen Bestehen des International Hydrological Programs Hydrologen und Mitgliedern anderer wissenschaftlich – technischer Gesellschaften vermittelt²⁷. Später²⁸ habe ich aus ähnlichem Anlass die Bedeutung der internationalen Gesellschaften noch einmal auf Deutsch beschrieben.

Konzept zum Beruf des Bauingenieurs. Der Vertrauensvorschuss, den mir meine Kollegen gaben, hat sicherlich dazu beigetragen, dass man mir wenige Monate nach meinem Dienstantritt die wichtige Aufgabe antrug, einen Lehrplan für das Bauingenieurwesen für die geplante Bundeswehrhochschule in Neubiberg bei München aufzustellen. Hierfür richtete ich eine Arbeitsgruppe bestehend aus den Karlsruher Fachprofessoren ein und stellte uns die Aufgabe, einen ohne Rücksicht auf Personalien entwickelten idealen Lehrplan für die Ausbildung von Bauingenieuren aufzustellen, zu dem jeder aus seinem Fachgebiet beisteuerte. Wieweit die Bundeswehrhochschule unseren hieraus entstandenen Vorschlag übernahm ist nicht mehr festzustellen, sicherlich trugen viele andere bedarfsbedingte Überlegungen zum umgesetzten Plan bei. Für die Karlsruher Fakultät aber, die gerade im Begriff stand, einen neuen, zeitgemäßigeren Lehrplan zu entwerfen, war diese Arbeit von großem Wert: denn wir übernahmen den Plan für unsere Fakultät – und dieser Plan blieb im Wesentlichen erhalten bis nach

meiner Emeritierung. Ich selber habe aus der Tätigkeit der Arbeitsgruppe einen sehr guten Überblick über das ganze Bauingenieurwesen in seinem Zusammenwirken von Universität und Praxis bekommen, und ich habe mich bemüht, diesen auch weiter zu vermitteln.

In den wichtigsten meiner deutschen Festreden fasste ich meine Vorstellung über den Ingenieurberuf und die Ingenieurausbildung zusammen. Da ist zuerst der Vortrag, den ich in Esslingen anlässlich einer IAHR Tagung als Festredner beim festlichen Abendempfang gehalten habe - am 5. September 1984, dem Tag der Geburt unseres ersten Enkels Marc Konradin Plate. In diesem Vortrag²⁹ setzte ich mich mit der Rolle des Ingenieurs in einer Umwelt- bewussten Gesellschaft auseinander. Das Thema erweiterte ich in einem Aufsatz von 1987³⁰ und untersuchte, wie denn die berechtigten Ansprüche der modernen Wasserwirtschaft in der Ausbildung berücksichtigt werden können. Hierzu machte ich einige Vorschläge. Und wenn ich heute, 30 Jahre später, diesen Artikel nochmals durchlese, dann denke ich, dass ich mit meinen Vorschlägen auch heute noch antreten könnte, da z.B. viele von ihnen auch heute sinnvoll sind und sich leicht in der Ausbildung nach den Regeln eines Bachelor – Master – Doktor Studiums verwirklichen ließen – unter anderem schlug ich vor, dass Studierende nach 6 Jahren Ausbildung und dem Anfertigen einer Abschlussarbeit einen Spezialgrad, vergleichsweise mit dem Facharzt, erwerben sollten: für einen wissenschaftlichen Abschluss der Dr.- Grad, für einen fachspezifischen Einsatz den Grad eines Fachingenieurs (dem Facharzt vergleichbar) – und für die Tätigkeit in der Verwaltung könnte die 2. Staatsprüfung einen vergleichbaren Grad für Beamte oder Angestellte des Staates bringen. Diese Vorschläge wiederholte ich im Jahr 2000 anlässlich der Feierstunde zum 100. Jahrestag der Gründung des Darmstädter Lehrstuhls für Wasserbau in Darmstadt in einem Festvortrag. Dieser Vortrag, in dem ich in einer Art Generalschau die historische Entwicklung des Wasserbaus anhand von Projekten skizzierte, ist als Anhang 2 beigefügt³¹. Dabei habe ich auch den Zusammenhang von Forschung und Praxis umrissen, und auf die Rolle, die die Wissenschaft bei der Entwicklung moderner wasserbaulicher Verfahren gespielt haben. Auch plädierte ich dafür, dass die Forschung doch wieder verstanden werden sollte als Dienstleistung für die Praxis – ein Anliegen, das mich besonders in den letzten Jahren immer sehr beschäftigt hat,

weil ich den Eindruck bekam, dass sich die internationale hydrologische Forschung immer mehr von der Praxis löst.

2.2 Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft.

Die Bedeutung der modernen Hydrologie war mir bereits in Ft. Collins unter dem Einfluss meines Kollegen *Vujica Yevjevic*³² deutlich geworden. Dazu kam, dass der von mir sehr verehrte *Dean Peterson*³³, den ich über zukunftssträchtige Forschungsaufgaben auf dem Gebiete der Hydraulik befragte, besonders die theoretische Wasserbewirtschaftung empfohlen hat, für die die Hydrologie die Grundlage bildet. Weil es dieses Gebiet in Deutschland nach meinen Erfahrungen im Jahr 1958/59 nicht zu geben schien, hatte ich bereits in mein Programm für die Arbeit des Instituts Wasserbau III die Hydrologie aufgenommen. Um meine mehr theoretischen Vorkenntnisse durch Fachwissen zu ergänzen, wollte ich einen Oberingenieur finden, der hydrologische Erfahrungen in das Institut einbringen könnte, und ich fand ihn in *Gert A. Schultz*³⁴, der von 1970 bis zum Jahr 1977 als Oberingenieur des Instituts wirkte. Gemeinsam entwickelten wir ein Hydrologisches Programm. Ich vertrat den Schwerpunkt hydrologische Grundlagen, und er das Gebiet Wasserwirtschaftliche Speicherplanung (über das er sich im Jahre 1976 habilitierte). Nachdem *Gert* uns im Jahre 1977 verließ, um die Professur für Hydrologie und Wasserwirtschaft in Bochum zu übernehmen, machte ich hydrologische und wasserwirtschaftliche Fragestellungen immer mehr zum Hauptschwerpunkt auch meiner Arbeit, was dann im Jahr 1981 in Karlsruhe zur Umbenennung des Instituts Wasserbau III in das Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft führte.

Rückblickend kann ich feststellen, dass bei meiner Emeritierung im Jahr 1997 in den meisten der Arbeitsgebiete des „Stochastischen Wasserbaus“ ein gewisses Ziel erreicht war: Bis zum Jahr 1980 war aus dem Programm „Stochastischer Wasserbau“ ein deutlich erkennbarer Aufgabenbereich des Instituts in der Wasserbau-landschaft Karlsruhe entstanden und durch die eingeführte neue Benennung des Instituts in "Hydrologie und Wasserwirtschaft" mit einer klaren Identität ausgestattet. Wir waren in der Hydrologie und auch in der Gebäudeaerodynamik in der Lage, die praktischen Aufgaben, für die wir geforscht hatten, in optimaler Weise zu lösen. Ich war

durch die Tätigkeit in Ft. Collins darauf vorbereitet, die theoretischen Grundlagen zu legen und Doktoranden an die bearbeiteten Teilgebiete professionell heranzuführen. Die Umsetzung unserer Forschungen in praktische Verfahren betrieb ich dann mit Hilfe meiner leitenden Mitarbeiter: in den letzten Jahrzehnten die Bereichsleiter *Jürgen Ihringer* in der Hydrologie, *Werner Buck* in der Wasserwirtschaft sowie *Wolfgang Bächlin* und nach ihm *Matthias Rau* in der Gebäudeaerodynamik.

Die Fakultät ließ allerdings den Lehrstuhl nach meiner Emeritierung unbesetzt, die Gebäudeaerodynamik ging an das Institut für Hydrodynamik und wurde von *Bodo Ruck* in kleinerem Umfang mit neuen Schwerpunkten weitergeführt, während das Arbeitsgebiet Hydrologie, durch *Jürgen Ihringer*, als ein Teil des Instituts für Wasserbau und Gewässerschutz weiter vertreten wurde. In den folgenden Jahren wurde die Fakultät vergrößert zur Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, und es wurde (nach zwölf Jahren!) doch erkannt, wie wichtig die Hydrologie im Zeitalter einer zunehmenden Ökologisierung für die Fakultät geworden ist. Aus dieser Einsicht heraus wurde der Lehrstuhl neu eingerichtet und seit 2012 gibt es mit dem neuen Lehrstuhlinhaber, meinem früheren Mitarbeiter *Erwin Zehe*, der eine W2 Professur an der TH München aufgab, wieder ein eigenständiges Gebiet Hydrologie.

Im Folgenden werde ich einen Überblick über die wissenschaftliche Tätigkeit in meinem Zuständigkeitsbereich in Ft.Collins und Karlsruhe geben. Es soll dieser Bericht kein wissenschaftliches Werk sein, sondern ich will nur die Linien aufzeigen, die meine Mitarbeiter und ich in Forschung und Entwicklung verfolgt haben und damit eine Art Rechenschaftsbericht geben über das, was getan wurde – und sie sollen auch zeigen, dass meine Rolle in dieser Geschichte die eines Kapitäns war, der zwar die Reise vorgab, die aber nur durch den Einsatz tüchtiger Bereichsleiter und die selbständigen Beiträge der Mitarbeiter zu einem Ziel, und in vielen Fällen weitergehend zu anwendbaren Ergebnissen geführt hat. Dabei muss man deutlich machen, dass unsere Arbeit natürlich nicht im luftleeren Raum stattfand, vielmehr muss man sich unsere Arbeit eingebettet denken in eine internationalen Forschungslandschaft, denn wir haben uns bemüht, stets den Stand des Wissens bei unseren Forschungen zu berücksichtigen. Durch Literaturstudien, durch die zahlreichen Besuche führender international

angesehener Kollegen in Karlsruhe und durch die Teilnahme an internationalen und nationalen Konferenzen bestand ein ständiger Kontakt zur internationalen Wissenschaft, die in den Dissertationen und Veröffentlichungen des IHW auch reflektiert ist.

KAPITEL 3: HYDRAULISCHE ARBEITEN

Nach der Studienzeit in Ft. Collins hatte ich eigentlich in Deutschland eine Karriere als Hydrauliker geplant, und auch in meiner Hilfsassistenten- und Assistentenzeit bei *Prof. Röhnisch* in Stuttgart in den Jahren 1957 -1959 hat sich an diesem Plan nichts geändert. Erst nach unserer Übersiedlung nach Amerika kam die Hinwendung zur Gebäudeaerodynamik und später in Karlsruhe zur Hydrologie. Trotzdem habe ich mich immer in erster Linie als Hydrauliker gefühlt – durch meine frühen Arbeiten in der Hydraulik wurde ich ja erst zur Forschung motiviert – und auch in Karlsruhe noch habe ich die Grundvorlesung „Hydraulik 2“, die ich jedes Jahr vor mehreren Hundert Studierenden des 2. Semesters halten durfte, besonders geschätzt. Auch mein internationales Engagement war ursprünglich Hydraulik orientiert. Daher ist sicherlich nicht verwunderlich, wenn mehr als die Hälfte meiner Vorlesungen als junger Professor in Karlsruhe hydraulischer Art waren, wie auch meine Projekte im SFB 80. Deshalb habe ich gerne auch später noch, nachdem der Schwerpunkt des Instituts ganz auf die Hydrologie verlagert worden war, hydraulische Probleme bearbeitet und einschlägige Dissertationen als Korreferent betreut. Und schließlich kann man ja auch noch mein späteres Engagement für „Stochastische Bemessung“ und die Zuverlässigkeitsanalyse als Beitrag zur Hydraulik sehen. Darüber mehr im 7. Kapitel.

3.1 Hydraulische Beiträge

Meine erste wissenschaftliche Tätigkeit war die bereits erwähnte Untersuchung zum Brückenstau. Dazu kamen 1957 auch Erfahrungen mit einfachen hydraulischen Modelluntersuchungen, denn nach Abschluss der Untersuchungen zum Brückenstau habe ich als Versuchingenieur in Ft. Collins die hydraulische Untersuchung der Hochwasser-Entlastungsanlage für den Bocono Staudamm in Venezuela vorbereitet und dafür das Modell gebaut und erste Versuche durchgeführt. Das war eine Routineaufgabe, Modellgesetz das seit langem bekannte Froude'sche Gesetz, nach dem ich die ersten Vorversuchen durchführen konnte, ehe die auf drei Jahre begrenzte Studiendauer meines Fulbright Stipendiums abgelaufen war und meine Frau und ich (im Juli 1957) nach Deutschland zurückkehren mussten. Auch in Stuttgart, in den letzten Monaten (Frühjahr 1959) in Deutschland vor unserer Übersiedlung in die USA, konnte ich drei kleinere Projekte bearbei-

ten und meine Hydraulikkenntnisse anwenden. Eines war der Entwurf und Bau eines Versuchsstands für Rohrströmungen, um die hydraulischen Eigenschaften von Betonrohren zu testen: der Versuchsstand wurde gerade kurz vor meiner Abreise in die USA fertig. Als zweites konnte ich einen Entwurf für das Wasserbau Laboratorium anfertigen, das Prof. *Röhnisch* bei seiner Berufung zugesagt worden war (erfüllt wurde diese Zusage erst für seinen 1970 berufenen Nachfolger *Jürgen Giesecke*).

Als drittes konnte ich ergänzendes hydraulisches Fachwissen eher zufällig noch in der Zeit in Stuttgart vor der Übersiedlung im Jahr 1959 nach den USA erwerben. Da ich die Überfahrt meiner kleinen Familie nach den USA bezahlen musste, war ich glücklich, dass mir in Stuttgart der damalige Oberingenieur *Kurt Roske* des Instituts für Wasserbau die Möglichkeit bot, durch Druckstoßberechnungen in Nebentätigkeit einige hundert DM dazu zu verdienen. Das waren sehr komplexe Berechnungen, die damals graphisch auf riesigen Arbeitsblättern durchgeführt werden mussten, mit deren Hilfe ich am Ende nachweisen konnte, dass in den Leitungen von Wasserversorgungs-Systemen im Ruhrgebiet keine Gefahren durch Druckstöße entstehen! Ich habe dabei viel gelernt. Denn Druckstoßberechnungen fehlten mir noch in meinem Erfahrungsschatz, und die Literatur dazu habe ich in jenen Tagen als Vorarbeit für das Gutachten sehr intensiv studiert.

Allerdings konnte ich diese Erfahrungen später kaum mehr verwenden³⁵, wenn man von einer interessanten und von mir einfach gelösten Fragestellung absieht, die ich mit *Frank Heidt* in den 80-er Jahren in Deutschland bearbeitet habe.³⁶ Es war dies die Berechnung des Druckes, der durch ein in den Kühlwasserkanal von Kernkraftwerken abstürzendes Flugzeug auf die Verschlussorgane von Wasserzuleitungen für das Kühlwasser ausgeübt wird. Da haben wir die Druckausbreitung in ähnlicher Weise durch Zeichnungen von Druckwellen - Charakteristiken näherungsweise ermittelt

Ein praktisches Ergebnis meiner Arbeit zur Hydraulik führte bereits 1959/60 zu einigen meiner ersten Veröffentlichungen: zu einigen Diskussionsbeiträgen zu Artikeln, die in den IAHR oder ASCE Zeitschriften erschienen, und einer mit *Jim Bennett* erstellten sehr theoretischen Arbeit zur Wirkungsweise eines Messflügels für die Durchflussmessung in Turbinenausläufen³⁷. Das von uns untersuchte Problem war bei der Berechnung des

Wirkungsgrads von im praktischen Betrieb befindlichen Turbinen aufgetreten. Diese erfordert die genaue Kenntnis der Durchflusswassermenge durch die Turbine, die üblicherweise durch Messungen der Geschwindigkeit am Turbinenauslauf mit der Hilfe von Messflügeln berechnet wurde. Es stellte sich die Frage, ob die Turbulenz des Wassers die Messergebnisse für die Wassermenge beeinflusst. Messungen mit vibrierenden Messflügeln in stillem Wasser schienen anzuzeigen, dass durch Verwendung von Messflügeln die gemessene Durchflussmenge durch die Turbine scheinbar größer ist, als die tatsächliche, wofür nach einer Ursache gesucht wurde. Und unser (allerdings vereinfachtes) Modell ergab genau die beobachtete (quadratische) Abhängigkeit des Fehlers der Messflügelmessung von der Varianz der Geschwindigkeitsschwankungen.

3.2 Untersuchungen zum Feststofftransport

Mein Interesse am Feststofftransport hatte ihren Ursprung in einer Vorlesung von *Emory Lane*, einem sehr angesehenen Experten für Geschiebetransport, der seinen Ruhestand nach Jahren der Tätigkeit beim USGS mit einer Lehrtätigkeit an der CSU abschloss. Davon angeregt, aber unter der Aufsicht meines Thesis Advisors *H.K. Liu* schrieb ich eine Studienarbeit, in welcher ich ein neues Konzept für den Feststofftransport entwarf, um zu erklären, warum es zahlreiche verschiedene Formeln für den Feststofftransport gibt, mit denen allen sich zwar an Versuchsrinnen erhaltene Laborergebnisse ziemlich gut nachrechnen lassen, die aber bei der Extrapolation auf große Gewässer weit streuende Ergebnisse liefern. Dazu führte ich Begriffe ein, die heute als „carrying capacity“ und „erosive capacity“ sehr genau unterschieden werden. Die „carrying capacity“ ist die Fähigkeit des Flusses, den Feststoff zu transportieren, die einerseits von der Korngröße des Feststoffes abhängt, d.h. von Feststoffeigenschaften, zum andern aber auch von Geschwindigkeit und Wassertiefe, also von den Eigenschaften des Fließgewässers. Es sind andere Eigenschaften von Feststoffen und Strömungen, die den Erosionsvorgang und damit die „erosive capacity“ bestimmen, d.h. die maximale Feststoffmenge, die das Fließgewässer aus der Sohle abtragen kann. Ich spekulierte, dass es zwei verschiedene Grenzzustände gibt. Der eine tritt auf, wenn die „carrying capacity“ nicht ausreicht, um die erodierte Feststoffmenge zu transportieren. In diesem Fall setzt die „carrying capacity“ die Grenze für den maximal möglichen Feststofftransport. Im anderen Extremfall ist die „carrying capacity“ groß ge-

nug, um alles Erosionsgut zu transportieren, und die „erosive capacity“ bestimmt den Feststofftransport. Diesen letzteren Extremfall beschreiben die klassischen Feststofftransportformeln der Hydraulik.

Solange es sich um Feststoffe gleicher Art und Korngröße handelt, ist dieser Prozess überschaubar. In der Natur treten aber normalerweise verschiedene Feststofffraktionen mit jeweils eigenen Grenzzuständen auf, die zudem, bedingt durch die Variabilität des Abflusses der Flüsse, durchaus nicht überall und zu allen Zeiten erreicht werden, zumal der Feststoff in natürlichen Flüssen häufig aus großen Mengen Schwebstoff in Suspension besteht, der durch Regen von den Landflächen abgespült wird und die „carrying capacity“ limitiert. Dies schien mir eine Erklärung zu sein für die schlechte Übereinstimmung von Berechnungsergebnissen mit hydraulischen Formeln und den Messergebnissen an natürlichen Flüssen. Ich hatte die Literatur gesichtet und war ziemlich vertraut mit der damaligen Fachliteratur zum Feststofftransport, und fand darin nichts, was mir helfen konnte, sodass ich weder Literatur zitieren noch Daten oder gar eine mathematische Theorie vorweisen konnte, um diese Thesen zu erhärten.

Als Thema für meine MS Thesis hatte ich mir das Thema „Beginn der Bildung von Geschieberiffeln auf der Sohle eines Rechteckkanals“ ausgesucht, in Weiterführung der Untersuchungen von *Harry K. Liu*. Er hatte bei *Alvin Anderson* an der Universität von Minnesota³⁸ promoviert, der von *Liu* eine experimentelle Bestätigung seiner Theorie der Entstehung von Geschiebewellen durch Oberflächenwellen erhalten wollte. Diese Theorie hielt ich für falsch, die Experimente von *Liu* hierzu für nicht aussagefähig. Ich glaubte, eine andere Ursache für die Wellenbildung zu kennen, nämlich denselben Vorgang, der auch zur Turbulenzerzeugung an der Sohle in der Grenzschicht der Gerinneströmung führt. Ich hatte aus der Grenzschichttheorie im Buch von *Schlichting* gelernt, dass reguläre Wellen durch die Instabilität der turbulenten Wandströmungen entstehen könnten und habe daran nach Studium von *Lius* Thesis mehr als an die *Kennedy –Anderson* Hypothese geglaubt. Diese (*Tollmien –Schlichting*) Instabilität hängt von der Form des Geschwindigkeitsprofils an der Sohle ab. Ich war der Ansicht, dass sich bereits am Einlauf, wo die Gerinneströmung auf das Geschiebebett auftrifft, eine voll ausgebildete Grenzschichtströmung ausgebildet haben muss, damit eine zu Wellenbildung führende gut definierte Wirbelschicht entlang

der Sohle entstehen kann. Ein solcher Anfangszustand fehlte bei *Lius* Experimenten, sodass nach meiner Meinung seine Ergebnisse nicht geeignet waren für einen Nachweis einer solchen Theorie. Um diese Wirbelschicht zu erzeugen, entwarf ich einen besonderen Versuchsaufbau, der mit Präzision den Beginn der Riffelbildung ermittelbar machte.

Mit diesem Aufbau konnte ich die Ergebnisse meiner Versuche „theoretisch“ erklären: die Wellen entstehen als Grenzflächenwellen (wie Wasserwellen an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser). Die dafür vorliegende „Theorie“ war allerdings wenig theoretisch und beruhte allein auf experimenteller Beobachtung: Wellen entstehen, sowie das Geschiebebett „fluidisiert“ wird, d.h. sobald oder kurz nachdem der Geschiebetransport beginnt. Damit ist das Kriterium für den Beginn der Geschiebebewegung auch das Kriterium für die Wellenentstehung, was ich nachweisen konnte. Aber die wichtige Frage, wie diese Wellen tatsächlich entstehen und was für Wellenlängen sie haben, konnte ich nicht beantworten, vor allem keinen Zusammenhang mit der Instabilität einer laminaren Strömung feststellen. (wie sie die Theorie der Turbulenzentstehung voraussetzte), und auch die ähnliche Kelvin – Helmholtz Instabilität passte nicht – hier so wenig, wie für die Entstehung von Wellen durch Wind auf einer Wasseroberfläche, auf die ich weiter unten zurückkomme. Als Nebenergebnis gelang es mir aber, auf der Basis meiner Versuche, einen Zusammenhang zwischen den Kräften am Einzelkorn und dem Strömungsfeld herzustellen, der geradewegs zum wohlbekannten Diagramm von Shields führte³⁹.

Die Arbeit zog sich hin und wurde neben meiner eigentlichen Berufstätigkeit gemacht – ich war ja Versuchsingenieur und machte endlose Untersuchungen zum Brückenstau als Hauptbeschäftigung. Leider wurden meine Überlegungen und die Ergebnisse meiner Thesis nie veröffentlicht: *H.K.Liu*, benutzte einige meiner Ergebnisse zu den kritischen Bedingungen für die Geschiebewellenentstehung im Schlusswort zur Diskussion eines eigenen, später vielzitierten Aufsatzes, ohne meine Arbeit zu erwähnen. Ich hielt es damals danach nicht mehr für möglich, diese Ergebnisse noch einmal zu veröffentlichen. Wäre ich zu der Zeit in den USA geblieben, hätte ich bestimmt mehr aus der Arbeit gemacht – auf jeden Fall aber übernahm ich die Fragestellung in den Sonderforschungsbereich 80 in Karlsruhe, wo *Gerhardt Hardtke* in einem Rechteckrohr (ohne freie Oberfläche!) bei sehr

genauen Anfangsbedingung phantastische periodische Geschiebewellen erzeugen konnte. Diese Ergebnisse widerlegten zwar eindeutig die These von der Entstehung von Geschiebewellen durch Oberflächenwellen, wir waren jedoch nicht in der Lage, die Entstehung dieser periodischen Wellen zu erklären – ein Grund, warum die spektakulären Fotos von *Hardtke* nie veröffentlicht wurden. Also musste ich dies Problem ungelöst verlassen, und weiß auch nicht, ob es von späteren Forschern zufriedenstellend gelöst worden ist. Immerhin aber verdanke ich die späteren Berufungen im Jahr 1958 nach den USA meinem begeisterten Seminarvortrag über meine Ergebnisse nach Abschluss der Thesis im Frühjahr 1957, und dem Eindruck, den er auf die Zuhörer – besonders auf *Maurice Albertson* - machte.

Ein weiterer Ansatz zur Feststoffforschung ergab sich im Jahr 1959 in den ersten Monaten nach meinem Dienstantritt in Ft. Collins, als ich noch nach Aufgaben suchte. Eine in Ft. Collins angesiedelte Arbeitsgruppe des US Geological Surveys (USGS), bestehend aus *Carl Nordin* und *Bill Sayre*, untersuchte damals folgendes Problem: es sei durch einen Unfall eine aus Körnern bestehende Schadstoffmenge in einen Fluss gelangt und wird nun langsam durch das fließende Wasser wegerodiert und stromabwärts verfrachtet. Das Ziel war es, für jeden stromabwärts gelegenen Punkt im Fluss die Zeit zu bestimmen, ab der die Schadstoffkonzentration (Anzahl der Körner aus einer vorgegebenen Körnermenge) unter einen vorgegebenen zulässigen Wert absinken würde. *Carl Nordin* und *Bill Sayre* hatten hierzu in einer der Versuchsrinnen im Hydraulic Laboratory der Universität umfangreiche Versuche durchgeführt, und genügend Daten lagen vor, um daran Theorien zu testen. Ich machte mich zum Spaß daran, dies Thema analytisch zu behandeln. Ich ging von einer einfachen Modellvorstellung aus, nämlich dass die Teilchen in Sprüngen stromabwärts wandern, und zwar so, dass sie bei jedem Sprung immer einen gleichlangen Weg zurücklegen. Ferner sollte an jeder Stelle des Kanals in jeder Sekunde der gleiche Prozentsatz der dort vorhandenen Teilchenmenge erodiert und damit in Bewegung versetzt werden. Mit diesem Konzept erstellte ich ein typisches „random walk“ Problem, dessen Lösung (in Form der bekannte Poisson Verteilung der mathematischen Statistik) tatsächlich den beobachteten Verlauf der zeitlichen Entwicklung des Konzentrationsprofils recht genau wiedergab. Vor einiger Zeit (Juli 2013) fand ich diese Arbeit unter meinen Unterlagen, und weil ich meine, dass ich da ganz clever vorgegangen war,

habe ich diese Analyse gescant und als Teil der Veröffentlichungsdatei gelistet⁴⁰. An dieser Thematik hat dann vor allem *Bill Sayre*⁴¹ weitergearbeitet. Ich aber hatte meine erste „random walk“ Aufgabe gelöst, was mir eine gewisse Befriedigung gab.

Zu den unveröffentlichten Ergebnissen meiner Forschungen gehört auch die Untersuchung der Erosion durch einen senkrechten Strahl, mit der ich ursprünglich zu promovieren hoffte. Ich hatte bereits Ende 1961 bei Prof. Röhnisch in Stuttgart angefragt, ob eine Promotion möglich wäre und eine positive Rückantwort erhalten. Nach deutscher damaliger Tradition hatte ich mir das Thema selber ausgewählt, und baute hierfür einen kleinen Versuchsstand – ein sehr hübsches Gerät, das sehr gute und präzise Messungen der Erosion durch einen vertikalen Strahl bei verschiedenen Wassertiefen ermöglichte – Messungen, die durch hervorragende Fotos dokumentiert werden konnten, weil ich das Ganze in zwei Dimensionen durchführte und alle wichtigen Teile des Versuchsstandes aus Plexiglas ausgeführt wurden. Nach einem halben Jahr war dieser Versuchsstand mit den bescheidenen Mitteln von \$400 gebaut und erste Versuche an Röhnisch geschickt. Der aber bestand auf einem anderen Thema, sodass die Versuche liegen blieben. Erst in den 70-er Jahren habe ich versucht, mit Hilfe des damals bei uns weilenden Prof. *Ranga Raju*⁴² die Ergebnisse neu zu analysieren. Er und auch ein Chinesischer Student *Z.Y.Yim* (ehe er dann mit einer theoretischen Arbeit über Wasserwellenentstehung promovierte) versuchten sich an den Daten. Mich befriedigten die rein empirischen Diagramme nicht, ich meinte, eine theoretische Analyse wäre möglich, wenn ich mir nur genügend Zeit nehmen würde – aber die Zeit ist nie gekommen, und heute noch liegen die Ergebnisse unveröffentlicht und unerschlossen in meinem Archiv. Wie vieles andere.

So ist das mit meinen Bemühungen um den Feststofftransport gewesen. Mein Interesse daran war im Zusammenhang mit der MS Thesis entstanden, und die Untersuchungen zu diesem Thema konnten nur in Nebentätigkeit, sozusagen als Hobby, betrieben werden. Auch war ich nie mit den experimentellen Ergebnissen zufrieden und habe deshalb hauptsächlich Anfänge hinterlassen. Es war mir jedoch immer klar, dass Feststofftransport auch ein wichtiges Thema der Hydrologie sein müsse, da die Hydrolo-

gie die Modelle für den Feststoffeintrag von erodierenden Flächen liefern muss. Darauf werde ich später im Abschnitt 7.3.7 zurückkommen.

3.3 Dichtegeschichtete hydraulische Strömung

Zu den durch die Anforderungen der Kraftwerksindustrie an die Hydrauliker gestellten Aufgaben gehören Lösungen für die Probleme, die bei der Versorgung der Kraftwerke mit den erforderlichen enormen Mengen an Kühlwasser entstehen. Ein typischer Anwendungsfall ist die Entnahme von kaltem Wasser zu Kühlzwecken, das in einem Kreislauf aus einem fließenden Gewässer entnommen und nach Nutzung, erwärmt durch den Kühlungsprozess, wieder in das Gewässer zurückgeleitet wird. Weil das erwärmte Kühlwasser leichter ist als das kalte Wasser des Gewässers, bildet es bei der Einleitung eine Deckschicht aus warmem Wasser auf dem Flußwasser, die bei der Entnahme zurückgehalten werden muss – eine Aufgabe von besonderer Bedeutung für die vielen Kernkraftwerke, die in den sechziger und siebziger Jahren entlang von Flüssen oder am Meer gebaut wurden. Besonders wichtig ist dieser Vorgang im Küstenbereich, wo verhindert werden muss, dass das in das Meer eingeleitete Kühlwasser oder erwärmtes Abwasser neu entnommen wird. Es war dies eine gute Anwendung der Theorie dichtegeschichteter Strömungen, in diesem Fall der Strömung von leichten Flüssigkeiten auf schwereren – typische Fälle sind leichtes Wasser auf schwererem, Öl auf Wasser, oder mit Feststoff beladenem Wasser, das in das klare Wasser eines Speichers einströmt. Wenn die beiden Schichten sich nicht vermischen, können solche Vorgänge sehr elegant mit den Mitteln der klassischen Hydraulik gelöst werden – ganze Gruppen von Forschern, vor allem am MIT in den USA unter *Donald Harleman*, haben solche Aufgaben bearbeitet.

Mit der Problematik von Schichtenströmungen von leichtem Fluid auf schwererem hatte ich mich bereits in Ft. Collins im Rahmen einer Lehrveranstaltung auseinandergesetzt, veranlasst durch *Hsieh-Wen Shen*⁴³, der damals noch in Ft. Collins tätig war. Etwa 1968 schlug er mir vor, mit ihm zusammen eine Vorlesung über Schichtenströmungen zu halten. Ich übernahm das Thema „hydraulisch dichtegeschichteten Strömungen“ mit Anwendung auf Kühlwasserentnahmen. Dies ist der hydraulisch am besten bearbeitete Fall dichtegeschichteter Strömungen. Er entsteht, wenn eine Schicht leichterer Flüssigkeit über eine stehende oder sich horizontal be-

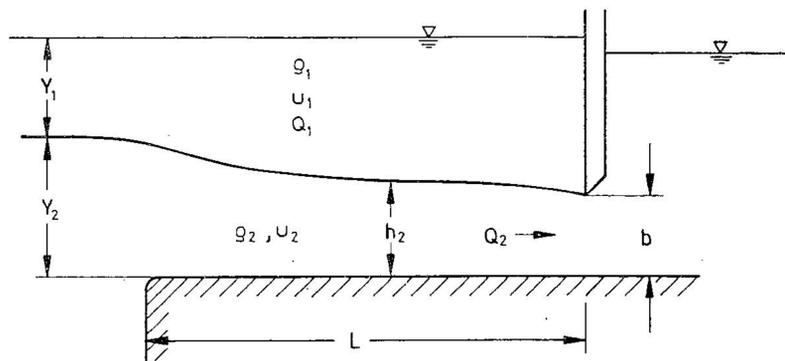
wegende Flüssigkeitsschicht fließt und sich mit konstanter Geschwindigkeit relativ zur Unterschicht bewegt. Ich behandelte die klassischen Fälle einer kontinuierlichen Einleitung von schwerer Flüssigkeit in eine leichtere, oder der kontinuierlichen Entnahme von Kühlwasser aus einem Fluss. Die Ergebnisse habe ich später in einem Mitteilungsheft Nr.3 des IHW zusammengefasst.⁴⁴ Dabei betrachtete ich in diesem Heft durchgehend Schichtungseffekte, bei denen die Grenze zwischen den beiden Schichten durch eine scharfe Trennfläche gebildet wird.

Eine sehr wertvolle Ergänzung zu diesen Zweischichtenfällen hat später *Richard Denton*⁴⁵ in einem weiteren Mitteilungsheft Nr. 20 ⁴⁶ beigetragen, so den instationären Fall einer Einleitung einer Flüssigkeit in eine leichtere oder schwerere Flüssigkeit, wie z.B. die Einleitungen von kaltem oder warmen Wasser in Talsperren oder Wasserspeicher. Besonders interessant war auch der Fall der Einleitung eines Wasserstromes von bestimmter Dichte in einen Behälter, in welchem das Wasser mit von unten nach oben linear abnehmender Dichte geschichtet ist. In einem solchen Fall schichtet sich die zugeführte Wassermenge in der Tiefe im Behälter dort ein, wo die Flüssigkeit dieselbe Dichte wie die Einleitung hat. Diesen Fall hat *Klaus Faust* untersucht und darüber im gleichen Mitteilungsheft Nr. 20 berichtet.

3.3.1 Einmischung über Schichtgrenzen.

Bei unseren Versuchen zum Thema Schichtenströmungen stellte sich heraus, dass die Trennfläche zwischen leichtem und schwerem Wasser keineswegs scharf bleibt. Wenn bestimmte Grenzwerte des Dichteunterschiedes unterschritten, bzw. der Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Schichten überschritten werden, dann wird die Trennfläche zwischen beiden Schichten instabil und die Schichten beginnen sich entlang der Trennschicht aufzulösen. Mit zunehmenden Unterschieden entsteht eine immer stärkere Vermischung, bis schließlich beide Flüssigkeiten zu einem homogenen Gemisch werden. Nach Einmischung ist weder der Massenstrom noch die Dichte der unteren, dichteren Schicht konstant und die Einmischung leichteren Wassers muss in der Berechnung berücksichtigt werden, wofür die hydraulischen Gleichungen modifiziert werden müssen. Wie dies zu geschehen hat, muss im Experiment untersucht werden.

Diese Thematik: „Einmischung bei Schichtenströmungen“ hatte ich mir als unseren Beitrag zu dem Problemkreis vorgenommen und entsprechende Projekte in die Sonderforschungsbereiche 80 und 210⁴⁷ eingebracht. In diesen Projekten wurden von Mitarbeitern meines Instituts zwei Unterthemen bearbeitet: zum einem wollten wir die Auswirkung der Einmischung bei praktisch wichtigen Zweischichtenvorgänge analysieren, wobei wir uns die im Bild gezeigte und oben geschilderte Entnahme von schwerem Wasser unter einer leichteren Schicht mit Hilfe eines Rückhaltewehres - den Fall einer „selektiven Entnahme“ - vornahmen, zum zweiten sollte ein Kriterium für die Instabilität der Trennfläche zwischen den beiden Flüssigkeiten aufgestellt werden.



Zum Thema: selektive Entnahme, mit Dichte ρ , Geschwindigkeit u und Entnahmemenge Q pro Breitereinheit.

Zum ersten Unterthema hat *Achim Lohmeyer*⁴⁸ in seiner Dissertation experimentell untersucht, wie sich die Einmischung auf die selektive Entnahme unter einem Wehr auswirkt. Dabei vervollständigte er das bis von D. Harlemann und seinen Schülern aufgestellte Modell vereinfachte Modell durch Einbeziehung der dort nicht verwendeten Energiegleichung und stellte fest, dass die Einmischung durch die Zwischenschicht Konsequenzen hat für die Übertragung von Modellergebnissen auf den Maßstab der Natur⁴⁹. Er zeigte, dass zum Erhalt der Modellähnlichkeit neben den üblichen Kriterien für die hydraulische Modellierung auch eine modellgerechte Einmischung über die Trennfläche erzielt werden muss⁵⁰.

3.3.2 Stabilität der Zwischenschicht.

Die zweite Aufgabe, die Entwicklung eines Kriteriums für die Stabilität der Zwischenschicht zwischen einem leichteren und einem schweren Fluid

erschien mir als besonders interessantes Forschungsgebiet. Ich bin überzeugt, dass die Erklärung für die Entstehung von Instabilitäten zwischen Fluiden verschiedener Dichte für alle Arten von geschichteten Strömungen - Wind und Wasserwellen, Wasserschichten verschiedener Dichte - wie z.B. Salz- und Frischwasser - oder aber Sandwellen an der Sohle eines Gerinnes - letztlich durch ein gemeinsames Modell dargestellt werden muss. Grob gesprochen, entsteht durch die Reibung zwischen zwei Flüssigkeitsschichten zunächst eine Instabilität, die zur Bildung einer wellenförmigen Verformung der Trennfläche zwischen den beiden Fluiden führt. Je größer der Dichteunterschied, umso schärfer bleibt die Trennfläche in Wellenform erhalten, - interne Wellen in der Zwischenschicht zwischen Flüssigkeiten verschiedener Dichte, Wasserwellen und Sandwellen als ausgeprägte Beispiele - während bei geringen Dichteunterschieden die Wellen kaum in Erscheinung treten und dort der Endzustand: eine vollständig durchmischte Zwischenschicht mit graduelltem Übergang der Dichte von der unteren zu der oberen Schicht schon bei kleinen Relativgeschwindigkeiten auftritt.

Es war das Ziel eines unserer Projekte im Sonderforschungsbereich 80, diese Konzeption zunächst an den verschiedenen Medien experimentell zu untersuchen, mit der Hoffnung, die Versuchsergebnisse mit den verschiedenen Fluiden verwenden zu können, um daran orientiert ein noch nicht existierendes Gesamtmodell zu entwickeln. Als erstes untersuchten *Reinhard Friedrich* und ich die Stabilität der Zwischenschicht zwischen warmen und kaltem Wasser (bzw. Süß- und Salzwasser), wofür *Reinhard Friedrich* in seiner Dissertation die experimentellen Grundlagen lieferte. Hierfür bauten wir im Rahmen des SFB 80 eine Zweischichtenrinne, bei der eine leichtere Warmwasserschicht vorgegebener Dicke und Geschwindigkeit über eine untere kalte Wasserschicht abfließt. Die Geschwindigkeiten beider Schichten wurden unabhängig voneinander eingestellt, sodass die beiden Schichten sich nicht nur parallel mit verschiedener Geschwindigkeit bewegen konnten, sondern durch die Bewegung auch in beiden Schichten interne Turbulenz entstehen konnte. Es gelang uns an Hand der Ergebnisse von *Friedrich* ein Kriterium für die Stabilität der Zwischenschicht und das Auftreten der ersten Wellen zu entwickeln⁵¹. Wir konnten zeigen, dass bei Überschreiten dieses Kriteriums und mit zunehmendem Geschwindigkeitsunterschied die Vermischung sehr rasch zunimmt, bis ein Zustand homogener Vermischung eintritt. Die durch zahlreiche Experimente auch

anderer Forscher abgedeckte Entwicklung dieses Kriteriums gehört zu den besten Beiträgen, die wir zum Thema Schichtenströmungen geleistet haben. Allerdings, die uns vorschwebende allgemeine Theorie der Instabilität von Zwischenflächen haben wir nicht aufstellen können.

Besonders eindrucksvoll ist es, wenn sich ein Wasser – Sand Gemisch bei rapider Strömung eines Flusses über einem erodierbaren Flussbett bildet. *Zhao Yin Wang* erzählte uns, man beobachte in den sedimentbefrachteten Flüssen Chinas, dass in extremen Fällen einer solchen Instabilität plattenförmige Sandschichten aus der Sohle gerissen und bis an die Oberfläche des Flusses aufgetürmt werden. Weit besser bekannt ist der Fall, wenn Luft und Wasser übereinander brausen: wenn die Gischt (die ja nichts anderes als das Luft-Wassergemisch im Frühzustand der Vermischung ist) bei einem heftigen Sturm auf See so dicht wird, dass Menschen in kleinen Segelbooten darin ersticken – buchstäblich ertrinkend! Im Rahmen eines Gutachtens machten wir hierzu in den 80-er Jahren Versuche im Wind – Wellenkanal, um die Spraybildung zu parametrisieren. Es zeigte sich⁵², dass nach Überschreiten einer kritischen Windgeschwindigkeit die Erzeugung von Tropfenmasse mit einer sehr hohen Potenz der Windgeschwindigkeit zunahm, sodass der Schluss gezogen werden musste, dass sich sofort nach Überschreiten dieser Geschwindigkeit praktisch momentan eine vollständige vermischte Schicht von Wasser und Luft bildete, mit einem sehr engen Zwischenzustand mit geringen Tropfenmassen – ein bemerkenswertes Ergebnis.

Später haben wir die Arbeiten über die Stabilität von Schichtenströmungen und ihre Konsequenzen für die Versuchspraxis in einem Übersichtsartikel abschließend zusammengefasst⁵³, auch wenn die erkannten Möglichkeiten experimenteller Untersuchungen von Schichtenproblemen zu immer neuen Fragestellungen verlockten: so z.B die Frage nach der Auswirkung von Störkörpern auf dem Boden der unteren Schicht auf die Stabilität der Zwischenschicht zwischen fließenden schwerem und leichtem Wasser. *Theo Loy* machte hierzu eine Reihe interessanter Versuche. Wir waren sehr froh, dass einige dieser Aktivitäten nach der abschließenden Dissertation aus dem Jahr 1990 von *Theo Loy* am Institut für Wasserbau und Kulturtechnik weitergeführt wurden. (Ergebnisse sind mir allerdings nicht bekannt).

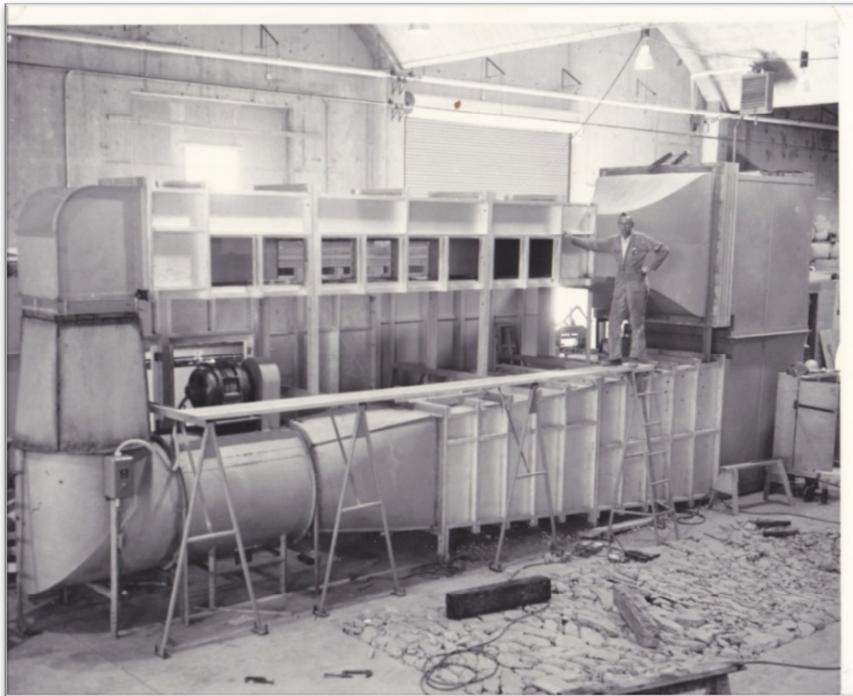
KAPITEL 4: GEBÄUDEAERODYNAMIK

Die turbulente Grenzschicht am Boden einer Windkanalströmung dient, bei geeigneten Anfangsbedingungen, als dynamisches physikalisches Modell der unteren Atmosphäre. Dadurch kann der Windkanal für die Anwendung in der Gebäudeaerodynamik verwendet werden, wobei die Gebäudeaerodynamik drei Teilgebiete umfasst: die Nachbildung mikrometeorologischer Prozesse, die Untersuchung von Ausbreitungsvorgängen, vornehmlich von Schadstoffen, und die Ermittlung von Windkräften auf Bauwerke. Windkanäle für solche relativ großmaßstäblich durchzuführende Untersuchungen gab es im Jahr 1959 noch nicht, und meine professionelle Karriere begann damit, in Ft. Collins von 1959 – 1963 solche Windkanäle zu bauen.

4.1 Karrierebeginn als Windkanalkonstrukteur

In den späten 50-er Jahren empfahl der Meteorologe Prof. *Heinz Lettau*⁵⁴ der US Army, Untersuchungen zu Austauschprozessen in der bodennahen Atmosphäre statt in der Natur lieber in einem mikrometeorologischen Windkanal durchzuführen. Er war überzeugt, dass mikrometeorologische Prozesse in atmosphärischen Grenzschichten viel genauer als in der Natur und unter stationären Bedingungen in kleinerem Maßstab im Windkanal untersucht werden könnten, und er wusste seine Überzeugung auch den von ihm beratenen Generälen bei der US Army zu vermitteln, die aus mancherlei Gründen an der Erforschung des thermischen und strömungsmechanischen Geschehens in der unteren Atmosphäre interessiert waren. Da es solche Windkanäle noch nicht gab sollten sie daher erst einmal gebaut werden. Als Partner für Bau und Betrieb eines solchen Windkanals wurde eine Universität gesucht, denn die mikrometeorologische Forschung sollte, theoretisch wenigstens, zweckfrei bleiben. Dabei fiel die Wahl auf die CSU. Dort hatte *Maurice Albertson* einige Jahre zuvor erste Schritte zur Grenzschichtforschung in Windkanälen eingeführt⁵⁵, und *Jack E. Cermak* und *Ike Koloseus* hatten an einem einfachen Windkanal erste Versuche zur Nachbildung der atmosphärischen Grenzschicht gemacht. Im Jahr 1957 wurde ein erster Auftrag für einen mikrometeorologischen Windkanal nach Ft. Collins vergeben, und als ich im Sommer 1959 aus Deutschland mit meiner Familie nach Ft. Collins übersiedelte, war eine erste Bauphase bereits ausgelaufen, und ein neuer Antrag für den Weiterbau war gestellt – allerdings

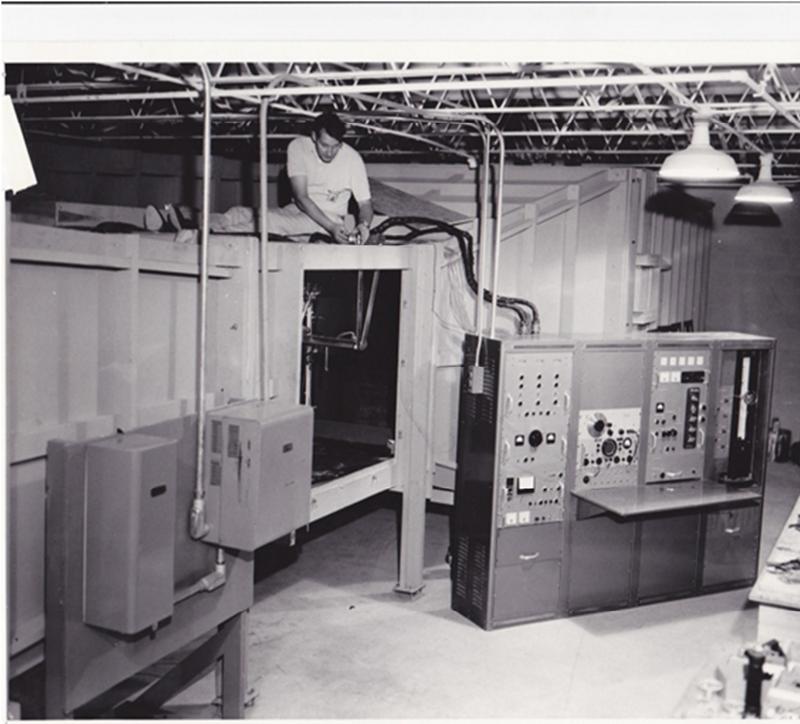
stand eine Bewilligung noch aus. Als Ergebnis existierten nur eine Prinzipskizze für den Windkanal, bereits gebaut war die für den Windkanal vorgesehene Teststrecke in Rohform – sie war jedoch noch nicht thermisch isoliert und hatte weder eine Einlaufdüse, noch hatte der als Antrieb vorgesehene, in einer gewaltigen Stahlkonstruktion montierte Flugzeugpropeller einen Motor. Und diesen Windkanal sollte ich nun fertig bauen.



Der kleine Versuchswindkanal bei der Montage in Windsor, Ontario

Um die Wartezeit bis zur die Bewilligung der Mittel für den großen Windkanal zu nutzen, um uns auf die geplanten experimentellen mikrometeorologischen Untersuchungen vorbereiten zu können, und um den bereitstehenden zwei Graduate Students ihre Promotion zu ermöglichen, schlug ich vor, erst einmal einen kleineren Windkanal für erste Grenzschichtuntersuchungen im kleineren Maßstab zu bauen. Diesen aus Universitätsmitteln bezahlten Windkanal entwarf ich so, dass er als zukünftiges Laborgerät für kleinere Forschungsaufgaben im Rahmen der Ausbildung eingesetzt werden konnte. Aber als dieser Windkanal fertig war, wurde er nicht mehr gebraucht! Daher nutzten wir eine günstige Gelegenheit und verkauften ihn

an die University of Windsor in Canada, wohin ich dann zur Montage reisen musste. Das Bild zeigt den Kanal in Windsor, mit *George Stoval*, der die Montage durchführte. *George* war eine unschätzbare Hilfe, und es war ein Glücksfall, dass er auch später als Vorarbeiter für den Bau aller von mir entworfenen Windkanäle bei uns blieb. Wir wurden ein Team, das ohne ihn nicht so erfolgreich gewesen wäre.



Das Bild zeigt die Montage in White Sands, unter sehr beengten Verhältnissen

Der kleine Windkanal wurde in Ft. Collins überflüssig, weil sich die Möglichkeit ergab, provisorisch die vorhandene Versuchsstrecke für den großen mikrometeorologischen Windkanal mit seinem wesentlich größeren Querschnitt zu verwenden. Denn während wir noch auf die Bewilligung der Mittel für den Weiterbau des mikrometeorologischen Windkanals warteten, beauftragte uns die meteorologische Abteilung des White Sands Proving Grounds der US Army (wo Raketen getestet wurden), einen weiteren Windkanal für das Testen von Windmessgeräten (Anemometern) zu liefern. Diesen musste ich auch planen, konstruieren und in White Sands aufstellen. Der Raum, in welchem dieser Windkanal stehen sollte, war vorge-

geben, und darin sollte ein Windkanal mit möglich großem Querschnitt und kurzer Messstrecke (da konstante Strömung erforderlich war) entstehen.

Durch diesen Auftrag sah ich die Möglichkeit, die vorhandene Versuchsstrecke des zukünftigen mikrometeorologischen Windkanals provisorisch für Forschungszwecke zu verwenden, und zwar indem ich den Querschnitt der Versuchsstrecke des zu erstellenden White Sands Windkanals genau so groß wie den des geplanten großen mikrometeorologischen Windkanals plante. Da der Bereich an Windgeschwindigkeiten für den White Sands Windkanal durch kommerziell erhältliche Belüftungsgebläse abdeckbar war, schaffte ich sofort nach Auftragserteilung für den White Sands Windkanal ein solches Gebläse an. Es konnte wegen der gleichen Größe der Querschnitte ohne größere Probleme an die bestehende Versuchsstrecke für den zu erstellenden Mikrometeorologischen Windkanal montiert werden, die dadurch während der Bemessungszeit und der Bauphase des White Sands Windkanals für Forschung an Grenzschichten bei neutraler Schichtung verwendet werden konnte. Durch dieses Provisorium konnte ich die Durchführung von Versuchen für drei Dissertationen ermöglichen. Ein indischer Student *Nagabushanaiah* wurde zuerst fertig. Der zweite war *Mike Poreh*⁵⁶ aus Israel, der ein guter Freund wurde. Er lehrte mich, Strömungsfelder zonenweise zu betrachten, also z.B. ein anderes analytisches Modell für das Nahfeld um einen Körper zu verwenden als für den Nachlauf - eine Methode, die ich später oft verwendet habe. Der dritte Student war ich selber, davon mehr weiter unten. Erst nachdem alle drei ihre Experimente abgeschlossen hatten, stellten wir den White Sands Windkanal fertig und lieferten ihn dem Kunden aus.

Und dann kam im Jahr 1961 die Bewilligung für den Mikrometeorologischen Windkanal von der US Army, und in den Jahren 1961 -1962 baute ich, während *Jack Cermak* sich für ein Jahr nach Cambridge, England in ein Sabbatical Jahr verabschiedete, im Hauptberuf diesen Windkanal. Als Bauplatz für das Gerät war die Halle des „Industrial Arts Buildings“ vorgesehen, in welchem sich auch das Windkanalprovisorium befand. Das war eine riesige Halle auf dem Campus, in welchem ursprünglich Landmaschinen und ähnliche Großgeräte untersucht werden sollten, das aber dann von der Universitätsleitung für die Windkanäle zur Verfügung gestellt worden war.

Aber ehe ich mit dem Entwurf des großen Windkanals begann (nach einer Prinzipskizze von *Jack Cermak*, die sich an den

klassischen Göttinger Windkanälen von *Ludwig Prandtl* orientierte), hatte sich die Gebäudeplanung der Universität grundlegend geändert. Im Rahmen einer Neuplanung der Versuchsanlagen des Bauingenieurwesens sollten die Abteilungen für Wasserbau und Gebäudeaerodynamik in einem neuen Gebäude in den Foothills weit außerhalb der Stadt Ft. Collins untergebracht werden. Das Gebäude dort sollte aus drei parallel angeordneten Hallen, verbunden durch einen davorgesetzten Bürotrakt bestehen. Eine dieser Hallen war für die Gebäudeaerodynamik vorgesehen und wurde das „Fluid Dynamics and Diffusion Laboratory“ (FDDL). Der große Windkanal hätte sie vollständig ausgefüllt. Damit in dieser Halle noch Platz für weitere Versuchsstände frei blieben, legte ich den Rücklauf des Kanals an die Außenseite des FDDL. Das war möglich, weil die Bauarbeiten an der Halle und am Windkanal parallel und auf einander abgestimmt durchgeführt werden konnten. Dabei konnten große Öffnungen in den Außenwänden eingeplant werden, um den Kanal über drehbare Ecken von einem geschlossenen in einen offenen Windkanal mit Be- und Entlüftung an die Außenluft umwandeln zu können, was in Anbetracht der Möglichkeit des Arbeitens mit Gasen für die Untersuchung von Ausbreitungsvorgängen nötig zu sein schien.

Ursprünglich war geplant, den größten Teil der Konstruktion durch Firmen durchführen zu lassen. Es kam als ein Schock, als ich feststellen musste, dass die vorgesehene Kühlung und Heizung der Luft allein schon mehr kosten würden, als an Mitteln für das ganze Projekt vorhanden waren! Dazu waren noch wichtige Zusatzteile nicht eingeplant, wie die Kosten für die Gleichstromgenerierung - 110V für den Motor und 28V für die Kontrolle der Propellerflügel, sowie die ganze Isolierung des Kanals, plus einer Bodenplatte, die gekühlt und erwärmt werden musste, und dazu noch die instrumentelle Ausrüstung - all dies durch kommerzielle Firmen planen und bauen zu lassen war einfach mit den 300.000 \$, die man mir als Projektsumme zur Verfügung stellte, nicht zu finanzieren⁵⁷! Daher übernahm ich selbst alle Bemessungs- und Konstruktionsaufgaben für die Temperatur und Luftfeuchtigkeitskontrollen, wozu ich mich z.B. in Geheimnisse der Wärmelehre einarbeitete, um sowohl die Temperatur- und Feuchterege- lung als auch der notwendigen Isolierung mit konventionellen Elementen der Heiz- und Lüftungstechnik durchzuführen zu können. Auch habe ich für

die Fertigstellung des Mikrometeorologischen Windkanal meine Entwürfe an dem in der Halle des „Industrial Arts Buildings“ vorhandenen Material orientiert oder aus Army Surplus angeschafft. ⁵⁸Ich habe gezielt auf dies Material zurückgegriffen und für die Fertigstellung des Mikrometeorologischen Windkanal nach meinen Entwürfen neben manchem von *Cermak* beschafften Material auch einiges verwendet, das auch ich aus US Army Surplus bezog, wodurch die Gesamtkosten sehr gesenkt werden konnten. Und am Ende sind wir mit dem zur Verfügung stehenden Betrag ausgekommen, und mit Stolz konnte ich 1963 einen Bericht: „Mission accomplished!“ vorlegen ⁵⁹.

Nicht nur waren wir mit den vorhandenen Betrag ausgekommen, ich konnte sogar einiges noch in die Instrumentierung investieren: vor allem ein Bandgerät anschaffen, das es ermöglichte, elektronisch Turbulenzsignale aufzuschreiben. Da damals ein solches Bandgerät sehr teuer war, hielt ich es für notwendig, uns vor Ort bei anderen Forschergruppen über ihre Erfahrungen zu informieren. Daher haben *Lionel Baldwin* und ich im Jahr 1962 eine Informationsreise gemacht, die uns zunächst an das MIT führte, wo sich damals Professor *Peter Eagleson*⁶⁰ auch mit der Turbulenzmessung beschäftigte. Bei dieser Informationsreise kamen wir auch an das US Bureau of Standards in Washington, wo der angesehene Turbulenzforscher *Klebanoff* die ersten echten Turbulenzanalysen durchführte – mit Hilfe eines elektronischen Computers, der einen ganzen großen gekühlten Raum füllte (weil alle on-off Schaltungen mit Vakuumröhren betrieben werden mussten – der Transistor war gerade erst erfunden!) und ich wurde durch diesen Riesenaufwand davon überzeugt, dass Auswertungen von Turbulenzsignalen so weit wie möglich durch Analogschaltungen durchgeführt werden müssten, und zwar mit Hilfe des besagten mehrkanaligen Bandgeräts. Damals war das schon die richtige Entscheidung, wenn auch die Datenbearbeitung sehr viel Theorie verlangte, (die zu messenden Geschwindigkeiten mussten über nichtlineare Gleichungen aus den elektronischen Hitzdrahtsignalen berechnet werden). Neben der Theorie gab es auch ziemliche technischen Probleme bei der Umsetzung dieser Messtechnologie, und wir begrüßten daher, dass *Lionel Baldwin* die Universität davon überzeugen konnte, den besonders erfahrenen Hitzdrahtexperten *Virgil Sandborn* von der NASA abzuwerben, der in Ft. Collins ein ausführliches Buch über Hitzdrahtanemometrie schrieb, mit allen Tricks, mit denen die

schwierigen Nichtlinearitäten der Turbulenzmessungen überwunden werden konnten – ein Buch, das durch die sich rasant entwickelnde Digitaltechnik genauso obsolet wurde, wie ja auch der mechanische Rechner überhaupt!⁶¹

Ich habe meine Tätigkeit als Windkanalbauer so ausführlich beschrieben, weil sie eine wichtige Reihe kleiner Erfolgserlebnisse mit sich brachten, die ich in den Anfangsmonaten in Ft. Collins sehr gebraucht habe. Ich war zufrieden, dass ich diese Aufgabe so selbständig bewältigen konnte – natürlich vor allem durch den großartigen Einsatz der Werkstatt unter *Ralph Asmus*⁶², der technischen Zeichnerin *Hanai Akari*, und der Bauleitung durch *George Stovall*, und dass, als *Cermak* nach seinem Sabbatical Year 1962 aus England, zurückkehrte, auch der mikrometeorologische Windkanal fertig war.

4.1.1 Erste Gebäudeaerodynamische Untersuchungen in Ft. Collins.

Zunächst war es notwendig, die aerodynamischen Eigenschaften des neuen mikrometeorologischen Windkanals zu erkunden, und für eine gute zweidimensionale Grenzschicht am Boden der Versuchsstrecke bei neutraler Schichtung zu sorgen. *Richard Marshall* hieß der Student, der diese Untersuchungen durchführte, der aber nach einiger Zeit aufgab und sich ein anderes Thema für seine Dissertation suchte. Denn es gelang uns auch mit den raffiniertesten Einbauten nicht, die Dreidimensionalität der Kanalströmung zu überwinden. Wir mussten einsehen, dass nur das mittlere Drittel der Breite des Windkanalbodens einigermaßen zweidimensionalen Charakter zeigte, dass die lange Versuchsstrecke eher die Entwicklung der Grenzschicht am Boden behinderte. Denn obwohl *Cermak* die Versuchsstrecke so konstruiert hatte, dass sich der Querschnitt mit Abstand vom Einlass verbreiterte, schränkten die Grenzschichten an den Seitenwänden die Grenzschichtströmung am Kanalboden ein, sodass die Strömung sich zur Rohrströmung in einem quadratischen Rohr hin entwickelte. Das hätte uns von vornherein klar sein müssen, und an diesem konzeptionellen Fehler ist wahrscheinlich auch die spätere Nutzung des Windkanals gescheitert. Daher habe ich bei späteren Windkanälen, die wir z.B. in Karlsruhe bauten, auf eine lange Anlaufstrecke verzichtet und eine viel besser zwei-

dimensionale Grenzschicht künstlich durch Störelemente im Einlauf erzeugt – wie andere Windkanalbauer schon vor mir. Damit haben wir aber auf die gute Modellierung der Turbulenz in der Außenschicht verzichtet, die nur durch eine lange Versuchsstrecke entstehen kann, wie Sandborn und ich zeigten⁶³.

Mit den Anfangsversuchen von *Richard Marshall* war dann das für die Testphase verfügbare Geld aufgebraucht, und ich glaube, dass der große Windkanal nie gänzlich ausgetestet wurde: es wurde z.B. nie festgestellt, ob die Kontrolle der Luftfeuchtigkeit oder der Lufttemperatur, auf deren Entwurf ich so viel meiner Zeit verwendet hatte, auch richtig funktionierte. Denn der Mikrometeorologische Windkanal war vor allem konstruiert worden, um die Wirkung von Temperaturgradienten zu untersuchen. Darauf werde ich später im Abschnitt 4.4.2 ausführlicher eingehen. Und nachdem im Winter 2013 die Universitätsleitung beschloss, den Windkanal zu verschrotten, wird diese Prüfung auch nie mehr stattfinden⁶⁴.

Aber dies hinderte uns nicht daran, den Windkanal für ausgesuchte Untersuchungen mit neutraler Schichtung anzuwenden. Es sprach sich herum, dass wir einen Windkanal hatten, in welchem naturgetreu Grenzschichten nachgebildet werden konnten. *Cermak* rührte fleißig die Werbetrommel, und erste Aufträge halfen, das Ansehen des FDDL in den USA zu verbreiten. Bald kamen Anfragen und Aufträge, die nicht nur Untersuchungen von Diffusionsvorgängen, sondern das ganze Gebiet der Gebäudeaerodynamik umfassten. Eine der gewagtesten Studien war die Untersuchung der Windverhältnisse im Baseball Stadium von San Francisco, dem Candlestick Ballpark. Durch die Hügel in der Nachbarschaft des Stadiums wurde der starke vom Meer herkommende Westwind erratisch verwirbelt, was die Zuschauer im Stadium sehr belästigte, und auch zu merkwürdigen und unberechenbaren Kurven der Bälle führte. Pfiffige Köpfe hatten vorgeschlagen, den direkt am Stadium befindlichen Hügel aerodynamisch günstig umzuformen und den dazu nötigen Erdabtrag in die San Francisco Bay zu schütten, um Bauland zu gewinnen. Wir wurden beauftragt, diesen Vorschlag im Windkanal zu prüfen. Ich führte die erforderlichen Versuche durch, fand auch eine sehr gute Lösung für die Hügelform – aber vernünftiger Weise zogen es die Besitzer des Stadiums vor, lieber das Stadium zu überdachen. Wesentlich erfolgreicher und zukunftsweisend war aber die Untersuchung

für das World Trade Center in New York, worauf ich in 5.6 zurückkommen werde. Ich habe über diese ersten Fälle in meiner Antrittsvorlesung berichtet.⁶⁵

4.2 Gebäudeaerodynamik an der Uni Karlsruhe

4.2.1 Geplante Arbeitsschwerpunkte.

Es war natürlich zunächst meine Absicht, in Karlsruhe die in den USA begonnenen Forschungen weiterzuführen, und vor allem auch die Gebäudeaerodynamik als praktisches Gebiet zu bearbeiten. In Umsetzung des Programms Gebäudeaerodynamik innerhalb des in 3.1.2 vorgestellten Arbeitsprogramms für das Institut Wasserbau III der Universität Karlsruhe wollten wir einerseits zur Ermittlung von Windkräften als auch zur Lösung von Umweltproblemen beitragen. Der Schwerpunkt lag dabei auf den Ausbreitungsvorgängen, die wir unter den verschiedensten Randbedingungen untersuchten, im Windkanal für neutrale atmosphärische Schichtung auch bei komplexen Topographien, im Wasserkanal für Inversionswetterlagen, in Spezialmodellen auch unter der Wirkung von Kaltluftströmen. Dabei bildete ein Forschungsprogramm zur Berücksichtigung von thermisch geschichteten Grenzschichten einen besonderen Schwerpunkt, auf den ich in Abschnitt 5.4 zurückkommen werde. Mit Befriedigung kann ich melden, dass wir in kurzer Zeit in Karlsruhe zu einem geschätzten Partner für die Praxis wurden, für die wir zahllose Gutachten anfertigten. Allerdings möchte ich hier nicht weiter auf die Untersuchungen für die Praxis eingehen und nur über die Forschung am Institut und ihre Beiträge zur Gebäudeaerodynamik berichten.

4.2.2 Die Abteilung Gebäudeaerodynamik am IHW.

Nachdem wir etliche Anfangsschwierigkeiten überwunden hatten (wie in Endnote ¹⁶ beschrieben) stand uns eine kleine Halle für Windkanalversuche und eine Halle mit dem Wind-Wellengerät, das später auch zum Windkanal umgewandelt wurde, zur Verfügung⁶⁶, und damit boten sich uns großartige Forschungsmöglichkeiten für die Gebäudeaerodynamik, gefördert vor allem seit 1971 durch den SFB 80, und später durch den SFB 210. Dadurch konnte ich in wenigen Jahren eine Arbeitsgruppe aufbauen, aus der sich nach einigen Jahren eine gut funktionierende Abteilung entwickel-

te, die neben der Forschungstätigkeit auch professionell unter Einsatz von Windkanalversuchen Gutachten zu praktischen Aufgaben der Gebäudeaerodynamik anfertigen konnte und die sich praktisch durch Drittmittel selbst finanzierte. Ich unterstellte diese Abteilung einem bewährten langjährigen Mitarbeiter als Leiter. Der erste war *Achim Lohmeyer*, den ich bereits als Dekanatssekretär 1972 -1974 beschäftigt hatte, der sich aber nach seiner Promotion 1978 bald selbständig machte. Sein Nachfolger wurde dann für 14 Jahre *Wolfgang Bächlin*⁶⁷, der seine hervorragende Qualifikation für diese Aufgabe als besonders begabter und engagierter Versuchingenieur nicht nur durch seine Diplomarbeit und seine Dissertation nachgewiesen hatte. Unter seiner Leitung wurde die Abteilung professionell ausgebaut. Gutachten entstanden routinemäßig, basierend auf einer Versuchstechnik, die im Laufe seiner Zeit immer effizienter wurde, und die unsere kompetenten und engagierten technischen Mitarbeiter *Manfred Lösche, Harald Deutsch, Erhard Krämer, Claus Brandt, Armin Reinsch* und *Heinz Bohrmann* ständig verbesserten. Am Anfang brauchten wir viele Wochen, um z.B. ein Feld von Konzentrationen oder Drücken Punkt für Punkt auszumessen und die Daten von Hand zu registrieren und auszuwerten. Am Ende meiner Tätigkeit führten wir durch eine moderne rechnergestützte Technologie weit größere Versuchsprogramme in weit kürzerer Zeit mit Hilfe von automatischer Datenauswertung und graphischer Darstellung der Ergebnisse durch. Wir haben so, zusammen mit Ingenieurbüros und verschiedenen TÜVs, für viele Umweltgutachten die Grundlage geliefert.

Als *Wolfgang Bächlin* im Jahr 1992 von *Lohmeyer* als Geschäftsführer für sein wachsendes Umweltbüro abgeworben wurde, ging die Abteilungsleitung Gebäudeaerodynamik an *Mathias Rau*, der Ende 1994 das Institut verließ, um zusammen mit *Jürgen Wacker*⁶⁸ ein Ingenieurbüro zu gründen. Die Gebäudeaerodynamik blieb dann ohne Spitze: der Techniker *Harald Deutsch* war inzwischen in der Lage, die Gutachten und die Betreuung der Windkanalarbeiten zu übernehmen, und *Harald Kiefer* und *Petra Kastner – Klein* konnten sehr selbständig unser Forschungsprogramm zu einem Ende führen, während *Evgeny Fedorovich* die Untersuchungen der Schichtenströmung, für die *Rau* (siehe hierzu Abschnitt 5.4.3) den Schichten Windkanal entwickelt hatte, zu einem vorläufigen Abschluss brachte.

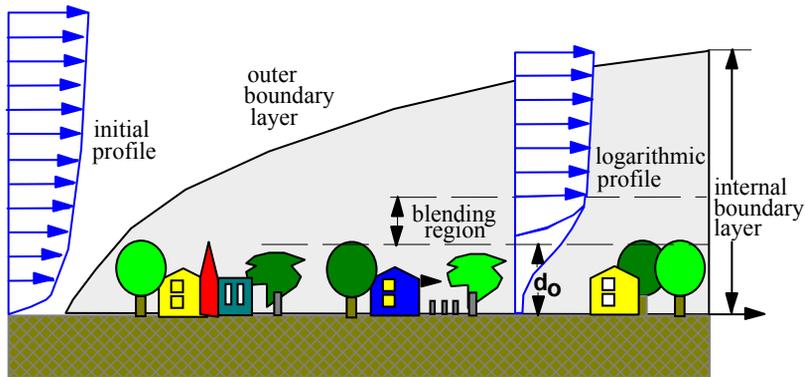
Noch einmal konnte ich am Ende meiner Karriere meinen Beitrag und den des Instituts zur Gebäudeaerodynamik Revue passieren lassen - während eines Festkolloquiums im Rahmen einer AMS Tagung im Jahr 2004 in Vancouver, das *Petra Kastner – Klein* anlässlich meines 75. Geburtstages organisiert hatte⁶⁹. Und dann endete mit meinem Ausscheiden die Abteilung, die über die Jahre einen wesentlichen Beitrag zur Reputation des Instituts beigetragen hatte, und die mir ja eigentlich viel näher lag als die Hydrologie – ich dachte immer als Strömungsmechaniker, auch wenn die Probleme hydrologisch waren.

4.3 Grenzschichtstruktur.

Meine Beschäftigung mit den mikrometeorologischen Grundlagen der Gebäudeaerodynamik reicht weit in meine Zeit in Ft. Collins zurück. Der große Mikrometeorologische Windkanal war ja unter der Annahme gebaut worden, dass durch die Erzeugung eines Natur ähnlichen Windprofils im Windkanal auch die in dieser Schicht stattfindenden Austauschprozesse so naturgetreu nachgebildet werden können, dass die in kleinem Maßstab im Windkanal an Modellen von Bauwerken oder Landschaftsteilen gefundenen Ergebnisse auch auf natürliche Windkräfte oder Ausbreitungsvorgänge übertragbar sind. Dafür müssen die strömungsmechanischen Modellgesetze eingehalten werden.

4.3.1 Grenzschichtmodellierung.

Im Anfang ging es vor allem um Methoden zur naturgetreuen Nachbildung der Grenzschicht. Die mikrometeorologische Ausgangssituation für alle Untersuchungen im Grenzschichtkanal entsteht, wenn der Wind (ausgedrückt durch ein Anfangsprofil der Windgeschwindigkeit, auf eine Fläche mit homogener Oberfläche trifft, wie im Bild gezeigt ist.



Die Schichten der atmosphärischen Grenzschicht

Dabei bildet sich nach dem Anfangszustand einer Störung am Übergang von einer Oberfläche zur nächsten entlang der neuen Oberfläche eine interne Grenzschicht. Diese geht mit wachsender Entfernung von der Rauheitsdiskontinuität über in eine sich nicht mehr ändernde Struktur einer typischen mikrometeorologischen Grenzschicht. Sie besteht aus drei Unterschichten, die je nach den dort dominierenden Prozessen benannt werden. Die unterste Schicht ist die Rauheitsschicht, in der die Rauheitselemente direkt wirken, und die Strömung in und um die Rauheitselemente in dieser Schicht ist die Rauheitsströmung (englisch: „canopy flow“), z.B. die Strömung innerhalb einer Pflanzendecke oder der Bebauung eines Stadtgebietes. Hierzu entstand im Jahr 1965 meine allererste Veröffentlichung in der „peer reviewed“ Literatur: ein harmloser Aufsatz⁷⁰ (basierend auf der Dissertation von *Ali Quraishi*) in dem wir uns anhand von experimentellen Ergebnissen dafür einsetzen, dass die „Canopy Strömung“ nicht durch komplizierte Modelle beschrieben werden sollte, sondern durch das innerhalb des Bestandes gemessene natürliche Geschwindigkeitsprofil. Dies war das Ergebnis einer Studie für den Agricultural Research Service aus dem Jahr 1962. Als Beispiel wurde das gemessene Windfeld innerhalb eines Weizenfeldes definiert durch das Weizenprofil und im Windkanal durch geeignete Rauheitselemente nachgebildet – wofür wir elastische Kunststoffstreifen verwendeten.

Über der Rauheitsschicht liegt die in der Abbildung gezeigte Vermischung- oder Anpassungsschicht (blending region), in welcher die Turbulenz, die sich durch die Ablösung der Strömung an den einzelnen Rauheitselementen bildet, mit wachsendem Abstand von der Oberfläche allmählich übergeht in die homogene Turbulenz der eigentlichen mikrometeorologischen Grenzschicht, der dritten der Schichten. In dieser obersten der drei Schicht-

ten wird das Windprofil im unteren Teil ausgedrückt durch das bekannte logarithmische Gesetz von Prandtl – v. Karman.

Für alle Schichten ist die Turbulenzstruktur ursächlich bestimmt durch die Rauheit der Landfläche als unterer Randbedingung. Daher ist die angemessene Modellierung der Rauheit ein zentrales Anliegen und maßgeblich für die Ähnlichkeit von Windkanal- und natürlichen Grenzschichten. Die aerodynamische Rauigkeit ist das Maß für die Rauheit und eine empirische Größe, die die Wirkung der Rauheit als Länge ausdrückt. (Den Begriff Rauigkeit statt Rauheit ziehe ich vor, da die physikalische Größe Rauigkeit mit der geometrischen Länge des Rauheitselements nicht direkt korreliert ist). Eine erste typische Sammlung solcher Größen für die Atmosphäre habe ich später am Argonne National Laboratory in meinem Bericht „Aerodynamic Characteristic of Atmospheric Boundary layers“⁷¹ zusammengestellt.

Unsere Erkenntnisse über die Grenzschichtmodellierung und andere Untersuchungen zur atmosphärischen Grenzschicht und ihrer Beeinflussung durch verschiedene Baukörper wurden in dieser ersten Zeit nur in Berichten des Labors veröffentlicht. Sie wurden vor allem aber bei den jährlichen Treffen der US-Army Meteorologen und Forscher in Ft. Huachuca⁷² vorgelesen. Der Austausch mit den Mikrometeorologen dort hat dazu beigetragen, dass ich in dieser Zeit ein ganzheitliches Verständnis für die Strömungsmechanik der unteren Atmosphäre erhielt, das ich später auch in meinem bereits erwähnten Buch „Aerodynamic characteristics of atmospheric boundary layers“ zusammengefasst habe⁷³. Auf die Bedeutung einer naturgetreuen Grenzschicht habe ich immer wieder hingewiesen, zuletzt in einem deutschsprachigen Aufsatz, in dem ich noch einmal die Ergebnisse aus den früheren Arbeiten in einer Gesamtschau des Kenntnisstandes über neutrale atmosphärische Grenzschichten beschrieben habe⁷⁴. (Es gibt mehrere solcher Sammlungen auch anderer Verfasser in der Literatur).

4.3.2 Gestörte Grenzschichten.

Im Buch „Aerodynamic characteristics of atmospheric boundary layers“ habe ich einem mich besonders interessierenden Sonderfall meteorologisch wichtiger Grenzschichtströmungen ein eigenes Kapitel gewidmet,

dem der „gestörten Grenzschicht“. Als solche definierte ich interne Grenzschichten, die sich nach einer Veränderung der Bodenbeschaffenheit bilden und die Anfangsschicht modifizieren, wie im Bild oben gezeigt ist. Ein von Mikrometeorologen mehrfach behandeltes Beispiel solcher Fälle ist die Anpassung der Grenzschichtströmung nach einem sprunghaften Übergang von einer Rauheit der Bodenoberfläche zu einer anderen, z.B. wenn der Wind vom Land auf das Meer weht, oder im einfachsten Fall vom Übergang des Windes von Wiesen auf Getreidefelder. In einer frühen Arbeit habe ich mich mit diesem Problem auseinandergesetzt und dabei besonders darauf hingewiesen, dass sich ja nach einem solchen Sprung die Grenzschichtoberkante nach oben um den Betrag der Veränderung der „Verdrängungsdicke“ (in der Terminologie der Grenzschichttheorie) verschieben muss (bei Erhöhung der Rauheit) oder sie muss sich entsprechend absenken, wenn die Rauheit kleiner wird.

Angewendet habe ich dies ausführlich zuerst auf den Fall der Grenzschicht über Wasserwellen im Labor.⁷⁵ . Das hatte den Vorteil, dass ich aus unserem Wind – Wellenkanal in Ft.Collins bereits sehr gute Daten hatte, um die Überlegungen quantitativ zu unterlegen, hatte dabei aber den Nachteil, dass nicht nur der Sprung in der Rauigkeit zu beachten war, sondern auch, dass ein ständiger Übergang nach einem ersten Sprung zu immer größeren Rauheitswerten stattfindet, wohl weil die Wasserwellen mit zunehmendem Fetch immer größer werden. Die wichtigste Einsicht, dass die Verdrängungsdicke bei Berechnung der Grenzschichtdicke berücksichtigt werden muss, geht daher dort in den Details des Problems fast unter. Daher ist diese Arbeit wohl auch kaum beachtet worden. Später haben wir im SFB 80 dieses Problem noch einmal in Angriff genommen, und eine Reihe von Experimenten durchgeführt und die Ergebnisse mit verschiedenen weiteren Versuchsergebnissen systematisch dargestellt⁷⁶, sie auch für die Anwendung auf urbane Gebiete modifiziert⁷⁷.

Der nächstkompliziertere Fall einer gestörten Grenzschicht ist der der Störung durch eine senkrechte Wand quer zur Strömung. Diesen Fall untersuchte ich bereits in meiner Dissertation, und habe ihn in einer späteren Arbeit aufbereitet für die Anwendung in der landwirtschaftlichen Praxis⁷⁸. In der Mitte der 70-er Jahre haben wir diese Strömungssituation noch einmal bearbeitet und auch weitere Versuche durchgeführt. Anlass dazu war

ein Besuch des jungen Dr. *Kitta Ranga Raju* aus Roorkee, Indien, der im Rahmen des SFB 80 ein Jahr bei uns verbrachte. Die mit seiner Hilfe durchgeführte Neuauswertung unserer Daten hat Eingang in die Literatur gefunden.⁷⁹ Andere gestörte Grenzschichten wurden bereits in Ft. Collins von einer Reihe von Graduate Students untersucht – hauptsächlich chinesischen Studenten, die unter meiner Anleitung Messungen an Störkörpern verschiedener Art durchführten und darüber ihre MS Thesen schrieben. Sie untersuchten z.B. die Beeinflussung des Nachlaufs bei einem Störkörper, der an einer senkrechten Vorderwand angeströmt wurde, jedoch dann als Dreieckskörper keilförmig auslief. Diese Situation ist von besonderer Bedeutung für Luftverschmutzungsproblem, da sich hinter dem Körper ein mehr oder minder geschlossener Wirbel bildet, in dem sich Schadstoffe sammeln können. Dafür haben die Studenten systematisch das Geschwindigkeitsfeld hinter dem Störkörper ausgemessen, auch im Ablösungswirbel. Ich entwickelte eine spezielle Messmethode, um Geschwindigkeitsrichtungen in Bodennähe mit Hitzdrähten zu bestimmen, um damit z.B. den Endpunkt des Wirbels zu ermitteln, und hierzu schrieb ich einen Aufsatz⁸⁰, der jedoch nie veröffentlicht wurde: bis ich ihn fertig geschrieben hatte, waren andere Interessen in den Vordergrund gerückt, und die Mühe, den Artikel druckreif zu machen, wollte ich mir nicht machen.

Besonders interessierte mich, wie sich die Strömung nach einer solchen Störung wieder aufbaut. Leider dachte ich fälschlicherweise, dass die Rückseite des Keils, der mit der vertikalen Seite in die Strömungsrichtung zeigte, die Strömung wesentlich beeinflusst, und erst nach etlichen Versuchsreihen musste ich feststellen – was ich mir eigentlich hätte denken können -, dass die Form der Vorderseite des Störkörpers einen viel größeren Einfluss auf das Geschwindigkeitsfeld hat als die Form der Rückseite. Entscheidend ist die Ablösung der Strömung von der Oberkante des Störkörpers, die durch die Luv-Seite des Körpers bestimmt ist. Wie mir heute klar ist, ist die Form des Nachlaufs nach einer solchen Wand ziemlich unwichtig, da sie sich in der Unterdruckzone hinter der senkrechten Wand befindet. Außer in den MS Thesen meiner chinesischen graduate students in Ft. Collins wurde daher hierzu nichts veröffentlicht. Da waren die Ergebnisse von sinusförmigen Hügelformen weitaus aufschlussreicher, aber eine systematische tiefergreifende Auswertung dieser Ergebnisse ist nie erfolgt, zunächst, da wir dann Ft.Collins verließen, aber dann auch, weil es mir nie

gelang, eine geeignete Theorie aufzustellen, um die verschiedenen Ergebnisse verallgemeinern zu können. (*Julian Hunt* hat einige dieser Ergebnisse später für eine mich nicht befriedigende Theorie verwendet. Weitere Versuche, durchgeführt an den Windkanälen des IHW in Karlsruhe durch *Jörg Meyer – Erbacher*, sind in die deutsche DIN eingegangen). Heute werden solche Fälle mit numerischen Modellen gelöst – ob aber dadurch die physikalischen Erkenntnisse verbessert wurden, sei dahin gestellt.

4.4 Dichtegeschichtete atmosphärische Strömungen.

Der große Mikrometeorologischer Windkanal in Ft. Collins, beschrieben in Abschnitt 4.3.1, war bemessen worden, um die atmosphärische Grenzschicht in allen mikro-meteorologisch möglichen Zuständen zu modellieren. Daher sollte die Untersuchung von thermisch geschichteten Grenzschichten eine wichtige Rolle spielen – wenigstens in meinen Forschungen war dies auch der Fall. Während meiner ganzen Karriere hat mich das Thema besonders fasziniert, und Untersuchungen zum Thema reichen von den Anfängen in Ft. Collins im großen Windkanal, bis zu den letzten Forschungen an Konvektionsströmungen durch *Matthias Rau* und *Evgeny Fedorovich* in Karlsruhe.

4.4.1 Windprofil mit Dichteunterschieden.

In der Gebäudeaerodynamik sind die Fälle mit neutral geschichteter Strömung vorherrschend, weil hierbei die hohen Geschwindigkeiten maßgebend sind. Bei Starkwindsituationen überlagert die an der Erdoberfläche generierten Turbulenz alle thermischen Effekte. Aber es sollte ja das Ziel des Windkanals sein, auch meteorologische Schwachwindsituationen zu modellieren, vor allem für Untersuchungen zur Ausbreitung von Schadgasen in der dichtegeschichteten Grenzschicht. (Man spricht von „stabiler Schichtung“, wenn die Dichte mit der Höhe abnimmt, im Umkehrfall ist die Schichtung instabil). Vor allem sind Fälle mit stabilen Dichteschichtungen von Bedeutung, denn bei ihnen vermischen sich in die Grenzschicht eingeleitete Schadstoffe viel weniger stark, sodass höhere Schadstoffkonzentrationen am Boden auftreten können als bei neutral geschichteter Atmosphäre.

Dichtegeschichtete Grenzschichten werden im Windkanal erzeugt durch die Strömung (das Windfeld) entlang einer geheizten oder gekühlten Platte

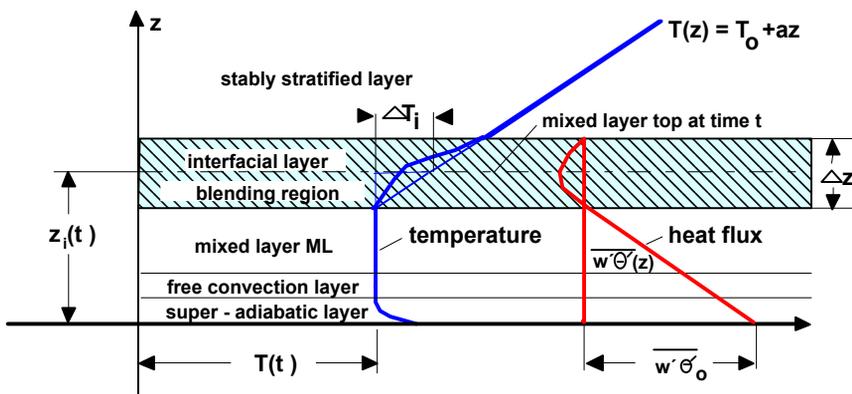
(die von der Sonne erwärmte oder nächtlich abkühlende Erdoberfläche). Der einfachste im Windkanal nachzubildende Fall ist der der Grenzschichtströmung entlang einer nur geringfügig wärmeren Oberfläche. Für diesen Fall hatten die russischen Meteorologen *Monin* und *Obukhov* eine Formel für das Windprofil (das sogenannte log-linear Gesetz) aufgestellt, das durch Messungen von Meteorologen bestätigt worden war. Es war zunächst nachzuweisen, dass dieses Gesetz auch im Windkanal gilt. Mein zweiter Doktorand *Sing Pal Arya*⁸¹ untersuchte hierfür das Grenzschichtprofil entlang dem erhitzten Windkanalboden und fand dies Gesetz in der Tat bestätigt⁸². Ein nicht uninteressantes Nebenergebnis war eine Untersuchung der in der Literatur angegebenen asymptotischen Formen der Spektren der Temperaturschwankungen und der Turbulenzspektren in dieser thermisch geschichteten Grenzschicht⁸³. Ich selber habe keine weitere Untersuchung in diesem Windkanal zu thermisch geschichteten Strömungen durchführen können, weil ich Ft. Collins verließ, - und soweit ich weiß, hat auch niemand sonst Studien unter Verwendung der vorgesehenen Temperaturregulierung gemacht, oder irgendwelche andere der thermischen Eigenschaften des Mikrometeorologischen Windkanals ausgetestet oder vertieft untersucht.

4.4.2 Konvektionsströmungen.

Ein eindrucksvolles und verständliches Beispiel dichtegeschichteter Strömungen in der Atmosphäre ist der Fall der „Konvektionsströmungen in der unteren Atmosphäre“. Auf dies Thema stieß ich bei der Vorbereitung der im Argonne National Laboratory im Jahre 1969 gehaltenen Vorträge. Seitdem hat mich das Thema besonders interessiert. Wichtigster Fall ist die temperaturbedingte instationäre zeitliche Entwicklung der Konvektionsschicht unter einer Inversion, der sich bei Windstille fast täglich im Tagesgang wiederholt. Morgens ist die Luftschicht über dem abgekühlten Boden dichtegeschichtet: die Dichte der Luft nimmt mit der Höhe ab und kleine Störungen werden ausgedämpft. Mit Beginn der Sonneneinstrahlung wird der Boden aufgewärmt. Die Luft nimmt an dieser Erwärmung nicht direkt teil, weil sie gegenüber der langwelligen Wärmestrahlung fast durchlässig ist. Sie erwärmt sich daher vom Boden her, es entsteht durch den Auftrieb eine verwirbelte Schicht fast konstanter höherer Temperatur (die Konvektionsschicht unter einer Inversion), die im Verlauf des Tages ansteigt und

am Ende zu vollständiger Vermischung der Luftschichten mit konstanter Temperatur führt. Schematisch ist dies in der folgenden Abbildung gezeigt.

Auf die Einzelheiten dieses Vorganges will ich hier nicht eingehen, ich habe sie in meinem Buch „Aerodynamic Characteristics of Atmospheric Boundary Layers“ erläutert. Wie dort gezeigt, lässt sich dieser Fall leicht durch ein analytisches Modell beschreiben, benötigt aber einen empirischen „Einmisch“ - Parameter, der experimentell gefunden werden musste, weil es seinerzeit (1970) keine gute Einmischtheorie gab (ob es sie heute gibt, kann ich nicht feststellen). Einmischen heißt auch in diesem Fall, dass durch Turbulenz, die durch die aufsteigende warme Luft in der Konvektionsschicht erzeugt wird, die ursprünglich linear geschichtete Schicht von unten her durchgemischt wird und eine Übergangszone mit variabler Dichte zwischen der oberen und unteren Schicht entsteht. Eine Untersuchung dieses Falles übernahm ich in den 70-er Jahren als eines der Projekte für den SFB 80. Die Summe unserer Erkenntnisse habe ich 1998 in einem Übersichtsaufsatz zusammengefasst⁸⁴.



Zum Problem der Bildung von Konvektionsströmungen

Mit Luftströmungen ist der Vorgang der Entwicklung der Konvektionsschicht modelltechnisch sehr schwierig nachzubilden, weil in der Luft die temperaturbedingten Dichteunterschiede sehr gering sind, sodass schwer messbare kleine Ursachen große Wirkungen haben. Jedoch lässt sich der Vorgang unter Verwendung der Analogie von Luft und Wasser gut in einem Wassertank nachbilden, wo der fehlende Faktor empirisch bestimmt werden kann. Aufbauend auf den bahnbrechenden Versuchen hierzu von *J. Deardorf* hat *Frank Heidt* Versuche in einem Wasserbehälter durchge-

führt, in dem zunächst Wasser mit nach oben zu linear abnehmender Dichte eingeschichtet wurde. Dann wurde der instationäre Vorgang der Erwärmung durch Heizung der Bodenplatte des Tanks in Gang gesetzt und der raum – zeitliche Verlauf des vertikalen Temperaturprofils gemessen. *Heidt* konnte in seiner Dissertation von 1975, zeigen, dass die dimensionslosen Wachstumsraten der Mischungsschichten im Wasser im Modell und in der Luft in der Natur etwa gleich waren.

Klaus Faust ergänzte diese Untersuchung, indem er in seiner Dissertation von 1981 durch weitere Versuche nachwies, dass auch Thermale, d.h. an warmen Flächen des Bodens durch Auftrieb erzeugte Konvektionselemente, einfach einzuhaltenden Modellgesetzen gehorchen. Er verwendete einen Wassertank mit dem gleichen Anfangszustand der Schichtung wie bei *Heidts* Versuchen, ersetzte aber den geheizten Boden durch eine kleine geheizte runde Platte und erzeugte damit typische Thermale, die im dichteschichteten Wasser aufsteigen und sich mit der Zeit ausbreiteten. Die hochinteressanten Ergebnisse dieser Untersuchung, bei denen Faust einfache theoretische Ansätze glänzend zu einer guten Vorhersage der Messergebnisse verarbeiten konnte, sollten in einem ausführlicheren Artikel im *Journal of Fluid Mechanics* veröffentlicht werden. Der Artikel wurde dort leider abgelehnt mit der Begründung, dass die Versuche an einem zu kleinen Versuchsstand gewonnen wurden – die gewünschten Versuche konnten wir aber nicht nachliefern. *Faust* und ich hatten, bis dies Votum kam, andere Unternehmungen begonnen und so blieb die Arbeit liegen. Ich füge sie jedoch diesem Bericht bei ⁸⁵, in der Hoffnung, dass sie irgendwie dadurch und durch seine Dissertation noch bekannt werden. Immerhin konnten Teilaspekte des Problems in einem Konferenzbeitrag veröffentlicht werden⁸⁶

4.4.3 Der Schichtenwindkanal.

Ein entscheidender Unterschied zwischen typischen meteorologischen Konvektionsströmungen und den im Labor untersuchten Fällen besteht darin, dass in der Natur fast immer neben der freien Konvektion auch Scherungen durch das Windfeld auftreten. Die Überlagerung der Konvektionszellen mit den turbulenten Wirbeln einer typischen Scherströmung war damals noch nicht experimentell erforscht. Diese mikrometeorologischen Situation ist nicht nur theoretisch interessant, sondern auch von

praktischer Bedeutung, z.B. für die Ausbreitung von Schadstoffen in dieser Strömung. Während in die Konvektionsschicht eingeleitete Schadstoffe in der oben beschriebenen reinen Konvektionsströmung nur in der Höhe umverteilt werden, werden sie in Wirklichkeit sehr stark durch den Wind horizontal verlagert. So breiten sich z.B. durch Schornsteine eingeleitete Gase in der Konvektionsschicht anders aus, wenn ihr eine durch Wind erzeugte horizontale Strömung überlagert wird. Wir hatten daher die Untersuchung solcher Situationen als wichtiges Forschungsziel in unser Versuchsprogramm zur Gebäudeaerodynamik aufgenommen. Die Möglichkeit, hier experimentelle Untersuchungen machen zu können, wurde uns im Rahmen des SFB 210 geboten.

Zunächst untersuchte *Bernhard Blöchl* in seiner Dissertation den Fall einer Konvektionsquelle - einer heißen Platte - in einer neutralen Grenzschichtströmung als Vorstudie zu einer allgemeineren experimentellen Behandlung des Problems. Aus den Ergebnissen seiner Versuche formulierte er die Anforderungen an eine Modellierung von Konvektionsschichten mit überlagelter Scherströmung, die die Grundlage bildete für einen Antrag auf Erstellung eines neuartigen Schichtenwindkanals, den wir in den SFB 210 einbringen konnten. Wir planten einen Windkanal⁸⁷, in welchem 10 übereinander gelagerte Luftschichten individuell eingeleitet werden, deren Temperatur und Geschwindigkeit (und auch Schadstoffeintrag) jeweils kontrolliert werden können. Die langwierige Aufgabe der Erstellung und dem Austesten dieses besonders komplizierten Gerätes wurde in vorbildlicher Weise von *Matthias Rau* gelöst. Dies Gerät sollte die Möglichkeit geben, eine Reihe von grundlegenden Fragen der Wechselwirkung zwischen freier Konvektion und Scherströmung experimentell zu untersuchen, ein Vorgang, der auch im Zentrum des Interesses der numerisch orientierten Strömungsmechaniker steht, und der eine wichtige Rolle bei der Ausbreitung von Gasen in einer Schwachwindsituation spielt.

Dabei stellte sich als erstes die Frage, ob denn Ergebnisse, die an so einem Versuchsgerät erzielt werden, überhaupt auf die Natur anwendbar sind: also wieder die Frage nach den Modellgesetzen. Zur Diskussion dieser Gesetze trugen auch *Bob Meroney* wie auch *Mike Poreh*, bei die uns in den 90-er Jahren besuchten. Die Ergebnisse aller Überlegungen zur Modellierung - zum Nachweis der Anwendbarkeit von Windkanalergebnissen für den

meteorologischen Fall – haben wir beim NATO Advanced Study Institut zum Stadtklima zusammengefasst⁸⁸.

Wie erwähnt, wurde die Abteilung Gebäudeaeromechanik in den letzten Jahren vor meiner Emeritierung durch *M. Rau* geleitet, mit Schwerpunkt auf der Betreuung aller strömungsmechanischen Projekte, wodurch er die Versuche an seinem Gerät anderen überlassen musste. Aus diesem Grunde übernahm *Rolf Kaiser* die Aufgabe, die ersten Untersuchungen im Schichtenkanal durchzuführen und damit zu promovieren⁸⁹. Damals kam auch *Evgeny Fedorovich*⁹⁰ zu uns, wodurch die Fachkompetenz im Bereich Schichtenströmungen gewaltig erhöht wurde. Er wurde der eigentliche Betreuer für *Kaisers* Dissertation, und auch durch andere Beiträge konnte er zur Kompetenz des Instituts zum Thema geschichtete Strömungen wesentlich beitragen. Die ersten Erfolge dieser Untersuchungen konnte ich noch in meiner Dienstzeit erleben. *E. Fedorovich* sorgte dafür, dass auch danach noch ausführliche Untersuchungen zur Schadgasausbreitung in diesem Kanal, durchgeführt von *Joachim Thäter*, ausgewertet und veröffentlicht wurden⁹¹. Und durch *Fedorovich* Mitwirkung konnten wir im Jahr 1995 ein sehr eindrucksvolles Symposium, als NATO Advanced Study Institute, zum Thema „geschichtete Strömungen“ organisieren und durchführen.

Es war eine gewisse Tragik, dass *M. Rau* sein Gerät nie selbst verwenden konnte, und dass die Möglichkeiten des Geräts nie richtig ausgeschöpft wurden, da nach meiner Emeritierung kein Interesse bei den Nachfolgern bestand, die Versuche fortzuführen. Das Gerät wurde zu einer Zeit betriebsbereit, als bereits entschieden war, dass der strömungsmechanische Teilbereich des Instituts, d.h. die Abteilung Gebäudeaerodynamik nach meinem Ausscheiden an das Institut für Hydromechanik übergeben werden sollte, wo *Gerhard Jirka* seine eigenen Vorstellungen über Forschungsprioritäten hatte, zu denen die Schichtenströmung nicht (mehr) gehörte. So harrt das Gerät, wie auch das später zu erwähnende Windwellengerät, in einer Art Dornröschenschlaf auf seine Erlösung zu neuer Verwendung.

4.5 Diffusionsvorgänge

Nach *Cermaks* Vorstellungen, und zur Bearbeitung des Fragenkomplexes des ersten Auftraggebers, dem Chemical Corps der US Army, sollte der Schwerpunkt der Windkanaluntersuchungen in Ft. Collins in den 60-er Jahren auf der Untersuchung der Ausbreitung von Schadstoffen in der unteren Atmosphäre, einschließlich der dafür notwendigen Grundlagenforschung gelegt werden. Zu diesem Themenkreis waren ja die früher bereits erwähnten Versuche von *Cermak* und *Koloseus* durchgeführt worden. Danach benannte *Cermak* das Laboratorium: FDDL (Fluid Dynamics and Diffusion Laboratory). Und hierfür wurde das Personal des Laboratoriums verstärkt – nach *Lionel Baldwin* auch durch *Bob Meroney*⁹², der Mitte der 60-er Jahre dazu kam und zum Träger des Bereichs „Modellieren von Austauschprozessen in atmosphärischer Grenzschichten“ wurde.

Es mag sein, dass die durch das Chemical Corps der US Army ursprünglich angedachten Windkanaluntersuchungen der Ausbreitung von Giftgasen galten – das aber hat für uns nie eine Rolle gespielt, weil diese durch ein internationales Abkommen gegen den Einsatz von Chemiewaffen von allen Ländern auch damals schon verboten waren. Es gab genügend zivile Fragestellungen aus dem Umweltbereich, die gelöst werden wollten. Und so nutzte auch ich das von mir einsatzbereit gemachte Provisorium des großen mikrometeorologischen Windkanals, um als Teil der Versuche für die Dissertation auch den Fall der Ausbreitung einer Schadstoffwolke in einer durch eine Wand gestörte Grenzschicht zu untersuchen. Aus Daten, die ich aus Ft. Collins mitgebracht hatte, entstand dann in Deutschland während des Sabbatical Years zu diesem Thema eine Veröffentlichung⁹³, als ein Beitrag zum Thema Ausbreitung von Schadgaswolken in einer naturähnlichen atmosphärischen Grenzschicht. Sowohl in Ft. Collins als auch später in Karlsruhe waren unsere wissenschaftlichen Arbeiten ausschließlich auf die Lösung ziviler praktischer Aufgaben gerichtet, mit Schwerpunkt auf drei Themen:

- der Entwicklung von Bemessungs- und Vorhersagewerkzeugen für Schadstoffausbreitung in Chemiewerken,
- der Untersuchung der Ausbreitung von Kühlturmschwaden
- der Modellierung von Kraftfahrzeugimmissionen im Windkanal.

Andere Fälle von Diffusionsuntersuchungen, in Gutachten durchgeführt, betrafen lokale Ausbreitung von Gerüchen (aus Großküchen oder Fabriken) oder Emissionen aus Punktquellen am Boden.

4.5.1 Diffusion von Emissionen aus Schornsteinen und Kühltürmen.

Zu diesem Thema haben wir eigentlich keine originäre Forschung betrieben. Da aber Gutachten zu diesem Thema einen ziemlichen Anteil an unserer Gutachtertätigkeit ausmachten, sollen die dort zu untersuchenden Themen kurz geschildert werden. Die klassische Aufgabe ist die Vorhersage der Konzentrationen am Boden infolge der Ausbreitung von Schadstoffen aus Verbrennungen oder chemischer Produktion über die Emission durch einen Schornstein. Hier geht es in erster Linie um die Ermittlung der Höhe des emittierenden Schornsteins, denn die Standardmethode der Schadstoffminimierung besteht (bestand?) darin, durch möglichst hohe Schornsteine die Schadstoffe in die Atmosphäre zu blasen und durch Vermischung mit der Luftströmung soweit zu verdünnen, dass die maximale, den Boden erreichende Schadstoffkonzentration überall kleiner als eine gesundheitlich zulässige Konzentration ist. Da hohe Schornsteine sehr teuer sind, besteht die Bemessungsaufgabe darin, die Höhe des Schornsteins so zu bemessen, dass die kritische Bodenkonzentration, berechnet als Tages- oder Monatsmittelwert, gerade erreicht wird⁹⁴. Hierbei liefert eine meteorologische Klimauntersuchung die Windstatistiken, mit denen bestimmten Wetterlagen zugeordnete Windprofile definiert werden. Für diese werden dann im Windkanal die Konzentrationsfelder ermittelt. Der einfachste dieser Fälle, unzählige Male untersucht, besteht aus dem freistehenden Schornstein. Windkanaluntersuchungen sind hierfür erforderlich, weil üblicherweise die Bebauung im Schornsteinumfeld die Turbulenz maßgeblich beeinflusst und sich dadurch auf bodennahe Konzentrationsfelder von Schornsteinabgasen auswirkt, sodass sie modellmäßig berücksichtigt werden muss.

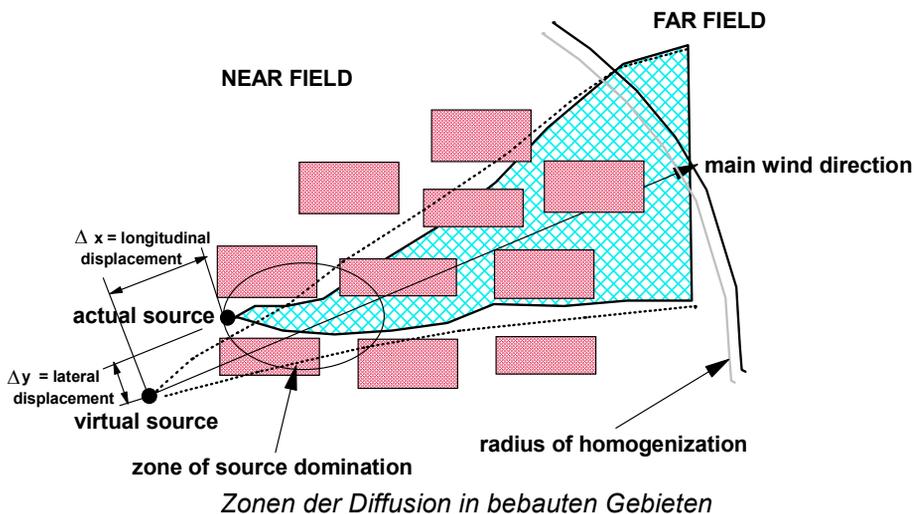
Ein wichtiger Sonderfall ist die Einleitung von Wasserdampf durch Kühltürme, insbesondere wenn die Abluftfahne dieser Kühltürme in Wechselwirkung mit der Abgasfahne aus benachbarten Schornsteinen steht. In den meisten solcher Fälle zeigt sich eine regionalspezifische Situation, und in den ersten Jahren der Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit wurden

in der Tat nicht nur in unserem Windkanal in Karlsruhe, sondern weltweit auch in vielen anderen Windkanallaboratorien routinemäßig eine große Zahl solcher Untersuchungen an maßstäblich verkleinerten Geländemodellen mit Kühlturmmodellen durchgeführt. Sehr viel Untersuchungsbedarf ergab sich aus der Frage, wie sich Kombinationen von Kühlturmfahnen auf Beschattung oder Befeuchtung von umliegenden Gebieten auswirken. Nach einigen Jahren haben aber die Kühlturmbetreiber aus den vielen Versuchen und etlichen theoretischen Ergänzungen begrenzende Hüllkurven ermittelt, die zur Ermittlung der Kühlturmmmissionen angewendet werden konnten. An diesen konnte man sich orientieren, auch ohne neue Versuche machen zu müssen – und ein lukratives Anwendungsfeld für Windkanäle entfiel.

4.5.2 Schadstoffquellen in bebauten Gebieten.

Ein anderes typisches, mit Hilfe des Windkanals zu lösendes Diffusionsproblem ist die Abschätzung des Gefährdungsbereichs bei momentanen Schadstoffeinleitungen wie z.B. bei Chemieunfällen. Das Grundkonzept für Versuche zu diesem Thema haben wir bereits in den 80-er Jahren entwickelt und später in vielen Forschungsvorhaben abgearbeitet. Jedes größere Chemiewerk muss in der Lage sein, in solchen Fällen rasch die Form der Schadstoffwolke abzuschätzen, um Warnungen abgeben und Kontrollmaßnahmen ergreifen zu können. Traditionell geschieht dies über eine sogenannte Keule aus Pappe, in der Form von dimensionslosen Isokonzentrationskurven. Sie ermöglicht es auf einer Karte des Betriebs und seiner Umgebung die Grenzen der Gefährdung durch die Schadstoffwolke graphisch als Keulenumriss nachzuzeichnen, wobei die Keule parallel zur Windrichtung auf die Karte gelegt wird, mit Ursprung der Keule im Schadenspunkt. Es war eines unserer Ziele, diese Keulen anhand typischer Gebäudeanordnungen in den stromabwärts liegenden bebauten Gebieten zu systematisieren, wobei die meteorologische Situation berücksichtigt werden muss – allerdings in Grenzen: bei vielen Wetterlagen unterscheiden sich die Ausbreitungen nur durch die Anfangsmenge, sodass z.B. eine Keule viele Wetterlagen abdeckt. Bei einer kurzzeitigen Schadstoffemission ist das gerade auftretende Windfeld für die Ausbreitung maßgeblich. Dagegen gilt, dass ganze Windstatistiken verwendet werden müssen, wenn es sich um Immissionen infolge von Langzeitemissionen durch kontinuierlich abgegebene, niedrigkonzentrierte Substanzen handelt.⁹⁵

Unser Ansatz für Untersuchungen von Schadstoffausbreitungen in bebauten Gebieten beruhte auf einer Zerlegung des Konzentrationsfelds in 3 Zonen, in welchen die meteorologische Situation zur Schadenszeit in verschiedener Weise wirkt (siehe die Abbildung). Die erste Zone ist das Nahfeld, umschrieben durch einen Kreisbogen mit einem typischen „Homogenisierungsradius“, in welcher die Ausbreitungsvorgänge allein durch die lokale Anordnung von Emissionsquellen und Gebäuden bestimmt werden. Daran schließt sich das mikrometeorologische Mittelfeld an, in welchem die Turbulenz der Grenzschicht über den Gebäuden die Ausbreitung erzeugt. Hier gelten die oben genannten Keulen. Im Fernfeld schließlich ist die Konzentration so weit abgesunken, dass nur noch eine allgemeine Anreicherung von mit der Entfernung weiter abnehmenden Immissionskonzentrationen spürbar ist.



Für das Nahfeld sind Windkanalversuche hinsichtlich Genauigkeit der Ergebnisse allen anderen Methoden - numerischen Modellen oder auch Feldversuchen – überlegen. Ich betrachtete es als wichtige Aufgabe, dies bei jeder möglichen Gelegenheit nachzuweisen, um damit zu zeigen, dass Windkanalergebnisse für die Abschätzung von Schadstoffausbreitungen in der Natur verwendet werden können und sollten. Besonders gut gelang dieser Nachweis bei einer Versuchsserie im Großchemiebetrieb der BASF in Ludwigshafen, wo die Firma mit uns zusammen Ausbreitungsversuche auf dem Betriebsgelände durchführte, die wir im Windkanal mit großer Genauigkeit duplizieren konnten. Die Ergebnisse dieser Versuche gaben

auch uns das Vertrauen, dass durch Windkanaluntersuchungen hypothetische Extremfälle – als Bemessungsfall –zuverlässig dargestellt werden können⁹⁶.

Im Mittelfeld verbreitet sich das Konzentrationsfeld unter Wirkung der Grenzschichtströmung mit dem Abstand von der Quelle und vermischt sich mit der Umgebungsluft. Für diesen Bereich passten wir uns der vorhandenen Praxis an, in dem wir typische Keulen experimentell im Windkanal ermittelten. Wie die Schadstoffe über die Bebauung gelangt sind, spielt dabei keine Rolle: maßgeblich ist das dort vorherrschende Windfeld, das die Form der Keule bestimmt. Für typische Bebauungsmuster hat *Theurer* solche Ausbreitungsfelder ermittelt. Dabei konnten wir durch Windkanalversuche nicht nur charakteristische Keulen bestimmen, sondern auch zeigen, dass durch die Wirkung des Nahfelds der (virtuelle) Ursprung der Keule bei Schadstoffemissionen innerhalb von Gebäuden oder Straßen verschoben wird –das Nahfeld bestimmt also, wie die Keule anlegt werden muss, d.h. wo die Koordinaten des virtuellen Ursprungs liegen. ⁹⁷ Daher ergänzten wir die Auswertung unserer Versuche, in dem wir nicht nur den Verlauf solcher Keulen, d.h. ihre Breite, sondern auch ihren virtuellen Ursprung in Abhängigkeit von Gebäudeformen und -anordnungen systematisch im Windkanal bestimmten.

Eine Serie solcher Keulen für verschiedene typische Bebauungsmuster haben wir veröffentlicht und hoffen, dass sie auch angewandt werden. Allerdings kenne ich bis heute keine Hinweise darauf, dass diese Keulen den Weg in die Praxis gefunden haben. ⁹⁸ Es gilt hier, was wir auch auf vielen anderen Gebieten festgestellt haben: es ist ein weiter Weg von der wissenschaftlichen Veröffentlichung bis in die Praxis, insbesondere wenn es sich um ein Randthema des Chemieingenieurwesens handelt, (und wenn es fachfern, in diesem Fall durch Bauingenieure, gelöst wird).

Für das Fernfeld ist der Windkanal nur in Ausnahmefällen geeignet. Hierfür müssen meteorologische Modelle auf größerer Raumscale verwendet werden, die rechnerisch an die Windkanalversuche für das Mittelfeld angeschlossen werden können. Damit habe ich aber nie etwas zu tun gehabt. Numerische Verfahren entstanden im Laufe der Zeit auch für andere Diffusionsaufgaben. Sie orientierten sich zwar für die notwendigen Parameter

an den vielen Windkanalversuchen, ersetzten diese aber dann mehr und mehr. Es war zwar unbestritten, dass die numerischen Modelle die Konzentrationsfelder insbesondere im Nahfeld nicht mit gleicher Genauigkeit liefern wie Windkanalversuche, aber für die Genehmigungspraxis waren sie gut genug. Sie hatten den Vorteil, dass dann, wenn das Modell mal fertig der zu untersuchenden Situation angepasst war, im Handumdrehen hunderte von Fällen durchgerechnet werden konnten, mit denen sich wunderschöne Bilder und Grafiken anfertigen ließen. Einerseits bedauerten wir natürlich, dass wir, die wir oft in Karlsruhe mit solchen Routineversuchen beauftragt worden waren, eine nützliche Einnahmequelle verloren. Auf der anderen Seite profitierten davon auch frühere Mitarbeiter, und es ist mir immer besonders am Herzen gelegen, dass diese auf Grund ihrer am IHW gemachten Erfahrungen eigene erfolgreiche Ingenieurbüros schufen, in denen sie ihre am IHW erworbenen Kenntnisse und Erfahrungen anwandten und weiterentwickelten.

4.5.3 Belastung durch Verkehr.

In unserer Windkanalpraxis kamen auch Fragen auf nach der Wirkung von Ausbreitung von Verkehrsabgasen, z.B. bei der Untersuchung der Schadstoffbelastung an Portalen von Kfz Tunneln oder in Straßenschluchten. In solchen Fällen wird die Strömung entscheidend durch den Kfz Verkehr beeinflusst. Erhebliche Unterschiede entstehen hierbei zwischen der Wirkung von ruhendem und beweglichem Verkehr. Die Abgasemission des Verkehrs in einer Straßenschlucht bildet eine Schadstoffquelle, die durch eine Linienquelle mit konstanter Stärke recht gut approximiert werden kann. Für den beweglichen Verkehr muss aber auch die durch ihn erzeugte Turbulenz in den Straßenzügen berücksichtigt werden. Hierfür wird im Windkanal der Verkehr durch ein laufendes Band ersetzt, auf welchem kleine Plättchen befestigt sind, die die Kraftfahrzeuge simulieren. Mein wichtigster Beitrag zu dieser Problematik war die Aufstellung der notwendigen Modellgesetze, nach denen Bandgeschwindigkeit und Kfz – Plättchengröße und Anzahl so abgestimmt werden können, dass im Windkanal naturähnliche Turbulenzen entstehen wie sie in der Natur vom Verkehr erzeugt werden. Das Modellgesetz hierfür leitete ich aus Energiebetrachtungen ab⁹⁹. Dieses erwies sich nicht nur sehr brauchbar für die Quantifizierung des Kfz-Verkehrs, sondern erbrachte auch den Skalierungsparameter für Basisuntersuchungen, wie *Petra Kastner –Klein* in ihrer Disser-

tation nachweisen konnte. Sie untersuchte durch systematische Parametervariierung etwa die Wirkung dichter oder intensiver Verkehrsströme, die sie in schönen dimensionslosen Grafiken nachbilden konnte.¹⁰⁰ Dies bietet die Möglichkeit, Standardsituationen systematisch zu untersuchen und die Ergebnisse in der Form von praktisch brauchbaren Diagrammen oder Tabellen darzustellen. Auch heute noch besteht Bedarf für eine Erweiterung der Palette der untersuchten Fälle, so zum Beispiel im Bereich von Immissionen in Stadtgebieten, und es ist erfreulich, dass *Petra Kastner – Klein* in ihren Untersuchungen an der University of Oklahoma weiterhin hierzu beiträgt, obgleich heute (2016) numerische Untersuchungen bei weitem den größten Teil solcher Untersuchungen abdecken – mit allen Vor- und Nachteilen von numerischen Berechnungen. Noch heute gehören unsere Arbeiten zu diesem Thema zu unseren am meisten zitierten Veröffentlichungen.

4.6 Windkräfte auf Bauwerke

Meine ersten Erfahrungen mit Windkräften machte ich im Zusammenhang mit meiner Dissertation¹⁰¹, in welcher ich hauptsächlich das Strömungsfeld um eine senkrechte Wand, aber dazu auch die Kraft auf die Wand untersucht habe. Die Kraft auf eine Wand in der Grenzschicht wurde mein erster Konferenzbeitrag¹⁰², vorgetragen auf einer Konferenz der ASME, der American Society of Mechanical Engineers. Es war ein aufregendes Erlebnis, und ich konnte mich über eine sehr gute Resonanz freuen, die mich sehr ermutigt hat, in meinen Forschungen fortzufahren, obwohl der Aufsatz nur als Preprint¹⁰³ erschien.

Der nächste Kontakt mit Windkraftuntersuchungen war ein für mich sehr nachhaltiges Schlüsselerlebnis im Sommer 1965, als *Alan Davenport* von der University of Western Ontario in Canada nach Ft. Collins kam. Er hatte in seiner Dissertation ein Bemessungskonzept auf der Basis von Windkanalversuchen für schwingungsanfällige Bauwerke entwickelt und hatte den Auftrag erhalten, dies Konzept auf die Bestimmung der Windlasten auf die damals geplanten Türme des World Trade Centers in New York anzuwenden. Hierfür hatte er unseren großen Windkanal ausgesucht, weil er der einzige damals vorhandene Grenzschichtkanal mit ausreichend großer Versuchsstrecke war und es ihm darum ging, Windbelastungen im Windkanal mit einem modellierten natürlichen Windprofils zu ermitteln. In

einem Vortrag in Ft. Collins stellte er seine bahnbrechende Idee der Belastungskette vor, die ausgehend von einem Grenzschichtwindprofil mit nachgebildeter atmosphärischer Turbulenz, zur Bestimmung der Schwingung des Bauwerks und der Maßnahmen, um diese zu dämpfen führten¹⁰⁴. Seine Methode bestand in der Anwendung der Spektralmethode von *Wiener* für die Bestimmung der Varianz des Ausgangs linearer Systeme unter dem Einfluss einer Zufallsbelastung mit vorgegebenem Spektrum der Belastung: das „Davenport Spektrum“ für die Verteilung der Turbulenzenergie tauchte hier für mich zum ersten Male auf. Die *Wienersche* Theorie kannte ich aus ihrer Anwendung in der Turbulenzmessung, aber dass die gleiche Art der Modelle auch auf Bauwerke übertragen werden konnte, war für mich eine Offenbarung! Er zeigte damit die gewaltigen Möglichkeiten der Anwendung von Grenzschichtwindkanälen für die Bauwerksaerodynamik auf, die ich so noch nicht verstanden hatte, da unsere Untersuchungen bis dahin nur darum gegangen waren, Grenzschichtströmungen zu verstehen, nicht aber sie anzuwenden.

Zunächst übernahm ich die Durchführung dieser Studie. Leider musste ich die Leitung (unter *Alan Davenport's* Oberleitung) der Untersuchungen abgeben, da die Reise nach Deutschland ins Sabbatical Year 1965 bevorstand. *Cermak* übernahm die Windkanalbetreuung. Er, der eigentlich die Richtung der Forschung auf Diffusionsvorgänge lenken wollte – er hatte ja dem Labor den Titel „Fluid Dynamics and Diffusion Laboratory“ („FDDL“) gegeben – erkannte den gewaltigen praktischen Nutzen von *Alan Davenport's* Arbeit und ging in der Folgezeit fast gänzlich dazu über, kommerzielle Grenzschichtversuche an Gebäuden durchzuführen, um winderzeugte Kräfte und Drücke zu messen¹⁰⁵. Für mich entstand aus dieser ersten Begegnung eine Freundschaft mit *Alan*, getragen durch gegenseitige Hochachtung, die bis seinem Tode im Jahr 2009 anhielt¹⁰⁶. Nach unserer Rückkehr aus Deutschland konnte ich dann eine kleine und recht harmlose erste Studie spezifisch zu Windkräften durchführen: eine Untersuchung der Standfestigkeit eines Windschutzes, hinter welchem Messballone der Meteorologen aufgeblasen werden sollten. Unsere Studie hierzu, mit weiteren Untersuchungen durch ihn selbst, wurden von *Bob Meroney* veröffentlicht¹⁰⁷.

Auf Grund dieser Erfahrungen war mir klar, dass zu einem Windkanalprogramm in der Fakultät für Bauwesen auf jeden Fall die Untersuchung von

Windkräften gehört. Bereits während des Sabbatical Year in Deutschland habe ich eine Vorlesung „Windkräfte auf Bauwerke“ vorbereitet und gehalten – auf Anregung von Prof. F. Leonhardt, und mich in der Vorbereitung der Vorlesung mit dem Stand des Wissens zum Thema vertieft vertraut gemacht, und später habe ich diesen Bereich als Teil des Programm für meine Tätigkeit in Karlsruhe von vornherein aufgenommen und der aerodynamischen Abteilung des IHWs die auch die Windkräfte umfassende Bezeichnung „Abteilung für Gebäudeaerodynamik“ gegeben.

4.6.1 Überprüfung von Modellgesetzen bei Türmen.

In Karlsruhe haben wir von Anfang an großen Wert darauf gelegt, die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Windkanaluntersuchungen an Naturmessungen zu überprüfen. Mir schwebten Parallelversuche im Windkanal und in der Natur unter idealen (Labor ähnlichen) Bedingungen vor. Weil theoretische Gründe dagegen sprechen, dass Kräfte auf zylindrische Körper im Modell exakt skaliert werden können (vermutlich unterschiedliche Kraftbeiwerte wegen Reynoldszahl Abhängigkeit), interessierten mich vor allem erst einmal die Kräfte auf freistehende Türme: Bauwerke, die durch Windkräfte besonders belastet sind. Hauptanliegen hierbei ist die Ermittlung von empirischen Kraftbeiwerten. Versuche hierfür konnten wir bereits in den ersten Jahren in Karlsruhe an den damals neu errichteten Leuchttürmen "Alte Weser" und "Großer Vogelsand" durchführen. Diese Betontürme stehen sehr exponiert im Wattenmeer, sodass rundherum nur die Wasseroberfläche als Ebene das Geschwindigkeitsprofil bestimmt: ein Windfeld, das sich bei mittelstarken Winden ungestört über sehr lange flache Flächen ausbilden kann und eine ideale Grenzschichtstruktur aufweist – eine im Windkanal nachbildbare ideale Konfiguration!

Bei Beginn unserer Untersuchungen bestand der Leuchtturm "Alte Weser" bereits. Wir konnten diesen Leuchtturm jedoch mit Druckmessvorrichtungen ausstatten und Winddrücke messen: Die Versuchseinrichtung entwickelte *Otto Blohm*, der große praktische Organisationserfahrung mitbrachte und mit großer Tatkraft das schwierige logistische Problem solcher Messungen löste und die ersten Ergebnisse über statische Kräfte in seiner Dissertation von 1975 vorlegte. Besonders wichtig waren mir auch dynamischen Kräfte auf Türme, und hierfür ergab sich die Möglichkeit beim Neubau des Leuchtturms „Großer Vogelsand“. Wir wurden bereits bei der Pla-

nung des Leuchtturms eingeschaltet (gaben z.B. aus Windkanalversuchen den minimal erforderlichen Abstand der Hubschrauber - Landeplattform vom Turmkopf an) und konnten den Turm auch für die Versuche ausrüsten, die dann *Willfried Schnabel* durchgeführt hat. Er bestimmte nicht nur die statischen, sondern auch die dynamischen Kräfte und konnte damit die *Davenport'sche* Wirkungskette unter absolut idealen Randbedingungen abarbeiten - angefangen mit der Bestimmung von Druck- und Kraftbeiwerten, von Korrelationen und Spektren bis zur Überprüfung der Momente und der resultierenden dynamischen Kräfte. In seiner Dissertation legte er 1980 die herausragenden Ergebnisse seiner Untersuchungen vor, die er durch modellähnliche Parallelversuche im Windkanal vollauf bestätigen konnte^{108 109}- ein Meilenstein in der Gebäudeaerodynamik! Wir haben die Ergebnisse von *Schnabel* noch bei weiteren Gelegenheiten mit mehr Detailinformation veröffentlicht¹¹⁰. Bemerkenswert sind seine Ergebnisse zur Schwingung des Turmes unter der Wirkung der turbulenten Belastung durch den Wind¹¹¹, einen Fall, den ich als besonders gutes Anwendungsbeispiel für die Wirkung von Belastungszeitreihen auf dynamische Systeme auch in mein Statistikbuch eingearbeitet habe.

Was für alleinstehende und in einer ungestörten Umgebung befindliche Gebäude gültig ist, muss nicht auch für eine gestörte Umgebung gelten. Es war mir daher ein Anliegen, weiterführende systematische Untersuchungen mit Gebäuden durchzuführen, die sich in durch Topographie oder Bebauungen der Umgebung gestörten Grenzschichten befinden. Im Rahmen des SFB 210 konnte *Jörg Maier-Erbacher* (Dissertation 1989) an einem zylindrischen Turm - dem "Zündhüttele" bei Karlsruhe -Wolfartsweier im Vorland des Nordschwarzwaldes erste derartige Versuche in der Natur durchführen. Das Messprogramm wurde später von ihm ergänzt durch Versuche an einem hohen Schornstein am Kernkraftwerk Gundremmingen. Das interessante Ergebnis dieser Untersuchung war, dass die Beiwerte der Turmbelastung sich in unebenem Gelände mit Hanglage kaum von denen an freistehenden Bauwerken unterschieden. Nur das Windprofil zeigte Veränderungen auf - aber der vermutete Einfluss der Topographie des hinter dem Turm liegenden Hügellandes war nicht zu erkennen. Auch die Bebauung wirkte sich nur im untersten Bereich des Turmes aus, und die Kräfte dort sind eine Wirkung des veränderten Geschwindigkeitsprofils und nicht der Kraftbeiwerte. Allerdings stand zu vermuten, dass sich in dichter Bebauung

der Einfluss der Umgebungsbebauung sehr wohl auch auf die Beiwerte auswirken kann¹¹².

Die Untersuchungen zur Grenzschicht und ihrer Darstellung war die Basis für meine Zusammenfassung aller Modelgesetze der Gebäudeaerodynamik in einem Aufsatz¹¹³, den ich in dem von mir herausgegebenen Buch „Engineering Meteorology“ (auf das ich in 5.7 zurückkommen werde) veröffentlicht habe.

4.6.2 Statische Belastung typischer Gebäudeformen.

Eine erste Aufgabe, die wir uns in Karlsruhe stellten, war die systematische Bestimmung von Windkraftbeiwerten für übliche Gebäudeformen. Unter den zahlreichen von uns durchgeführten gebäudeaerodynamischen Untersuchungen befinden sich ganze Serien Ermittlungen von solchen Beiwerten für die unterschiedlichsten Anströmsituationen. Wie bei den Untersuchungen zur Modellähnlichkeit von Turmbauwerken begann auch die Behandlung dieses Fragenkomplexes mit einer Überprüfung der Modelgesetze, und zwar durch eine Untersuchung von Drücken und Innendrücken auf Hallenbauwerke an einer Tennishalle in der Natur und im Labordurch *Wolfgang Bächlin*¹¹⁴, der in seiner Dissertation von 1985 nicht nur hervorragende Übereinstimmung von Modell und Natur feststellte, sondern der darüber hinaus wertvolle Aufschlüsse über Innendrücke und ihre Beeinflussung durch Öffnungen in den Gebäudewänden gewann, die Eingang in die Windlast-DIN 1055 fanden. *Bächlin* konnte zeigen¹¹⁵, dass die korrekte Modellierung von Geschwindigkeitsprofil und Bauform auch den Innendruck einer Halle naturgetreu wiedergab, sodass auch dadurch in hervorragender Weise die Gültigkeit der Übertragung von Windkanalmessungen auf die Natur bestätigt wurde.

Sodann machten wir systematische Versuche zur Bestimmung von Druck- und Kraftbeiwerte für die verschiedensten Bauformen bei praktisch relevanten meteorologischen Randbedingungen. Eine erste Studie¹¹⁶ behandelte die einfache Frage, ob und wie sich die Druckverteilung auf dem Dach eines kubischen Körpers (Modell eines alleinstehenden Flachdachhauses) als Funktion von Grenzschichtdicke und Sohlrauheit verhält. Später hat dann auch *Jürgen Wacker* im Rahmen des SFB 210 im Windkanal weitere umfangreiche Detailuntersuchungen durchgeführt und die Ergebnisse in

einer Reihe von Veröffentlichungen vorgestellt^{117,118} Zusätzlich wurden im Laufe der Zeit zahlreiche weitere Untersuchungen in der Form von Gutachten durchgeführt, um in bestimmten konkreten Fällen verbesserte Parameter für die Berechnung realistischer Windlasten zu erarbeiten. Zu diesen gehörte u.A. auch eine Untersuchung der Windsicherheit des Stadionsdaches für das Fußballstadion Nürnberg, an dem *J. Wacker* erste Erfahrungen sammelte, die er später in seinem Ingenieurbüro weiter ausbaute.

4.6.3 Windkräfte in bebauten Gebieten.

Im Allgemeinen kann man davon ausgehen, dass durch die Verminderung der Windgeschwindigkeit innerhalb bebauter Gebiete Windkräfte vernachlässigbar klein sind. Es gibt aber gute Gründe zu vermuten, dass dies nicht immer so ist, und daher haben auch wir im Rahmen des SFB 210 ein von Oliver Badde bearbeitetes Forschungsvorhaben durchgeführt, um die Auswirkung der Umgebung auf die Kräfte auf Bauwerke innerhalb von Bebauungen zu untersuchen.

Um den Stand des Wissens zu diesem Thema zusammenzufassen, haben wir im Jahre 1994 ein NATO Advanced Study Institute zum Thema "Wind climates in cities", in Karlsbad bei Karlsruhe veranstaltet, das sehr großes internationales Interesse fand und die besten Fachleute in Karlsruhe zusammenführte, und zu dem viele Mitarbeiter des Instituts originale Beiträge leisteten. J.E.Cermak, A.Davenport und der Portugiese D.X.Viegas waren meine Ko-Organisatoren und so kam am Ende unserer Karrieren noch einmal das Team für die Untersuchung des New Yorker World Trade Centers aus den Anfängen der modernen Gebäudeaerodynamik in einem wichtigen gemeinsamen Projekt zusammen. Das eindrucksvolle Management dieser Tagung durch Oliver Badde und die herausgeberische Arbeit von Wolfgang Theurer für das daraus entstandene Buch verdienen hierzu besondere Erwähnung. Davenport und ich leitete dieses Projekt ein, indem wir die Gebäudeaerodynamischen Probleme in den Rahmen des bereits erwähnten Bemessungskonzepts von Plate und Davenport stellten. Ansonsten bestand mein Beitrag aus einem Einführungskapitel zur Atmosphärischen Grenzschicht. Eine Zusammenfassung (mit Harald Kiefer) aller unserer danach noch entstandenen Beiträge zum Thema „Windkräfte in bebauten Gebieten“ erschien im Jahre 2001.

4.6.4 Dynamische Belastung – Dauerfestigkeitsuntersuchung.

Während die meisten unserer Untersuchungen nur für statische Windlasten durchgeführt wurden, haben mich seit den Untersuchungen für das World Trade Center auch die dynamischen Beanspruchungen interessiert. Es ist klar, dass die Turbulenz in der Luft dazu führt, dass die auf die Bauwerke ausgeübten Drücke starken Fluktuationen ausgesetzt sind, die sicherlich für lokale Druckspitzen sorgen. Solche Druckspitzen haben wir durchaus bei unseren Untersuchungen von dynamischen Drücken feststellen können. Aber da solche Spitzen örtlich konzentriert sind, sehen größere Flächen letztendlich einen geringeren gemittelten Druck, der die Festigkeit des Bauwerks oder Bauwerks- teils bestimmt. Daher muss die dynamische Belastung flächenspezifisch gesehen werden.

Besonders gelungen ist die weitergehende Untersuchung der dynamischen Beanspruchung von Fassadenelementen durch J. Wacker, bei der wir Windkanalergebnisse als Belastungskollektiv verwendeten, um die Dauerfestigkeit solcher Elemente zu ermitteln. Bei einer Untersuchung von Dauerfestigkeitsproblemen ist die erste Aufgabe die Ermittlung der maßgeblichen Windgeschwindigkeit und ihrer turbulenten Variabilität, dann die Umwandlung dieser Geschwindigkeit in lokalen Winddruck. Damit ist die Belastung festgelegt. Unter der Belastung verformt sich das Element, z.B. die Fassadentafel, möglicherweise gerät sie in Schwingungen durch die Turbulenz – im Extremfall durch Resonanz – und das kann durch schwingende Dauerbelastung zu Ermüdung und Versagen führen. Allerdings: für normale Fassadenelemente dürfte dies kein Thema sein, höchstens wenn man sehr große, sehr biegsame Flächen betrachtet.

Nur in seltenen Fällen entstehen Schwingungen allein durch die Turbulenz der Atmosphäre, bei großen Bauwerken sind dynamische Kräfte viel wichtiger, die durch von den Bauwerken selber oder von benachbarten Gebäuden ausgehenden Wirbeln ausgelöst werden: der Fall von strömungsinduzierten Schwingungen, wie sie W.Schnabel am bereits erwähnten Leuchtturm „Großer Vogelsand“ untersucht hat. Dieses Beispiel eines Schwingungsproblems habe ich in mein Statistikbuch übernommen. Ein besonders interessantes Beispiel hierzu sind die Schwingungen von Tribünendächern von Fußballstadien, bei denen weit auskragende Dachelemente große Auslenkungen bei Starkwinden erfahren könnten, die die unter dem Dach be-

findlichen Zuschauer höchst beunruhigen können. Ein solches Dach haben wir im Windkanal für das Fußballstadion von Nürnberg untersucht, und Jürgen Wacker hat die Erfahrungen aus diesem Projekt mitgenommen, und sich in einem eigenen Windlabor eine internationale Reputation als Experte für Windbelastung bei schwingungsanfällige Gebäuden erworben.

4.7 Engineering Meteorology

Im Jahr 1979 fragte Alan Davenport mich, ob ich nicht als ersten Band einer von ihm herauszugebenden Serie zum Thema „Gebäudeaerodynamik“ einen ersten Band „Engineering meteorology“ herausgeben könnte. Nach einigem Zögern nahm ich diesen Auftrag an, und in einer dreijährigen umfangreichen Gemeinschaftsproduktion entstand ein Buch, in welchem nach einer einführenden Zusammenfassung der meteorologischen Grundlagen alle mit Meteorologie befassten Teilgebiete des Bauwesens dargestellt wurden, mit Anwendungen von der Gebäudeaerodynamik bis zum Eisingenieurwesen und Wellenproblemen. Ich selber übernahm das Kapitel „Modellgesetze“, und für die anderen Kapitel fragte ich bei führenden Experten an. Ich war dankbar, dass alle Angefragten sich spontan an dem Werk beteiligt haben. Trotzdem war es ein gewaltiger Aufwand, das Buch in eine gute Form zu bringen, die Kapitel redaktionell zu vereinheitlichen und ein druckreifes Manuskript herzustellen. Das Buch erschien dann im Jahr 1983. Der Elsevier Verlag verlangte nicht nur das druckfertige Manuskript, sondern auch einen saftigen Druckzuschuss, den ich mir von mehreren Sponsoren erbettelte – und dann wurde der Preis für das Buch trotzdem so hoch angesetzt (über 300 DM), dass es sich nur Bibliotheken leisten konnten und nur wenige Exemplare verkauft wurden. Diese Strategie des Verlags veranlasste Alan, die Serie aufzugeben und sich nicht um weitere Bände der Reihe zu bemühen.

Rückblickend meine ich, dass wir ein gut abgerundetes Programm zu allen Aspekten der Gebäudeaerodynamik hatten, und ein Lehrbuch „Gebäudeaerodynamik“ allein mit Beispielen und Ergebnissen unserer Forschungen hätten füllen können. Aber auch ohne dies Lehrbuch haben wir dazu beigetragen, dass die Gebäude Aerodynamik heute ein respektiertes Teilgebiet des Bauingenieurwesens geworden ist. Durch die vielen früheren Mitarbeiter, die heute dies Gebiet in Praxis und Lehre weiterführen lebt auch die Tradition der IHW Abteilung weiter.

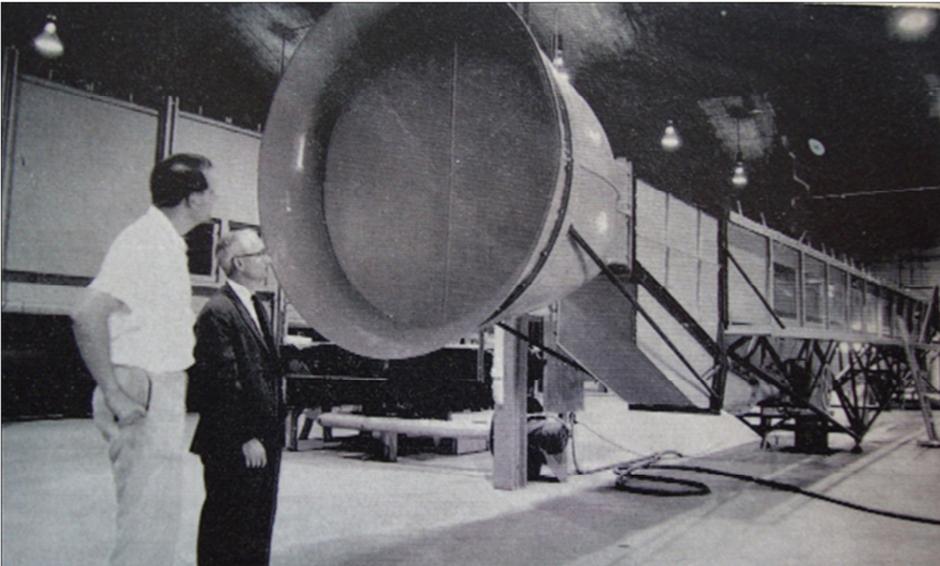
KAPITEL 5: WELLENFORSCHUNG

Um mich forschungsmäßig in Ft. Collins von den bestehenden Windkanälen mit ihrem recht großen Betreuungsaufwand zu befreien, stellte ich 1963 einen Forschungsantrag bei der National Science Foundation (NSF) für den Bau eines Wind - Wellengeräts, in welchem ein Windkanal über einem Wasserkanal angeordnet ist, um die Wechselwirkung zwischen Wind und fließendem Wasser zu untersuchen. Die Begründung für dieses Projekt leitete ich aus den Ergebnissen meiner MS Arbeit ab: da ich dort mit großer Präzision den Beginn der Riffelbildung untersucht hatte, traute ich den Daten mehr als der Theorie, und ich fand, dass die berühmte Kurve von Shields nicht genügend genau ist: meine Daten fielen quer zum Verlauf der Shields-Kurve, mit dem Gefälle als dritter Variable! Eine Überschlagsrechnung zeigte, dass eine Korrektur der Sohlreibungskraft durch Berücksichtigung der relative Geschwindigkeit des fließenden Wasser zur darüber stehenden Luft in die richtige Richtung ging, und ich beschloss daher, dies experimentell zu überprüfen (obwohl ich bei genauerer Rechnung feststellen musste, dass diese Korrektur wohl zu klein ist, um überhaupt erkennbar zu werden). Die NSF zeigte sich interessiert, ich erhielt einen stolzen Betrag an Forschungsmitteln und konstruierte das Gerät. Es wurde Ende 1964 fertig (eine Veröffentlichung hierzu erschien in der französischen Zeitschrift *La Houille Blanche*¹¹⁹), und erste Versuche begannen.

5.1 Winddrift

Am ehesten der Fragestellung des ursprünglichen Antrags bei der NSF gerecht wurde eine Untersuchung der Driftgeschwindigkeit, d.h. der durch den Wind bewirkten Geschwindigkeit der Wasseroberfläche. Für den Fall der Driftgeschwindigkeit bei ruhendem Wasser stellte ich ein analytisches Modell auf, für das *Carl Goodwin* in seiner MS Arbeit die Basisdaten lieferte, die er durch die Beobachtung von Driftkörpern auf der Wasseroberfläche ermittelte¹²⁰. Durch Veränderung der Windgeschwindigkeit konnten vom Wind angetriebene Zustände der Wasserströmungen von laminar bis voll turbulent erreicht werden. Ergänzen konnte ich *Goodwins* Ergebnisse durch zusätzliche Daten, die ich aus einer genaueren Auswertung von Experimenten erhielt, die viele Jahre zuvor schon *Garbis Keulegan* am US Bureau of Standards gewonnen hatte¹²¹. Das Endergebnis veröffentlichte ich in einem Aufsatz¹²², in dem ich theoretisch die Entwicklung der Driftge-

schwindigkeit (ohne Berücksichtigung der Wellen) habe berechnen können, die in (fast) vollem Umfang durch die experimentellen Untersuchungen am Wind-Wellengerät in Ft. Collins bestätigt wurden. Meine theoretischen Untersuchungen beruhten auf der klassischen Grenzschicht Theorie, angewendet auf beide Strömungen: die der Luft, und die im Wasser, gültig für einen ersten Bereich, in welchem der Teil der Energie, die in die Wellen eingeführt wird, noch nicht ins Gewicht fällt. Bei größerem Fetch erhöht sich der Einfluss der Wellen, und die Windenergie teilt sich zunächst auf in Driftströmung und Energie der Welle, und bei weiterem Wellenwachstum spielt die durch Reibung bedingte Driftströmung keine Rolle mehr im Vergleich zur Wellen induzierten Strömung. Hierzu hat *Piroth* in seiner Dissertation Angaben gemacht.



Das fertige Windwellengerät: mit Cermak bei der Einweihung

Später führten *Mike Trawle* und ich zusätzlich umfangreiche Messungen von Wind erzeugten Driftgeschwindigkeiten auf *fließendem* Wasser, d.h. auf Gerinneströmungen aus, mit Wind in Strömungsrichtung und ihr entgegen, deren Ergebnisse in¹²³ zusammengefasst sind. Die Darstellung in dieser Zusammenfassung war allerdings rein empirisch. Damit habe ich diese Untersuchungen abgeschlossen. Allerdings haben wir eine Untersuchung von Driftgeschwindigkeiten, aber ohne Wind! noch einmal eher zufällig in Karlsruhe aufgegriffen. Ein Student hatte unter Anleitung von *Emil Mosonyi*

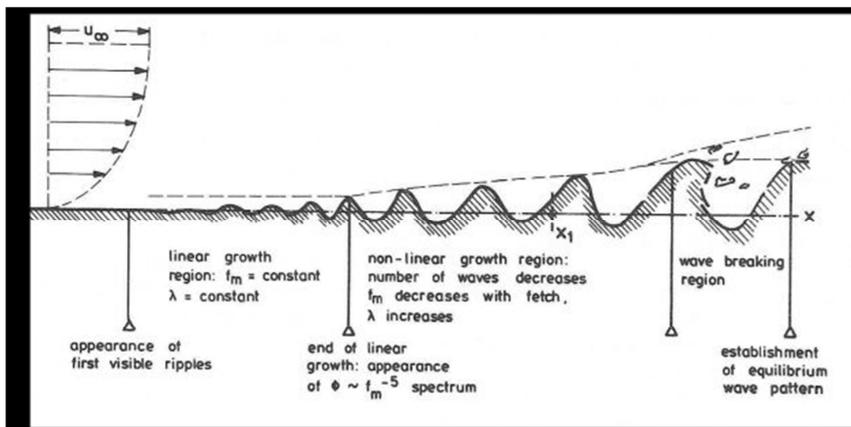
die Strömung in einem Gerinne untersucht, das aus zwei s-förmig zusammengesetzten Kreisbögen bestand. Ich schlug vor, für diese Situation den Oberflächendrift zu untersuchen, und *R.Friedrich* führte die einfachen Versuche mit schwimmenden Partikeln durch¹²⁴. Wir stellten fest, dass durch die Krümmung der Stromlinie die mittleren Driftgeschwindigkeiten erheblich vermindert wurden!

5.2 Entwicklung von Windwellen

Sehr bald nach Auswertung der ersten Versuchsergebnisse waren die ursprünglichen Ziele des ersten Forschungsvorhabens für das Windwellengerät erreicht: die Hypothese von der Wirkung der Relativgeschwindigkeit zwischen Luft und Wasser als Ursache für eine Änderung der kritischen Geschwindigkeit für Geschieberiffel konnte wegen des geringen Effekts ausgeschlossen werden. Aber: die ersten Beobachtungen nach Einschalten des Gebläses zur Winderzeugung zeigten, dass das Besondere dieser Strömungssituation nicht das Geschwindigkeitsfeld der Gerinneströmung war, sondern die durch den Wind erzeugten Wellen.

Es war unendlich reizvoll zu beobachten, wie der Wind über die Wasseroberfläche strich und immer neu Wellen erschuf, die entlang des Kanals anwuchsen und am Ende an der Böschung des Gerinneauslaufs verschwanden. Dabei blieb keine Welle identifizierbar erhalten: im Gegensatz zur klassischen Wellentheorie, die eine klassische Anwendung der Theorie der Potentialströmungen ist, nach der Wasserwellen fast energieverlustfrei über das Meer wandern, fand unter der Wirkung des Windes im Gerinne eine ständige Veränderung des Wellenfeldes statt. Es verminderte sich die Wellenfrequenz mit der Entfernung vom Ufer. Gut identifizierbare Wellenzüge mit eindeutig erkennbaren dominierenden Wellen waren auf einmal nach einem halben Meter verschwunden, konnten vom Auge nicht verfolgt werden, und hatten neuen Wellenzügen mit ebenso klaren, längeren, dominierenden Wellen einer niedrigeren Frequenz Platz gemacht. Aus meinen Beobachtungen schloss ich, dass die Wellenentstehung und Entwicklung mit Zunahme der Überstreichungslänge x (dem Fetch, d.h. dem Abstand vom Ufer, siehe Bild) in drei Bereichen erfolgt. Im ersten, dem Wellenentstehungsbereich, bilden sich besonders bei niedrigen Windgeschwindigkeiten bei vom Ufer kommenden Winden, wohl definierte Wellenzüge, mit klar definierten Kronen quer zur Windrichtung. Sie ändern

weder ihre Wellenlänge noch ihre Frequenz mit Fetch x und wachsen stattdessen von anfänglich nur durch ganz schwache Riffelung der Wasseroberfläche erkennbare Undulationen in Wellen mit endlicher Höhe an – ein klares Zeichen eines linearen Zusammenhanges. Aber bereits nach ganz kurzer Strecke zerfallen diese sehr schön zweidimensionalen Wellen im zweiten, dem Übergangsbereich, zunächst in ein Zopfmuster dreidimensionaler Wellen, die dann übergehen in die beschriebenen, mit der Entfernung anwachsenden Wellenmuster. Im dritten Bereich brechen die Wellen und es bilden sich Schaumkronen.



Die Bereiche der Wellenentstehung

Auf Grund dieser Beobachtungen verschob ich die Zielrichtung der Forschung am Wind-Wellengerät und beschloss, die beobachtete Entwicklung des Wellenfeldes zu untersuchen und den Schwerpunkt auf die Untersuchung winderzeugter Wasserwellen auf einer Kanalströmung zu legen. Dabei plante ich, in mehreren Stufen vorzugehen, ausgehend von Windwirkung bei stehendem Wasser, dann Wirkung des Windes auf erst in und dann entgegengesetzt der Windrichtung fließende Gerinneströmung. Allerdings konnte ich nur den Fall mit stehendem Wasser bearbeiten, weil wir im Herbst 1968 Ft. Collins verließen.

5.2.1 Wellenentstehung auf stehendem Wasser

Ein Blick in die Literatur zeigte, dass es damals (und auch heute noch!) zwei Theorien gab, mit denen die Entstehung der Wellen im ersten Bereich

erklärt wurde: eine typische laminare Stabilitätstheorie, wie sie mir bereits bekannt war aus der Theorie der Turbulenzentstehung bei Grenzschichten, verbunden mit dem Namen *John Miles* (Professor an der University of California), und eine etwas komplizierte Theorie der Wellenentstehung durch turbulente Druckfelder von *Owen Phillips* (Professor an der Johns Hopkins University in Baltimore). Der von *Miles* untersuchte Mechanismus, basierend auf der laminaren Stabilitätstheorie von *Tollmien* und *Schlichting*, konnte sicherlich nur die Entstehung der ersten Wellen, aber nicht ihre Weiterentwicklung in neue Wellenfelder mit anwachsenden Wellenlängen erklären. Auch die Theorie von *Phillips* hatte diesen Nachteil. Nach ihr sollten die Kämme der ersten Wellen sich durch die Druckfelder turbulenter Wirbel ergeben (nach der Theorie der Wellenerzeugung durch einen lokalen, durch die turbulente Strömung erzeugten Druckpunkt, die Ozeanografen schon im 19. Jahrhundert zur Erklärung der Heckwellen von Schiffen entwickelt hatten). Erste Beobachtungen an unserem Wind – Wellengerät schienen diese Theorien nicht zu bestätigen, und so beschloss ich, die Entstehung und Entwicklung von Wellen durch Wind genauer zu untersuchen.

Ziemlich bald hatte ich mich soweit in die Theorie der Wasserwellen eingearbeitet, dass ich eine sehr auf Potentialtheorie abgehobene Vorlesung zum Thema Wasserwellen anbieten konnte, aus der ich dann weiter lernte – vermutlich mehr als meine Studenten! (Diese Vorlesung habe ich später auch in Deutschland jedes Jahr gehalten, allerdings in einer mathematisch abgespeckten Form, damit ich auch Vorlesungszeit für die praktische Anwendung der Theorie im Küstenbau hatte)¹²⁵. Ich schloss aus meinen Beobachtungen und den theoretischen Grundlagen, dass es unsere erste Aufgabe sein müsste, die vorhandenen theoretischen Modelle auf ihre Richtigkeit zu überprüfen (im Sinne einer „Falsifikation“), in dem wir die experimentelle Umgebung, wie sie für die Entwicklung der Theorien vorausgesetzt wurde so genau wie uns möglich einrichteten

Für den Mechanismus von *Miles* für die Entstehung der allerersten kleinen Wellen konnte ich mich erwärmen, allerdings sah ich in meinem Kanal, dass die Windströmung nicht laminar (wie *Miles* vorausgesetzt hat), sondern ausgesprochen turbulent war. So beauftragte ich meinen Graduate Student *Ron Drake*, (er war mein erster Doktorand, aber sehr selbständig – und ich hatte wenig Kontakt zu ihm. Nach der Promotion verschwand er

aus unserem Blickfeld), einen guten numerischen Mathematiker, die *Miles'sche* Theorie mit turbulentem Profil durchzurechnen, was er auch tat, wobei allerdings die von ihm berechneten Stabilitätskurven auch nicht mit der Beobachtung im Einklang waren¹²⁶. Seine Rechnungen zeigten, dass bei einem logarithmischen Profil (wie für turbulente Strömungen vorausgesetzt wurde) die ersten Wellen auch linear anwuchsen, aber Wachstumsrate und kritische Wellenlänge der experimentell beobachteten ersten Wellen unterschieden sich immer noch wesentlich von den theoretisch vorhergesagten Werten. Aber *Drake's* Rechnungen wiesen in die richtige Richtung und das genügte mir, um zu akzeptieren, dass die *Miles'sche* Theorie, gegebenenfalls mit noch weiteren Modifikationen vermutlich richtig ist, um die ersten Riffel zu erklären. Da sich aber der Gültigkeitsbereich dieser Theorie auf die ersten Meter der Überstreichungslänge beschränkte, haben wir diese Theorie der ersten Wellen danach nicht weiter untersucht (heute hat man durch genauere numerische Rechnungen das modifizierte Miles Modell recht gut bestätigen können – siehe z.B. das Kapitel hierzu im Buch von *P. Jansen*¹²⁷).

Doch die Erklärungen von *Phillips* für die Weiterentwicklung der Wellen im zweiten Bereich konnte ich nicht mit unseren Beobachtungen in Einklang bringen und ich beschloss, diesen Prozess genauer zu untersuchen. Dafür hätte ich weitere Mittel für einen Doktoranden einwerben müssen, denn eine vertiefte Untersuchung der Wellenentstehung war mit den Mitteln des finanzierten Forschungsprogramms nicht bezahlbar. Glücklicherweise kam zu dieser Zeit *George Hidy* vom National Center for Atmospheric Research (NCAR) in Boulder an unserem Versuchsstand vorbei und war wie ich fasziniert von dem, was er sah und wurde mein Partner – was mir nicht nur endlich einmal einen Kollegen brachte, mit dem ich endlos diskutieren konnte, sondern auch einen finanzkräftigen Förderer für das gar zu weit vom ursprünglichen Antrag abweichenden erste Versuchsprogramm. Die Partnerschaft mit *George Hidy* bestand bis Ende meiner Zeit in Ft. Collins. Etliche schöne Veröffentlichungen sind aus dieser gemeinsamen Arbeit entstanden, bei denen Theorie und physikalische Grundüberlegungen im Wesentlichen von mir stammten, *George Hidy* war Kritiker und Schreiber (mit mir) der Arbeiten, und *Po-Cheng Chang* war der unermüdliche Experimentator, der die meisten Versuche am Wind-Wellenkanal der CSU durchführte und auch wesentlich an der Auswertung beteiligt war. Ich ha-

be die enge Zusammenarbeit mit *Po-Cheng Chang* und *George Hidy* als die schönste wissenschaftliche Zeit in den US empfunden.

George Hidy war mehr als ich von der Notwendigkeit des Publizierens überzeugt, und brachte mich dazu, auch noch nicht abgeschlossene Untersuchungen in Abschnitten zu veröffentlichen. Statt Berichte für die Berichtssammlung der CSU begann ich mit ihm, Aufsätze für die Literatur zu schreiben. Wir machten uns gleich daran, die ersten Daten aus dem Versuchsprogramm zu ordnen und zu publizieren. Dazu standen vor allem Datenreihen von kontinuierlichen Messungen der Wasseroberfläche bereit, für verschiedene Windgeschwindigkeiten und verschiedene Überstreichungslängen. Naheliegend war eine empirische Darstellung der Abhängigkeit der statistischen Eigenschaften der welligen Wasseroberfläche von den Variablen Windgeschwindigkeit und Fetch (das ist die Überstreichungslänge des vom Ufer kommenden Windes, gemessen vom Ufer). Die interessanteste statistische Größe war das Energiespektrum, über das wir in mehreren Veröffentlichungen berichteten. Wir begannen mit einem Konferenzbericht¹²⁸, in dem wir die ersten Beobachtungen vorstellten, und einer kurzen Veröffentlichung¹²⁹, in der wir unsere Beobachtung des Ähnlichkeitsspektrums mitteilten, d.h. wir zeigten, dass unabhängig von Fetch und Windstärke die dimensionslosen Wellenspektren die gleiche Form haben. Dass dies auch einigermaßen für Wellen in größerem Maßstab, d.h. für Fetchlängen von einigen Kilometern gilt, zeigte dann *Hidys* graduate student *Hess*¹³⁰. Später stellte sich aber heraus, dass diese universale Form doch nicht gilt: die „reinen“ Wellen des Labors haben eine andere Form des Spektrums als die „schmutzige“ Realität des Meeres, wo an jedem Punkt von allen Seiten her Wellen verschiedener Ursachen zusammenkommen.

Das Spektrum und Parameter, mit denen das Spektrum dimensionslos gemacht wurde, stellten wir in der ersten unserer drei wichtigsten, im angesehenen *Journal of Fluid Mechanics* veröffentlichten Arbeiten¹³¹ vor. Er wurde hauptsächlich von *George Hidy* geschrieben und gibt einen allgemeinen Überblick über diese Zusammenhänge. Es sollte eigentlich unsere Versuchsumwelt und die damit erzielbaren Ergebnisse vorgestellt werden, aber *George* machte darin auch den Versuch, anhand der vorhandenen ersten Wellendaten die Theorien von *Miles* und *Phillips* zu verifizieren. Ich war gern bereit, unsere Versuche international mitzuteilen, aber mit *Georges*

Interpretation der Ergebnissen im Sinne einer Bestätigung der Theorien von *Miles* oder *Phillips* war ich nicht einverstanden, weil bei diesen ersten Versuchen die Versuchsbedingungen nicht genau genug den Voraussetzungen der Theorien entsprachen.

In der zweiten dieser drei Arbeiten standen dann im Wesentlichen unsere Ergebnisse zur Entwicklung der Wellen im Übergangsbereich zur Diskussion, wobei inzwischen die Randbedingungen denen der Stabilitätstheorien von *Miles* und *Phillips* angepasst worden waren. Neben der Infragestellung des *Phillips*'schen Mechanismus habe ich in diesem Aufsatz in einem Anhang eine Analyse des Gleichgewichtszustandes des Wellenfeldes im 2. Bereich beigefügt. Auch hier war ein Widerspruch aufzuklären zwischen Theorie und Experiment. *Owen Phillips* hatte postuliert, dass Wellen von großen zu kleinen in einer Kaskade abgebaut werden. Die Wellen werden immer kleiner, um am Ende durch Viskosität gänzlich abgebaut zu werden – in Analogie zur Turbulenzkaskade! Für den zweiten, den Zwischenbereich, konnte ich diese Theorie nicht bestätigt finden, sah ich doch in unserem Wind – Wellenkanal, dass mit wachsendem Wind (und Abstand vom Ufer) immer größere Wellen entstehen. Das Phänomen war bekannt: für das Wachsen der Wellen, das auch auf dem Ozean beobachtet wurde, war die Theorie von *Klaus Hasselmann* anerkannt, die eine Transferfunktion für die Energie vom Wind zu den Wellen vorsah, nach der das Wellenfeld ein breites Spektrum aller möglichen Wellen aufwies, die im Verlauf von Ort und Zeit durch nicht-lineare Wechselwirkungen über eine (empirische!) Transferfunktion so angefacht oder gedämpft wurden, dass der beobachtete Verlauf entstand. Die merkwürdige Wachstumstransferfunktion von *Hasselmann* war mir sehr suspekt und erschien mir physikalisch nicht schlüssig begründet.

5.2.2 Die dominierende Welle

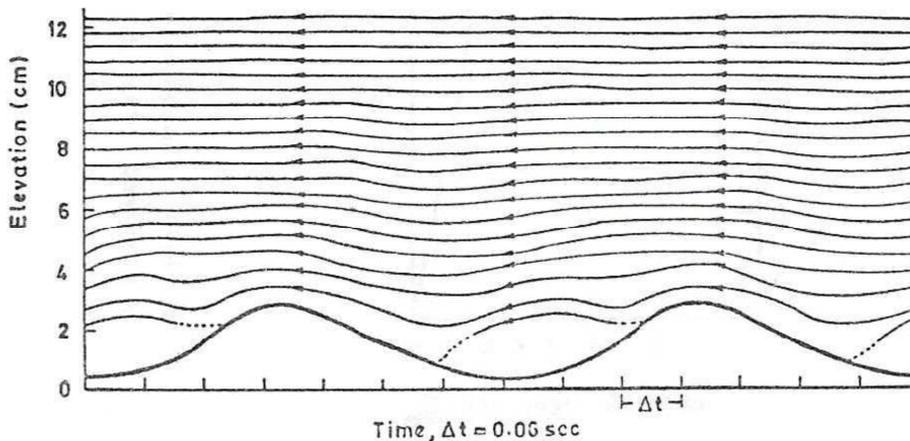
Der oben beschriebenen Lehrmeinung über die Wellenwechselwirkung glaubte ich ein Alternativkonzept entgegen setzen zu können. Ich vertrat die Ansicht, gedeckt durch unsere experimentellen Daten, dass das Wellenspektrum bestimmt wird durch die größten Wellen, die unter Einfluss des Windes verformt werden und bis zur maximal möglichen Höhe anwachsen, - die Arbeit des Druckfeldes an der Welle wird dabei in erhöhte Energie der Welle – d.h. kinetische Energie (durch Erhöhung der Progressionsge-

schwindigkeit) und potentielle Energie (Zunahme der Wellenhöhe bei unveränderter Form) umgewandelt. Die verformte Welle enthält höhere Harmonische der Grundfrequenz der dominierenden Welle, die im Spektrums auftreten.^{132 133} Den Beweis für das Konzept der dominierenden Welle, die sich unter Windwirkung verformt, wollte ich aus unseren Daten vom Wind – Wellengerät ableiten.

Um dieses Konzept nachzuweisen, mussten dominierende Wellen und das dazu gehörige Windfeld direkt gemessen werden, und zwar durch Parallelmessungen von Wasserspiegellage und Windgeschwindigkeit in verschiedener Höhe über der Welle. Hierfür entwarf der Techniker *Arpad Gorove*¹³⁴ nach meinen Vorgaben einen Instrumententräger, mit dem ein Hitzdrahtanemometer immer im gleichen Abstand von der Wasseroberfläche geführt werden konnte, und *Po Cheng Chang* führte die Messungen als Teil seiner Dissertation aus. Aus den parallelen Zeitreihen von Windgeschwindigkeit und Höhe über der Wasseroberfläche wurden alle größten Wellen (die 30% höchsten Wellen) mit dazu gehörigen Geschwindigkeiten herausgeschnitten und so übereinander angeordnet, dass die Wellenmaxima direkt übereinander lagen. Dann wurde über die Vertikale der Mittelwert der Welle und das darüber bestehende Windprofil bestimmt. Diese Mittel bilden die dominierende Welle und das dazugehörige mittlere Windfeld (unser 10000 Dollar Bild!). Durch Veröffentlichung des auf der Folgeseite gezeigten Bildes im dritten Beitrag in der Zeitschrift JFM, der angesehensten Zeitschrift für Strömungsmechanik¹³⁵, hofften wir eine Diskussion anzuregen. Dort zeigte ich auch, dass die Idee der „dominierenden Welle“ genügt, um die Ähnlichkeitsgesetze für die Wellenentwicklung auf eine gute physikalische Grundlage zu stellen (einfach gesagt: die Maximalhöhe der Wellen ist dadurch beschränkt, dass die Beschleunigung der Wellenkronen nicht größer als die Erdbeschleunigung sein kann).

Ich war überzeugt, dass dieses Bild der dominierenden Welle mit entsprechendem Geschwindigkeitsfeld eine Sensation sei und meinen Vorstellungen zum Durchbruch verhelfen würde, und ich benutzte jede Gelegenheit, um den führenden Fachleuten meine Ideen vorzustellen. Das Argonne Laboratory ermöglichte mir 1969, unsere Ergebnisse einem Kreis von wichtigen Experten bei einem Workshop über Wind und Wellen vorzutragen, veranstaltet im Hasselby Slott, einem Schloss bei Stockholm, das von der

Schwedischen Regierung als wissenschaftliche Tagungsstätte zur Verfügung gestellt war. Wichtig war mir auch, für das Konzept der „dominant wave“ bei den Küstenbauingenieuren zu werben¹³⁶.



Die dominierende Welle

Ich übernahm die Thematik auch nach Karlsruhe, wo wir ein neues Wind-Wellengerät bauten (hauptsächlich zur Untersuchung der Übergänge an Grenzflächen, s.u.). An diesem Windwellenkanal machte *Wolfgang Bächlin* in seiner Diplomarbeit noch einmal besonders sorgfältige Messungen von winderzeugten Wellen, und mit seinen Ergebnissen als Ergänzung konnte ich die oben beschriebene zusammenfassende Hypothese zu Wellenentstehung und Entwicklung entwerfen und in einer Arbeit bei einer wichtigen Tagung in Südfrankreich vorstellen, bei dem sich alle namhaften Ozeanografen unter den Zuhörern befanden¹³⁷. Allerdings schien mir, dass mein Konzept keine große Beachtung fand, und enttäuscht gab ich danach weitere Forschungen zur Entstehung von Windwellen auf.

5.3 Modellierung von Wind und Wellenkräften

Die gleichzeitige Modellierung von Wind – und Wellenkräften war ein neues Gebiet, angeregt durch meine Windkanaluntersuchungen. Wie kann man gleichzeitig das Windprofil und das Wellenfeld, das durch Wind erzeugt wird, im Modell nachbilden? Es war üblich, Modellversuche mit Wellen durch sinusförmige zweidimensionale Wellen durchzuführen, die einfach durch ein in den Kanal getauchtes horizontal bewegtes Brett (oder mit ähnlichen mechanischen Hilfsmitteln) erzeugt werden. Man wusste auch, dass

Bauwerke nicht nur durch Wellen einer einzigen maximalen Frequenz belastet werden, sondern durch ein ganzes Spektrum von Wellen, die man sich als Häufung von zufällig zusammenkommenden Wellen aller möglichen Frequenzen vorstellte. Diese Vorstellung war auch die Basis der bereits erwähnten Theorie von *Klaus Hasselmann* über die Entwicklung von Wellenfeldern, die Eingang in die gängigen Textbücher gefunden hat. Ich aber glaubte, dass das Wellenfeld von Wind erzeugten Wasserwellen aus gebundenen Wellen besteht, die deshalb ein kontinuierliches Spektrum bilden, weil sie zufällig deshalb mal etwas größer und mal etwas kleiner sind, weil sie vom Wind erzeugt werden, der bekanntlich nie (wie im Windkanal) mit ganz gleichmäßiger Stärke weht. Dabei habe ich mir nicht vorgestellt, dass die „dominant wave“ sinusförmig ist, sondern ich vermutete, dass diese Welle durch den Wind verformt sein könnte. Im Laboratorium konnte ja bereits *Po Chang* durchaus bestätigen, dass es sich bei der mittleren Welle keineswegs um eine Sinuswelle handelt, und dies wurde durch die bereits erwähnten schönen Ergebnisse von *Wolfgang Bächlin* bestätigt. Er konnte klar zeigen, dass die Abweichung der Form der dominanten Welle von der Sinusform höhere Harmonische erzeugt, die zu kleinen Maxima im Spektrum führten (interessanterweise mit Amplituden, die dem 5/3 Gesetz von *Owen Phillips* zu folgen schienen). Ich schloss daraus, dass die Wellenkräfte, die von solchen Wellen auf Bauwerke erzeugt werden, größere Kräfte ausüben als die Sinuswellen, weil die Wellen mit einer steileren Vorderseite auf die Bauwerke aufprallen würden.

Aus dieser Vermutung entstand zunächst die naheliegende Schlussfolgerung, dass für die Modellierung von natürlichen winderzeugten Wellenfeldern eben auch künstliche winderzeugte Wellenfelder herangezogen werden müssten, so dass bei der Modellierung der Extrembelastung auf Küstenbauwerke bei Sturmereignissen nicht nur die Wellen, sondern auch das Geschwindigkeitsprofil des Windes modellähnlich dargestellt werden müssten. Die Modellüberlegungen hierzu veröffentlichte ich zusammen mit *Jack Nath* – die Ideen erschienen den Gutachtern unserer Veröffentlichung so interessant, dass wir die angesehene Croes Medaille (für die zweitbeste Veröffentlichung aller ASCE Zeitschriften des Jahres 1969 der American Society of Civil Engineers) dafür bekamen¹³⁸. Ich wollte mich aber nicht mit dieser theoretischen Überlegung begnügen, sondern experimentell den Nachweis erbringen, dass die Maximalkraft durch die „dominant wave“

erzeugt wird. Diesen Beweis wollte ich mit meinen Mitarbeitern direkt unter Verwendung von Meereswellen an konkreten Bauwerken führen. Dazu mussten jedoch nicht nur Wellen sondern auch parallel dazu Wellenkräfte auf typische Bauwerke in größerem Maßstab gemessen werden.



Der Forschungszylinder an der Forschungsplattform Nordsee

Die Gelegenheit für solche Untersuchungen wurde mir durch ein Angebot des Bundesministeriums für Forschung und Technologie geboten. Das Ministerium hatte den Bau einer Forschungsplattform in der Nordsee vor Helgoland finanziert, um daran relevante Forschungen zur Förderung der Meerestechnik durch Industrie und Universitäten zu generieren. Wegen der recht aufwendigen Logistik hatte sich aber bis dahin kaum jemand gefunden, der die Forschungsplattform benutzen wollte. Als ich dem zuständigen Sachbearbeiter beim BMFT von unserem Problem erzählte, bot er mir die Nutzung kostenfrei an und stellte uns die Mittel zur Verfügung, einen vertikal beweglichen Zylinder aus Stahlrohr und drei Wellenhöhenmessgeräte einzurichten, wie im Bild gezeigt, und zu betreiben. Damit wollten wir sowohl die wechselnden Kräfte auf den Zylinder, als auch genau das diese Kräfte bewirkende Wellenfeld ausmessen. Praktisches Ziel dieser Untersuchungen sollte eine Verbesserung der bekannten „Morison Gleichung“ für Kräfte auf Zylinder sein.

Die Einrichtung der Versuche an der „Forschungsplattform Nordsee“ und die ersten Versuche führte *Helmut Eiden* in den Jahren frühen 80-er Jahren an einem von uns entworfenen Zylinder durch, der über Druckmessdosen an einer beweglichen Halterung an einem Bein der Forschungsplattform befestigt war und der Tidebewegung folgend in der Höhe verschoben werden konnte. Allerdings, als dann die Einrichtung fertig war, mussten wir auf extreme Windverhältnisse warten, um echte, voll entwickelte dominierende Windwellen zu erhalten – eine Voraussetzung für die Verifizierung meines Konzepts, gleichzeitig aber auch um extreme Belastungen auf den Zylinder zu erhalten, da in einem extremen Windfeld ja die größten Belastungen zu erwarten waren. Es war leider nicht möglich, diese Arbeiten zu einem Abschluss zu führen. Die vorgesehene Verifikation von Modellgesetzmäßigkeiten ging nur bedingt, weil extreme Windverhältnisse, oder selbst stabile Bedingungen bei langfristig gleichmäßigem Wind aus einer sich nicht ändernden Windrichtung sich einfach nicht einstellen wollten. Und dann wurde die Finanzierung eingestellt, nachdem wir gerade die ersten Messungen durchgeführt hatten – und auf höhere Wellen warteten.

Erste Veröffentlichungen von Ergebnissen, die aber nicht genau genug waren, um meine Vermutung zu bestätigen, konnte ich mit dem Sachbearbeiter *Helmut Eiden* erstellen, ¹³⁹ aber diese Ergebnisse wurden keineswegs dem experimentellen Aufwand gerecht. *Helmut Eiden* gab auf, auch wohl aus gesundheitlichen Gründen und weil die Messeinrichtung an der Forschungsplattform abgebaut werden musste – es hieß, dass dort Versuche für das Militär gemacht werden sollten - und etwas später wurde auch die ganze Plattform aufgegeben.¹⁴⁰ Ich habe dann noch einmal versucht, die Daten von *Eiden*¹⁴¹. zu bearbeiten und konnte auch über eine Fourieranalyse einigermaßen plausible Parameter für die von den Küstenbauingenieuren verwendeten *Morison* Gleichung bestimmen. Die Ergebnisse zeigten allerdings enorme Streuungen, und eine klare Identifikation der „dominierenden Welle“ und ihrer Wirkung auf die Kräfte auf Zylinder konnte nicht erbracht werden¹⁴².

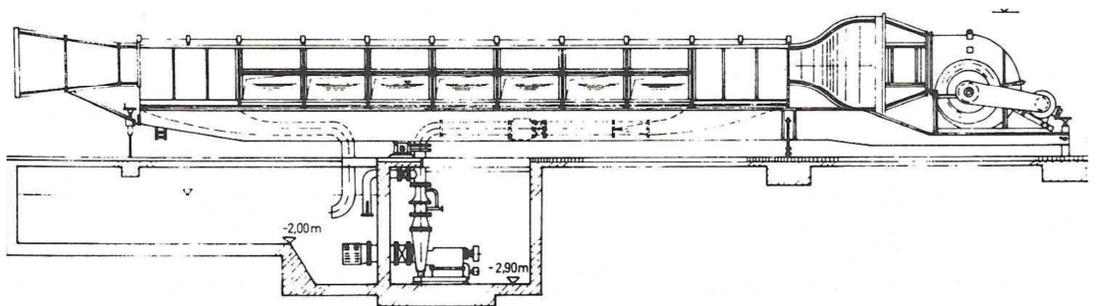
Später haben wir unter anderen Voraussetzungen noch einmal versucht, mein Grundkonzept zu verifizieren. In den letzten Jahren des Sonderforschungsbereichs 210 haben wir die Möglichkeit gehabt, Wellenmessungen in Labor durchzuführen, die wir mit Bodenseedaten vergleichen konnten. Im Rahmen einer Untersuchung zum Schutz des Schilfes (!) am Bodensee

konnten wir eine einfache Forschungsplattform aufbauen und daran einen Zylinder hängen, der durch Wellen, nachgewiesen durch drei Wellensonden, belastet wurde. *Klaus Piroth* führte diese Versuche durch. Er konnte zwar die Morison Gleichung anhand experimenteller Ergebnisse nicht verbessern, er entwarf jedoch in seiner Dissertation von 1994 ein neues Konzept von der Natur der Windwellen im Labor, das er mit Messungen am Bodensee mit natürlichen Windwellen verglich¹⁴³. Die Wellenuntersuchungen am Bodensee lieferten als Nebenprodukt ein Wellenbelastungskollektiv für die Ufer des Bodensees. Die Ergebnisse stehen in *Piroth's* Dissertation von 1994, wurden jedoch nur in Berichten des SFB 210 veröffentlicht. Das entscheidende Ergebnis der Dissertation von *Piroth* ist die Erkenntnis, dass die Modellierung von Windwellen im Windwellenkanal ergänzt werden muss durch Berücksichtigung des Wellenalters - Verhältnis von Windgeschwindigkeit zu Geschwindigkeit der dominierenden Wellen, die in Labor und Natur gleich sein müssen: ein Zustand, der sich im Labor nur erreichen lässt, indem dominierende Wellen durch einen Wellengenerator erzeugt werden.

5.4 Stoffeintrag durch die wellige Zwischenfläche.

Es war naheliegend, unsere Untersuchungen von Wellenfeldern zu erweitern auf die Fragestellung des Stoffeintrags aus der Luft in das Wasser oder umgekehrt. Hierbei ist zu beachten, in welcher Schicht die Stoffquelle liegt. Es gibt Prozesse, bei denen es um die Gasaufnahme durch das Wasser geht: das ist vor allem der Prozess der Zufuhr von Sauerstoff aus der Luft in das fließende Wasser, um den Sauerstoff zu ersetzen, der dem Gewässer durch den Abbau von Abwasser entzogen wird. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass direkt an der Wasseroberfläche die Sauerstoffkonzentration durch die Luft bis zur Sättigung angereichert wird, die Stoffquelle also an der Wasseroberfläche liegt, und der Transportprozess in das Innere des Wasserkörpers durch die dort herrschenden Strömungszustände bewirkt wird, d.h. durch die Turbulenz im Wasserkörper, die bei ruhendem Wasser durch die Windschubspannung an der Oberfläche, bei fließendem Wasser (in Gerinnen) hauptsächlich infolge der Rauheit der Gerinnewände entsteht.

Bereits in Ft.Collins gab ich *Azis Eloubaidy* die Aufgabe, die Einmischung von Sauerstoff in die Gerinneströmung am Wind-Wellenkanal unter Einwirkung des Windes zu untersuchen, wobei natürlich der Einfluss der Wellen zu berücksichtigen ist. Experimentell war diese Frage nicht ganz einfach zu lösen, da ja erst der vorhandene Sauerstoff aus dem Wasser des Windwellenkanals entfernt werden musste. Wir veröffentlichten seine Ergebnisse¹⁴⁴, aber ich war nicht ganz zufrieden mit ihrer Qualität, und sie sind auch später durch weitere Untersuchungen in Karlsruhe durch *R. Friedrich* nicht bestätigt worden¹⁴⁵. Hauptsächlich für diese Untersuchungen wurde ein im Bild unten gezeigtes, dem Gerät in Ft. Collins nachgebauteres größeres Versuchsgerät im Rahmen des SFB 80 entwickelt, an welchem vor allem Stoffübergänge untersucht werden sollten. (An diesem Wind-Wellengerät des IHWs machte auch *Andreas Dittrich* Versuche zum Sauerstoff Eintrag in fließende Gewässer).



Das Wind - Wellengerät des IHW

Als abschließende Arbeit zu diesem Themenkreis haben wir versucht, die Ergebnisse all dieser Untersuchungen zum Sauerstoffeintrag in fließendes oder stehendes Wasser zusammenzufassen¹⁴⁶ (Sauerstoffeintrag durch den Wind in sauerstoffarmes stehendes Gewässer, bei dem der Sauerstoffeintrag durch die windinduzierte Turbulenz im Gewässer entsteht, Sauerstoffeintrag in ein Sauerstoff armes fließendes Gewässer ohne Wind, bei dem der Sauerstoffeintrag durch die Gerinneturbulenz erfolgt, und Sauerstoffeintrag in ein fließendes Gewässer mit Wind) in ein einheitliches Schema zu bringen, das ich bei einer Konferenz an der Cornell University im Jahre 1984 vorstellte. Ich halte diese Arbeit für einen unserer wichtigsten Beiträge, auch wenn er in keiner angesehenen Zeitschrift veröffentlicht wurde.

Bei der zweiten Art des Übergangsvorganges geht es einerseits darum, den Wind als Trägerfluid zu untersuchen, z. B. bei der Abkühlung eingeleiteten Kühlwassers, oder bei der Verdunstung, bei der Wasserdampf durch den Wind transportiert wird. Dieser Vorgang entsteht durch einen Unterschied im Dampfdruck des Wasser im Kanal und in der Luft. Verdunstung wird erzeugt, wenn der Dampfdruck des Wassers an der Oberfläche (= Sättigungsdampfdruck, entsprechend der Temperatur der Wasseroberfläche) höher ist als der Dampfdruck der Luft (entsprechend der Lufttemperatur). Auch ein Wärmetransport findet an der Oberfläche statt, einerseits durch die Wärmeleitung vom Wasser in die Atmosphäre oder umgekehrt, und andererseits durch die bei der Verdunstung bzw. Kondensation freiwerdende bzw. verbrauchte Energie bzw. besteht und ein Transport von Wärme bzw. Wasserdampf in die Atmosphäre bewirkt wird. Die Arbeiten zur Untersuchung des Wärmeübergangs von Luft auf Wasser und umgekehrt wurden durch *Peter Wengfeld* im Rahmen seiner Dissertation durchgeführt, deren Ergebnisse wir im von uns organisierten IAHR Congress in Baden - Baden. vortrugen¹⁴⁷. Seine Dissertation aus dem Jahre 1978 war eine gründliche und mit allen Methoden der damaligen Messtechnik durchgeführte Studie über Impuls-, Wärme- und Wasserdampftransport über vom Wind erzeugten Wasserwellen, durchgeführt am Wind - Wellengerät des IHWs. Noch einmal haben wir dann in einem Aufsatz zu einer Konferenz über Seenprozesse einen Gesamtüberblick über alle Austauschvorgänge -vom Impulsaustausch an der Wasseroberfläche bis zum Wärme und Stoff Übergang - gegeben¹⁴⁸.

Im Jahre 1989 wurde das Wind-Wellen-Gerät¹⁴⁹ noch einmal dem Zweck nach genutzt. In Zusammenarbeit mit *Bernd Jähne* aus dem Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg diente es zur Entwicklung einer neuartigen Meßtechnik für Oberflächen nahe Austauschvorgänge. Danach gab ich auch diese Untersuchungen auf, und das Windwellengerät wurde als einfacher Windkanal entfremdet (wie ich hoffte, nur vorübergehend), sodass am IHW gleichzeitig zwei gebäudeaerodynamische Untersuchungen durchgeführt werden konnten.

KAPITEL 6: HYDROLOGIE

Das Arbeitsgebiet Hydrologie entwickelte sich von den Anfängen 1970 in Karlsruhe bis zum Ende meines Berufslebens zum immer wichtigeren Schwerpunkt der Institutsarbeit. Wie es dazu kam und was wir im Laufe der Jahre an Erkenntnissen gewonnenen haben, soll in diesem Kapitel beschrieben werden. Dazu gliedre ich dies Kapitel auf in zwei Teile: erst beschreibe ich meinen Weg zur Hydrologie und dann gebe ich eine Übersicht über die Ergebnisse unserer hydrologischen Forschungen, aufgeteilt in vier Abschnitte: Hydrologische Prozessforschung, ausgehend vom Hochwasserschutz, Modellierung des Stofftransports aus den Flächen eines Einzugsgebiets, wasserwirtschaftliche Langzeitmodelle, und schließlich ein separates Teilkapitel über unseren Arbeiten für die Speicherplanung,

Die Hydrologie habe ich aufgefasst als Wissenschaft von der Wechselwirkung des Menschen mit dem Wasserkreislauf, in dem das Wasser nach Menge und Güte als Teil der Landschaft diese formt und den Lebensraum der Menschen bestimmt und mit dem Leben der Menschen in diesem Naturraum in wechselnder, analytisch mit den Methoden von Mathematik und Physik erfassbaren Beziehungen steht. Ich stellte mir vor, diese Zusammenhänge müssten durch ein auf der Hydrologie basierendes Gesamtmodell für eine Landschaft darzustellen sein, mit welchem die Auswirkungen menschlicher Eingriffe in den Wasserhaushalt erkennbar werden und im Voraus abgeschätzt werden können. An Hand der landwirtschaftlichen Nutzung eines Gebietes um den Oberlauf eines Flusses (Headlands) habe ich so etwas in Ansätzen darzustellen versucht¹⁵⁰. Auf dem Weg zur Quantifizierung eines solchen Gesamtmodells führten wir zahlreiche Einzelstudien zu wichtigen hydrologischen Prozessen durch, mit vielen interessanten Ergebnissen. Erst am Ende meiner Karriere steht das Weiherbachprojekt, in welchem wir für eine ganze Landschaft ein Modell des Wasserkreislaufes erstellen konnten, als ein erster Schritt für ein Gesamtmodell.

6.1 Mein Weg zur Hydrologie

6.1.1 Erste Erfahrungen.

Erste hydrologische Erfahrungen konnte ich, zunächst ziemlich zufällig, bereits im Jahr 1957/58 in Stuttgart sammeln, und zwar bald nach unserer

Rückkehr nach meinen Fulbright - Jahren in den USA nach Deutschland im August 1957. Dort musste ich neben der Vorbereitung des Diploms an einem Gutachten über den Wasserbedarf der Region Stuttgart für die Kommunale Arbeitsgemeinschaft Stuttgart mitarbeiten. *Roland Wagner* war der Projektleiter und ich sein Gehilfe. Es war geplant, die vorhandenen Trinkwasserleitung vom Bodensee nach Stuttgart durch eine zweite Leitung zu erweitern, und unsere Aufgabe war es, die Notwendigkeit dieser 2. Leitung nachzuweisen durch Vergleich von Wasserdargebot und Bedarf der Region. Hierfür führte *R. Wagner* in den Gemeinden des Stuttgarter Raumes die Erhebungen für die Abschätzung des Wasserbedarfs durch, während ich die jahreszeitlich wechselnden verfügbaren Wassermengen aus den hydrologischen Grundlagen des Einzugsgebiets um Stuttgart zusammenstellte, wobei ich mich insbesondere mit dem Jahresverlauf der Abflüsse in den Neckarnebenflüssen befasste. Meine Auswertung beruhte allein auf den langjährig geführten Hydrologischen Jahrbüchern, in denen für jedes Jahr Wasserstände und Wassermengen in allen kleineren Flüssen Baden – Württembergs tageweise in Listen zusammengestellt waren. Ich stellte langjährige Wasserdargebotskurven auf, die wir mit den Wassernutzungen verglichen – und feststellten, dass im Großraum Stuttgart eigentlich genug Wasser vorhanden ist, um auf eine zweite Bodenseewasserleitung verzichten zu können! Wie so viele solcher Gutachten hat auch dieses dem politischen Willen nicht entsprochen, und die Leitung wurde gebaut: der Überschuss an Angebot wurde schließlich verwendet, um viele der Städte entlang der Trasse der Leitung mit Wasser zu versorgen – das und die enorme wirtschaftlichen Entwicklung des Stuttgarter Raums hat eher den Politikern in ihrer Einschätzung Recht gegeben, als den „Wissenschaftlern“ (die wir natürlich keineswegs waren). Das war meine frühe Erfahrung mit der Hydrologie.

6.1.2 Stochastische Grundlagen

Auf einem anderen Gebiet, ohne das die moderne Ingenieurhydrologie nicht denkbar ist, habe ich günstigere Voraussetzungen mitgebracht, nämlich auf dem der stochastischen Prozesse, einschließlich der Statistik. Hydrologie und Statistik sind eng verwandte Gebiete, da die Naturgesetze in der Hydrologie durch konzeptuelle Modelle nur angenähert werden können und durch statistischen Methoden ergänzt werden müssen, um statistisch gültige Aussagen – im Gegensatz zu deterministischen Aussagen - zu

erhalten (was uns damals allerdings noch nicht klar war). Heute wissen wir, dass eine wissenschaftlich begründete Bemessungspraxis ohne Statistik gar nicht auskommen kann: es muss etwa für die Vorhersage einer Wassermenge, die für ein bestimmtes Projekt aus dem natürlichen Dargebot zur Verfügung stehen könnte, nicht nur eine festen Zahl (ein Erwartungswert) angegeben werden, sondern auch ein Streubereich innerhalb dessen der tatsächliche Wert liegen könnte.

Anfang der 70-er Jahre kannte die Praxis für die Wasserversorgung eine einfache Antwort zur Berücksichtigung der Variabilität des natürlichen Wasserdargebots: nehmen wir den größten Wert des für die Zukunft zu erwartenden Wasserbedarfs und das kleinste, bei größter Trockenheit je beobachtete Wasserdargebot und sorgen dafür, dass Abflussmengen in den nassen Monaten gespeichert werden, um den maximalen Wasserbedarf in der historisch größten Trockenzeit decken zu können. Das führt natürlich zu erheblichen Investitionen in Speichervolumen, die reduziert werden könnten, wenn man die Versorgung nicht für alle Zeiten sichert, sondern nur für einen großen Prozentsatz der Jahre – z. B. kann man die Möglichkeit zulassen, dass einmal alle 100 Jahre nicht genügend Wasser vorhanden ist, sodass Sparmaßnahmen ergriffen werden müssen. Diese eigentlich logische Betrachtungsweise erfordert statistische Analysen. Die zweite Begegnung mit der Statistik macht der Wasserbauer, wenn er abschätzen soll, wie hoch er etwa einen Deich an einem Fluss oder an der Meeresküste, oder auch die Hochwasserentlastungsanlage einer Staumauer bemessen muss, damit die Bauwerke und die Anlieger sicher sind. Dies erfordert die Schätzung von Extremereignissen, die sehr selten erreicht oder überschritten werden – und auch hier begegnet der Hydrologe der Statistik in der Form der Extremwertstatistik.

Im Jahr 1957 waren statistische Kenntnisse kein Teil des Rüstzeugs deutscher Hydrologen, und viele handgestrickte Methoden existierten, um statistischen Problemen ohne Theorie beizukommen. Immerhin, damals begannen deutsche Wasserbauprofessoren die Bedeutung statistischer Grundlagen und ihrer Anwendung in der Hydrologie zu erkennen. So auch Prof. *Arthur Röhnisch*¹⁵¹, der gehört hatte, dass an der Bundesanstalt für Gewässerkunde mit statistischen Verfahren experimentiert wurde. Diese neuen Ideen sollten auch den Studenten in Stuttgart nahegebracht werden,

und *Röhnisch* wollte eine Vorlesung zum Thema „Statistische Methoden in der Hydrologie“ anbieten. Ich bin meinem späteren Doktorvater *Röhnisch* besonders dankbar, dass er mir im Jahr 1958 die Aufgabe zuwies, ein Vorlesungsmanuskript über statistische Grundlagen der Hydrologie zu erstellen, das die Sekretärin *Bornträger* abtippte. Dadurch erfuhr ich zum ersten Male etwas von Statistik, und ich musste mich in die Grundlagen dieses Gebietes, das sonst einem Bauingenieur eher fremd ist, einarbeiten und an vielen Beispielen ausprobieren. Aber dieser Auftrag hat mir sehr viel gegeben, ich legte eine Grundlage an statistischen Kenntnissen, deren Anwendung mich später beinahe in allen meinen Tätigkeitsfeldern und zunehmend intensiver beschäftigte. Später in Ft. Collins ergänzte ich als zweite Grundlage der Stochastik meine Kenntnisse durch die Theorie der Zeitreihenanalyse, die ich vor allem aus dem Buch von *Y.W. Lee*: „Statistical theory of communications“ (Wiley, 1963) erlernt habe. Von der Turbulenzmessung und Theorie kommend, hatte ich mich intensiv in diese Grundlagen eingearbeitet – und sie in einer Vorlesung bereits in Ft. Collins nicht nur den Strömungsmechanikern, sondern auch den Hydrologen beigebracht und gezeigt, was man mit der Theorie stochastischer Prozesse alles machen kann.

Erst später wurde mir deutlich, dass die Statistik in der Wahrscheinlichkeitslehre eine viel tiefere mathematische Basis hat und nur als Anwendung dieser Theorie für die Güteschätzung statistischer Daten entstanden ist. Und es entstand bei mir der Wunsch, diese Zusammenhänge darzustellen und dahin zu wirken, dass Ingenieure nicht nur die Statistik, sondern auch die Wahrscheinlichkeitslehre wenigstens in den Grundzügen kennenlernen, wenn nicht sogar verstehen sollten. Eine auf die Anwendung im Bauingenieurwesen gerichtete zusammenfassende Darstellung dieser Themen gab es zumindest im deutschen Sprachraum nicht. Daher habe ich gerne im Jahre 1987 die Einladung des Wilhelm Ernst Verlags angenommen, das bereits erwähnte Buch „Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure“ zu schreiben. Nach etlichen Jahren mühsamer Arbeit, die vor allem von einem durch die Japan Society for the Promotion of Science (JPS) geförderten Japanaufenthalt im Jahr 1988 profitierte¹⁵², konnte ich im Jahre 1993 dies Buch vorlegen. Allerdings habe ich darin nicht viel Eigenes, außer der Darstellung und einigen Beispielen aus unserer eigenen Forschungsarbeit, beigetragen. Die ersten Kapitel des Bu-

ches umfassten den Inhalt der von mir viele Jahre lang in Karlsruhe für Bauingenieure gehaltenen Einführungsvorlesung zu statistischen Verfahren. Ich hatte die Fakultät überzeugt, dass eine Statistikvorlesung für alle Bauingenieure heute wichtig ist, und empfahl zusätzlich, dass diese Vorlesung von Bauingenieuren vorgetragen wird, mit Beispielen aus der Praxis und mit einer für Bauingenieure verständlichen einfachen Mathematik. Natürlich erhielt ich sofort den Auftrag, diese Vorlesung auch selbst zu halten, was ich mit wachsendem Vergnügen bis zu meiner Emeritierung tat. Auch heute noch (2016) hält mein früherer Oberingenieur *Jürgen Ihringer* in meiner Nachfolge diese Vorlesung. Auch die Darstellung der Zeitreihenanalyse in dem Buch wurde in vielen Vorlesungsjahren im Rahmen von Sondervorlesungen, erst in den USA und später auch in Deutschland erprobt.

Leider ist dies Buch nicht der vom Verlag erhoffte Erfolg geworden – es war zu umfangreich und dadurch zu teuer, und meinem Vorschlag, das Buch in zwei Bänden herauszugeben, wollte der Verlag nicht folgen: wahrscheinlich hätte sich tatsächlich für einen zweiten Band „Zeitreihenanalyse und stochastische Prozesse“ kein großer Abnehmerkreis gefunden. Jedenfalls wurde das Buch nach einem Jahrzehnt aus dem Handel genommen – statt einer zweiten Auflage. Pech. Aber mir selbst hat das Schreiben des Buches enorm viel gebracht. Es war mir ein echtes intellektuelles Vergnügen, mich mit der Gestaltung der Inhalte zu befassen. Die Kenntnisse der Wahrscheinlichkeitstheorie, die ich mir dabei erarbeitet habe, sind die Grundlage für die Risikobetrachtungen, mit denen ich mich in den 90-er Jahren und später unter dem Einfluss der Internationalen Dekade zur Katastrophenvorbeugung (IDNDR) beschäftigt habe. Diesem Gebiet soll später ein eigenes 8. Kapitel gewidmet werden.

6.2 Hydrologische Arbeiten zum Hochwasserschutz

Schon gleich nach dem ich den Ruf nach Karlsruhe erhalten hatte nahm ich mir vor, die Hydrologie als starken Zweig im Fachgebiet Wasserbau zu verankern. Die Bedeutung der Hydrologie als Grundwissenschaft für den Wasserbau hat mir mein Kollege V.Yevjevich in Ft. Collins klar gemacht, der in seiner langjährigen Praxis die Notwendigkeit erkannt hatte, dass gute hydraulische Bauwerke auf einer guten hydrologischen Grundlage bemessen werden müssen. Unter seiner Leitung entstand in Ft. Collins ein Programm

für die Ausbildung von Hydrologen, das international Schule machte und dessen Absolventen in den Folgejahren die weltweit führende Amerikanische Hydrologie entstehen ließen. Ich sah diese Entwicklung sozusagen vom Rande her, konnte mich sogar durch meine Vorlesungen zum Thema Zeitreihenanalyse daran beteiligen (Yevjevich bestand darauf, dass seine Studenten diese Vorlesung belegten).

Hydrologie ist als Geowissenschaft definiert als Lehre vom Wasserkreislauf und seinen Komponenten in allen Erscheinungsformen, die für alle Regionen der Erde zu beschreiben und zu quantifizieren sind. Für den Bauingenieur ist dies Fach wichtig, aber nicht als naturwissenschaftliches Fach, sondern als Hilfswissenschaft für die wasserbauliche Praxis. Das hieß in den 70-er Jahren des 20. Jahrhunderts: Modelle für wasserwirtschaftliche Aufgaben zu entwickeln. Der Computer begann seinen Siegeslauf durch die Wissenschaften und ermöglichte es, komplexe mathematische Modelle für alle Komponenten des Wasserkreislaufes nicht nur zu programmieren, sondern auch anzuwenden! Unser Beitrag zur Hydrologie sollte in der Aufstellung hydrologischer Modelle bestehen, die zwei Grundforderungen erfüllen: sie sollten einen von uns erkannten Bedarf der wasserbaulichen Praxis decken, und sie sollten orientiert sein an den Eigenheiten des Gebietes, in dem die Untersuchungen gemacht werden. Und hier sahen wir als besonders wichtige hydrologische Aufgabe einen Bedarf an robusten und auf dem Stand des Wissens beruhenden Modellen für den Hochwasserschutz.

Der Beitrag der Hydrologie zum praktischen Hochwasserschutz besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen. Der erste Teil ist die Ermittlung des Bemessungshochwassers: die Vorhersage möglicher Extremereignisse in einer unbestimmten, aber wahrscheinlichen Zukunft. Gefragt ist nach dem Spitzenwert des Extremhochwassers zur Bemessung von Deichen und Anlagen der Schifffahrt –oder nach der Fülle, d.h. dem Gesamtvolumen des Bemessungsabflusses zur Bemessung von Hochwasserrückhaltsspeichern und anderen Rückhaltmaßnahmen. Der zweite Teil ist die Anwendung vorhandener Modelle für die Hochwasservorhersage, d.h. Vorhersage einer in näherer Zukunft zu erwartenden extremen Abflussganglinie.

6.2.1 Extremwertermittlung für das Bemessungshochwasser.

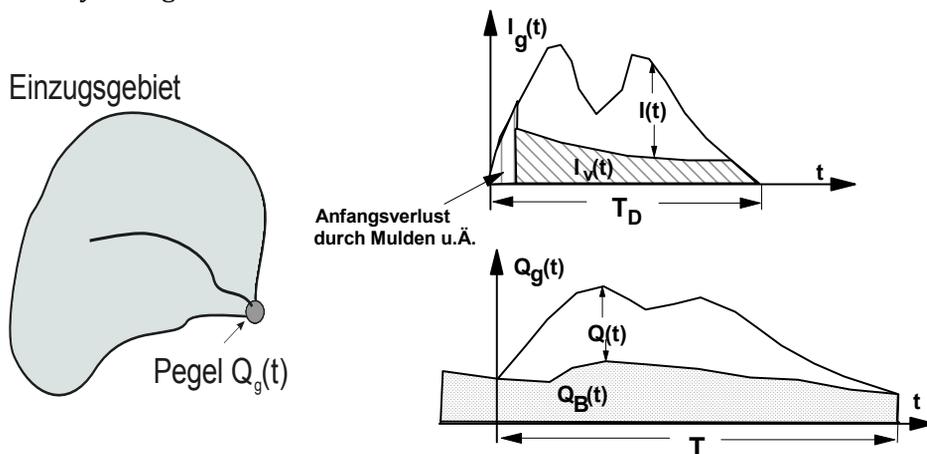
Die Ermittlung des Höchstwertes des Hochwassers, der dann die Höhe der Schutzmaßnahmen, wie z.B. der Deiche, bestimmt, war in den 70-er Jahren die wichtigste Aufgabe der Ingenieurhydrologie und erfolgt zumeist auf rein statistischer Basis. Gesucht wird der einmal in 100 oder so Jahren zu erwartende Spitzenwert. Die Methode hierfür ist die Extremwertstatistik, und diese war der erste Beitrag, den Statistiker zur Hochwasserproblematik beitrugen. Und hier war auch einer meiner ersten Beiträge angesiedelt, den ich schon in meiner Assistentenzeit in Stuttgart zur Hydrologie im Zusammenhang mit dem Manuskript zur Statistikvorlesung machte. Mit Extremwertstatistik kannte ich mich seitdem aus, und die Frage nach der bestgeeigneten Verteilungsfunktion für die Extremwertwahrscheinlichkeit hat mich viel beschäftigt. Meine bevorzugte Verteilung wurde die dreiparametrische Log- Normalverteilung, deren Parameter eine besonders gute Anpassung an gemessene Daten erlauben (siehe hierzu die einschlägigen Kapitel in meinem Buch „Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre“).¹⁵³

Die Hochwasserberechnung mit statistischen Methoden ist zwar methodisch nicht zu kritisieren, trägt aber nichts bei zum physikalischen Verständnis der Prozesse, die zum Hochwasser führen. Hierzu muss der physikalische Vorgang der Umwandlung des Niederschlags in den Abfluss nachgebildet werden, und das Ziel der meisten hydrologischen Arbeiten in aller Welt ist es, diesen Vorgang in die einzelnen beitragenden Teilprozesse zu zerlegen und diese den geographischen und geologischen Gegebenheiten des zu untersuchenden Einzugsgebiets anzupassen.

6.2.2 Niederschlag – Abflussmodelle für den Hochwasserschutz.

Anfang der 70-er Jahre entstand in Baden - Württemberg das Konzept des flächendeckenden Hochwasserschutzes als vordringlichste wasserwirtschaftliche Aufgabe, für das in vom Hochwasser betroffenen Flussgebieten ganze Netze von kleineren Hochwasserrückhaltebecken geplant wurden. Wo immer Platz in den Tälern vorhanden war, um Rückhaltebecken aufzunehmen, wurden sie gebaut. Um die Wirkung dieser Becken abschätzen zu können, mussten die Volumen der ganzen Hochwasserwellen an kritischen Punkten ermittelt werden: Punkten an den Gewässern, die oft an Stellen

lagen, wo es keine oder nur sehr kurze Abflussmessreihen gab – und dafür brauchte man Modelle, mit deren Hilfe man Bemessungsganglinien gewinnt (eine Ganglinie ist die Kurve, die den Abfluss in Abhängigkeit von der Zeit zeigt – siehe die Abbildung weiter unten). Dabei ging es Anfang der 70-er Jahre zunächst darum, für einzelne Becken am Unterlauf eines Baches oder kleinen Flusses die Hochwasserzuflüsse zu ermitteln. Für diese Aufgabe wurde in dieser Zeit von der Landesanstalt für Umwelt ein nicht dem Stand des Wissens entsprechendes Hochwassermodell verwendet (*Bernhard Anderl* schrieb eine umfassende Kritik), wodurch wir uns gefordert sahen, das vorhandene Modell durch ein besseres, wirklichkeitsnäheres zu ersetzen. Der Ansatz für unsere Arbeit der Verbesserung der Hochwassermodelle musste durch das Einbringen physikalisch basierter Verfahren in die Hydrologie kommen.



Zur Definition des Umwandlungsprozesses von Niederschlag in den Abfluss

Die physikalische Grundlage für ein Modell des Hochwassergeschehens ist die Umwandlung des Niederschlags in den Abfluss im fließenden Gewässer, und diesen mussten wir für die Anwendung in Baden – Württemberg quantifizieren. An diesem Problem praktizierten wir den später mehrfach verfolgten Weg: Identifizierung des praktischen Problems, dann zunächst über einen Forschungsantrag Entwicklung des Prototyps eines Modells, exemplarische Anwendung auf einen echten Fall, um damit die verantwortlichen Behörden zu überzeugen und zu veranlassen, unser Modell in die Genehmigungspraxis zu übernehmen. Danach Modellanwendung in behördlichem Auftrag in Gutachten, bis die Modelle von Ingenieurbüros übernom-

men werden, an die wir vorzugsweise in Lehrgängen, aber auch durch unsere früheren Mitarbeiter, unsere Kenntnisse weitergeben. Das bedeutet aber auch, eine vieljährige Überzeugungsarbeit zu leisten! International sind viele schöne Verfahren und gute Modelle nicht über eine Veröffentlichung hinausgekommen und nie zu einer Anwendung gelangt, weil es den Entwicklern der Modelle an der Möglichkeit oder Geduld fehlte, maßgebliche Entscheidungsträger von Vorteilen ihres Modells zu überzeugen.

Es sollen diese Erinnerungen kein Lehrbuch darstellen, doch ist es für das Verständnis unserer Arbeit in der Hydrologie einfacher, wenn ich kurz an Hand der Abbildung erkläre, worum es sich beim Niederschlag – Abflussprozess handelt. Wir betrachten ein kleines Gebiet, im Bild links schematisch dargestellt, auf das es regnet. Der Regen erzeugt einen Abfluss aus diesem Gebiet, gemessen an einem Pegel, (oder gerechnet für einen nur gedachten Pegel). Diese Prozesse finden gleichzeitig, aber an zwei verschiedenen Orten statt. Das ist im Bild rechts illustriert. Es zeigt oben den zeitlichen Verlauf des über die Fläche des Gebiets gemittelten Niederschlags $I_g(t)$ in Abhängigkeit von der Zeit t , und unten den Abfluss $Q_g(t)$ am Pegel in Abhängigkeit von derselben Zeit t . Der Niederschlag $I_g(t)$ beginnt zur Zeit $t = 0$ und endet nach einer Dauer T_D . Dabei bedeutet der Index g , dass es sich um den Gesamtwert handelt. Doch nur der Teil $I(t)$ des Niederschlags kommt zum Abfluss (der „effektive“ Niederschlag), ein großer Teil $I_V(t)$ bleibt im Gebiet und verdunstet oder versickert ins Grundwasser.

Auf den Niederschlag $I(t)$ reagiert das Einzugsgebiet durch einen Abfluss $Q(t)$, der ebenfalls zur Zeit $t = 0$ beginnt, und bis zur Zeit T andauert. Der Gesamtabfluss $Q_g(t)$ besteht jedoch nicht nur aus dem Abfluss $Q(t)$ infolge des Niederschlags, sondern dazu addiert sich der Abfluss aus früheren Niederschlägen, der mit Basisabfluss $Q_B(t)$ bezeichnet wird. Weil der Niederschlag erst einmal vom Gebiet zum Pegel gelangen muss, ist der Abfluss als Reaktion auf den Niederschlag zeitverzögert, und weil er aus allen Punkten des Gebietes kommt, ist auch die Abflussschwelle gestreckt: sodass T immer größer als T_D ist. Die Funktion, die diese Verzögerung und Streckung beschreibt, ist die Transferfunktion des Einzugsgebiets, die Niederschlag und Abfluss verbindet. Diese wird in der Hydrologie Einheitsganglinie genannt.

Für die praktische Berechnung des Niederschlag – Abfluss Prozesses nahmen wir uns zwei Themen vor, nämlich die Bestimmung des Abflussbeiwertes, d.h. des Prozentsatzes $\varphi = (I_g - I_v)/I_g$, des Niederschlags, der zum Abfluss kommt, und die empirische Parametrisierung der Einheitsganglinien für Baden –Württembergische Gebiete. Zunächst musste ein empirischer Baustein für die Berechnung von $I_v(t)$ entwickelt werden, welcher für den Hochwasserfall einsetzbar ist. Wir erhielten hierfür ein brauchbares Modell aus den Untersuchungen von *Bernhard Anderl* - er entwickelte es auf der Basis des sogenannten Koaxial Diagramms zunächst für seine Doktorarbeit von 1975, verfeinerte es später aber noch während seiner beruflichen Tätigkeit. Das Modell wurde dann von *J. Ihringer* in einen leicht zu verwendenden numerischen Algorithmus umgewandelt, der die Basis für das endgültige Modell FGM bildet.

Die zweite Aufgabe war die empirische Parametrisierung der Einheitsganglinie für praktische Zwecke der Wasserwirtschaft in Baden Württemberg. Schon in den frühen Jahren der hydrologischen Forschung wurde versucht, die Einheitsganglinie vereinfacht durch eine lineare Funktion zu beschreiben, aber erst der irische Professor *Jim Dooge*¹⁵⁴ identifizierte die empirische Einheitsganglinie als Transferfunktion eines linearen Systems, und stellte damit einen Zusammenhang her, der es ermöglichte, die mathematischen Operationen der Systemtheorie (bekannt vornehmlich aus Elektrotechnik und Regelungstechnik) auf die Hydrologie anzuwenden. Zusammen mit seinem Kollegen *Ian Nash* zeigte *Dooge* damit den Hydrologen die Bedeutung, die die Theorie linearer Systeme für hydrologische Probleme haben kann, wobei den drei Komponenten Eingangsfunktion, Transferfunktion und Ausgangsfunktion der Systemtheorie in der Systemhydrologie die Komponenten „effektiver Niederschlag“ $I(t)$ – Einheitsganglinie – „Gerinneabfluss“ $Q(t)$ entsprechen.

Weil ich mich ja im Rahmen der Turbulenzmessung (und der Vorbereitung zur Vorlesung Regelungstechnik in Ft. Collins) ausführlich mit der Theorie linearer Systeme befasst hatte, fiel es mir nicht schwer, die Systemhydrologie zu verstehen, zu lehren oder anzuwenden. Die Anwendung der Systemtheorie hatte ich bereits bei der Initiierung des Instituts als wesentliche Aufgabe der Institutsarbeit ins Auge gefasst. Das war auch ein zweiter Grund für die Wahl meines Oberingenieurs *Gert A. Schultz* gewesen: Da-

mals ist unter seiner maßgebenden Beteiligung gerade die Einheitsganglinie in die deutsche Wissenschaft eingeführt worden, und erste Veröffentlichungen zu dieser Theorie erschienen sowohl in der DDR als auch in der Bundesrepublik. Entsprechend lag ein Schwerpunkt der hydrologischen Arbeit des Instituts nach 1970 auf Erstellung verbesserter Hochwassermodelle auf der Grundlage der Einheitsganglinie.

In der Fachliteratur wurde damals vorgeschlagen, die Einheitsganglinientheorie dadurch zu verbessern, dass der Abfluss aufgegliedert wurde in mehrere parallel verlaufende, aus übereinanderliegenden Schichten kommende Komponenten, jeweils mit ihren eigenen Einheitsganglinien: dem sogenannten Trockenwetterabfluss aus dem Grundwasser als unterster Schicht, dem Oberflächenabfluss als Ablauf von der Bodenoberfläche, und dem schnellen Direktabfluss, dem Abfluss aus kleinen Bächen und Gerinnen. Sozusagen als Einstieg in die Materie wurde die Erweiterung dieser Modellvorstellung als unser erstes hydrologisches Forschungsvorhaben bei der DFG beantragt. *Hartmut Wittenberg*, der erste Doktorand des Instituts, untersuchte auf der Basis dieser Theorie, wie sich der Hochwasserabflusses im Ruhrgebiet infolge zunehmender Bebauung verändert hat. Aber anstatt Einheitsganglinien für übereinander liegende Schichten zu verwenden, führte er Einheitsganglinien für Teilgebiete ein: eine für die unbebauten Flächen und eine für die Stadtgebiete, jeweils mit einem eigenen Abflussbeiwert. Mit dem vom Bebauungsgrad abhängigen Aufteilungsparameter, durch den der effektive Gebietsniederschlag auf die beiden Teilflächenarten verteilt wird, war es möglich, auch eine zukünftige Bebauungszunahme zu berücksichtigen. Das von *Wittenberg* in seiner Dissertation von 1974 vorgelegte Modell hat noch heute seine Gültigkeit und war wohl einer der ersten Versuche überhaupt, über die Entwicklung der Einheitsganglinienparameter zukünftige Entwicklungen der Hochwasserabflüsse vorauszuberechnen, oder zumindest grob abzuschätzen. Diese Arbeit legte die Grundlage für eine enge Zusammenarbeit des Instituts mit dem Ruhrverband, einem der großen Wasserversorgungsunternehmen in Nordrhein – Westfalen.

Unsere ersten Arbeiten für die mittelgroßen Gebiete Baden Württembergs zeigten sehr bald, dass für ein ganzes Flussgebiet die Nachbildung des Niederschlag-Abfluss Geschehens durch eine einzige Einheitsganglinie für die

meisten wasserwirtschaftlichen Probleme nicht genau genug ist. Vielmehr müssen in der Regel selbst kleine Einzugsgebiete von 100 bis mehreren 100 km² in noch kleinere Untergebiete zerlegt werden, jedes mit seiner eigenen Einheitsganglinie. Das Abflussgeschehen wird nachgebildet, indem der (zunächst für das Gesamtgebiet als überall gleich angenommene) effektive Niederschlag durch ein System von durch Flussabschnitte verbundene Klein-Einzugsgebiete von wenigen km² hindurchgerechnet wird. Da aber in der Regel solche kleinen Einzugsgebiete nicht mit Pegeln ausgestattet sind, musste ein Modul her, um die Abflussganglinie für diese Teilgebiete zu erstellen. In der Fachliteratur hat sich für solche Gebiete der Begriff der „Representative area“ gebildet. Für das deutsche Mittelgebirge hat *Werner Lutz* empirisch in seiner Dissertation (1984) typische REA ermittelt. Er hat mehrere hundert Hochwasserabläufe aus mehr als 70 verschiedenen solcher kleinen mit Pegeln versehenen Einzugsgebiete aus der ganzen Bundesrepublik zusammengetragen und auf dieser Basis ein einfaches Basismodell für die Einheitsganglinien entwickelt, mit einem Satz von Parametern, die von dem Besiedlungsgrad und dem Prozentsatz an Waldflächen abhängig ist. Eine zum Anschluss von dichtbebauten kanalisierten Stadtgebieten geeignete Zusatzkomponente zu diesem Basismodell lieferte *Joachim Figlus* mit seiner Dissertation (1988). Damit wurde es möglich, über ein Netzwerk von Teilgebieten mit jeweils eigener Einheitsganglinie eine gute Abflussberechnung für größere Flussgebiete aufzustellen.

Die Ergebnisse der *Lutzschen* Untersuchungen¹⁵⁵, zusammen mit dem $I_v(t)$ -Modell von *Anderl*, und unter Berücksichtigung der Netzstruktur, zu deren Entwicklung auch Diskussionen mit *Jürgen Garbrecht* ¹⁵⁶ beitrugen, bildeten dann die Basis für unser Flussgebietsmodell FGM, das durch die Arbeit einer ganzen Generation von Hydrologen, wie *Günther Meon*, *Wolf-Dietrich Beelitz*, *Wolfgang Kron* und vor allem von *Jürgen Ihringer* in eine menügesteuerte anwenderfreundliche Version zusammengefasst wurde. Das Modell FGM bildete (und bildet) die Grundlage für eine große Anzahl unserer Gutachten zur Hochwasserproblematik, die *Jürgen Ihringer* mit großer Professionalität betreute und heute noch betreut und weiter entwickelt. Die untersuchten Flussgebiete gehören zu Donau und Neckar, zu Rhein, Weser und Elbe. Wir benutzten diese Gutachten vor allem als Ausbildungsbasis, durch die viele junge Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen unter der Anleitung von älteren Mitarbeitern ihre praktischen Erfahrungen mit der Hydrologie

gesammelt haben, ehe sie selbständig Forschungsprojekte bearbeiten konnten. Das Modell wurde aber auch in der von *Jürgen Ihringer* entwickelten vorläufig letzten Fassung in mehreren Lehrgängen der Praxis übergeben.

Mir besonders wichtig war noch eine weitere Ergänzung unseres Hochwassersmodells durch ein Modell¹⁵⁷ für die Hochwasserprobleme am Oberrhein. Die Besonderheit des Rheingebiets ist, dass die Rheinebene bis in größere Tiefen aus Sand- und Kiesablagerungen besteht, in welchen sich große Mengen Grundwasser sammeln, die durch die Flussufer mit dem Abfluss in Gewässer verbunden sind und einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zum Gesamtabfluss liefern. Folglich muss das Modell neben dem Abfluss aus dem Niederschlag – Abflussmodell, auch den aus dem Grundwasserzufluss abbilden. Diese Erweiterung des Grundmodells wurde von *Joachim Wald* in Zusammenarbeit mit *Jürgen Ihringer*, und *Wolfgang Kron* entwickelt. (*J. Wald* erhielt für dieses Modell den Preis des Wasserwirtschaftsverbandes Baden-Württemberg). Weitere Mitarbeiter des Instituts, wie *Axel Bronstert* und *Peter Schmitt - Heiderich*, setzten dies Modell bei mehreren Planungsaufgaben im Rheingebiet ein¹⁵⁸. Es wurde zu einer der Grundlagen, auf der *Joachim Wald* sein sehr erfolgreiches Ingenieurbüro aufgebaut hat.

6.2.3 Hochwasservorhersage.

Die Hochwasservorhersage war immer ein zentrales Thema der Institutsarbeit, (obgleich ich es selber wissenschaftlich erst nach meiner Emeritierung intensiv bearbeitet habe: siehe unten, Thema Mekong). Das ist naheliegend, denn das Grundmodell für die Hochwasservorhersage ist das gleiche Modell für die Umwandlung von Niederschlag in Abfluss wie es für die Bemessung verwendet wird. Daher kann das Hochwassersmodell FGM auch als Betriebsmodell für die HW-Vorhersage eingesetzt werden. Der Unterschied liegt in der Bereitstellung der Niederschläge, die bei der Vorhersage vor dem Modelleinsatz vorhergesagt werden müssen. Meteorologische Daten müssen aufgearbeitet werden zu Eingangsgrößen $I_g(t)$ für das lokal gültige (vorzugsweise an lokalen Daten kalibrierte) hydrologische Modell. Üblich ist die Berechnung mit Hilfe des mittleren Gebietsniederschlags, dem gewogenen Mittel der beobachteten Werte an allen Niederschlags - Messstationen des betrachteten Gebietes. Im Laufe der Jahre wurde die

Hochwasservorhersage am IHW auf dieser Basis unter der fachmännischen Leitung von *J.Ihringer* vorangetrieben, und es wurden zahlreiche Projekt-spezifische Vorhersagemodelle entwickelt, u. A. für den Ruhrverband. Die Dissertationen von *H.G. Göppert* (1995) und *Holger Muster* (1996) sind Beiträge zu diesem Thema.

Eine Vorhersage mit einem Niederschlag- Abflussmodell unter Verwendung von gemessenen oder vorhergesagten Niederschlägen als Eingangsgröße hat den Vorteil, dass man die Konzentrationszeit als deterministische Komponente zur Vorhersagezeit dazu gewinnt. Die Konzentrationszeit ist die Zeit, die der Niederschlag braucht, um zum Vorhersagepegel zu gelangen, d.h. liegt die Vorhersagezeit innerhalb der Konzentration, dann ist eine fast deterministische Vorhersage möglich, und Vorhersagefehler entstehen nur durch die Ungenauigkeit in der Messung des Niederschlags und durch die Ungenauigkeit des Modells, das Niederschlag in Abfluss umwandelt. Allerdings lässt die Qualität der Vorhersage sehr schnell nach, wenn der Niederschlag über die Konzentrationszeit hinaus extrapoliert werden muss. Dennoch ist der Weg der Niederschlagvorhersage über meteorologische Wettermodelle der beste Weg, und immer verfeinerte Modelle führen dazu, dass in Ländern wie Deutschland die Niederschlagsvorhersage nicht mehr das kritische Element in der Hochwasservorhersage ist.

Der Deutsche Wetterdienst hat ein Modell entwickelt, mit dem realistische Niederschlagsvorhersagen von Tageswerten in 6-Stunden-intervallen gemacht werden, auf deren Basis Hydrologen und Wasserwirtschaftler Abflüsse vorausberechnen können. So konnten wir in guter Zusammenarbeit mit dem Ruhrverband Wetterdienst-Vorhersagen in ein Hochwassermodell einbauen und damit Hochwasservorhersagen zum Betrieb der Biggetalsperre liefern. *Hans Gerold Göppert* hat hierzu in seiner 1994 vorgelegten Dissertation ein überzeugendes Modell erstellt, das nicht nur gute Vorhersagen für den Speicherbetrieb von Talsperren des Ruhrverbandes liefert, sondern auch zum Beispiel den Beitrag der Schneeschmelze durch neu entwickelte Komponenten abzuschätzen erlaubt.

Für größere Gebiete wird für die Abflussvorhersage aber die räumliche Niederschlagsverteilung eine Rolle spielen, die aus dem üblicherweise weitmaschigen Netz an Messstationen sehr schwer zu ermitteln ist. Dies

wurde von *A.M.Binark* in seiner Dissertation (1979) versucht und an einem Testfall auf die Berechnung von Abflussganglinien angewendet¹⁵⁹. Um genauer verteilte Niederschlagsfelder zu ermitteln, bieten sich RADARmessungen an (allerdings liefern RADARmessungen ein elektrisches Signal des Wasserinhalts innerhalb einer Wolke, das erst noch mit vielen Unsicherheiten umgerechnet werden muss in einen Niederschlag). Das erste im IHW entwickelte Modell für die Vorhersage mit räumlich verteiltem Niederschlag entstand so auf der Basis von RADARmessungen und stammte von *Bernhard Anderl*, der bereits 1975 unter der Leitung von *Gert A. Schultz* mit dieser wichtigen Problematik promovierte. Die Arbeiten in der RADAR-Hydrologie wurden erfolgreich von *Gert A. Schultz* nach seiner Berufung an die Ruhr-Universität Bochum auf den dortigen Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik weitergeführt.

Ein anderer Weg zur Erfassung der räumlichen Verteilung von Niederschlägen ist die Verwendung meteorologischer Wetterkarten. Bereits in den 80er Jahren versuchten wir, die damals regelmäßig vom Wetterdienst im Fernsehen gezeigten Wetterkarten auszuwerten. Die interessante Grundidee, das hydrologische Geschehen an die Wetterlagen zu koppeln, wendete ich auf die Untersuchung der Sturmflutgefährdung der Stadt Hamburg an, das wir auf Anregung durch Prof. *Hans – Werner Partenscky* bearbeiteten. Unter Mitarbeit von *Arnold Schuler* versuchte ich, aus den Isobarenkarten der Wetterlagen, die durch den Deutschen Wetterdienst veröffentlicht werden, den maßgeblichen geostrophischen Wind zu ermitteln und diesen mit dem Elbehochwasser zu korrelieren¹⁶⁰. Diese aufwändige Untersuchung brachen wir allerdings ab, weil die Unsicherheit der empirischen Beziehungen, die wir herstellen konnten, zu groß war. Später wurde diese Thematik aber am Institut weiterverfolgt, hierzu siehe Abschnitt 7.4.2.

Fruchtbarer war der wohl von *Hans Joachim Caspary* stammende Gedanke, die Statistik der vom Deutschen Wetterdienst seit vielen Jahrzehnten analysierten Wetterlagen für Langzeitvorhersagen zu verwenden. Anhand einer Langzeitanalyse dieser Wetterlagen konnten *Hans Joachim Caspary* und *Andras Bárdossy* zeigen, dass die über lange Zeiträume beobachteten Änderungen der Wetterlagenhäufigkeiten als Indikatoren für Klimawandel verwendet werden können¹⁶¹, – eine Idee, die international große Beachtung

und viele Nachfolger fand, und sicherlich den wichtigsten Beitrag aus dem Institut zum Klimawandel darstellt.

6.2.4 Vorhersage für den Mekong.

In den Jahren nach meiner Emeritierung habe ich das Thema Hochwasservorhersage noch einmal aufgegriffen, und zwar als Ergebnis einer Berater-tätigkeit am Mekong in Süd-Ost Asien. Durch meine Kontakte zum Auswärtigen Amt nach meiner prominenten Tätigkeit im Deutschen Nationalkomitee für die UN Internationale Dekade zur Katastrophenvorbeugung wurde ich im Jahre 2001 eingeladen, an einem Workshop zur Formulierung einer regionalen Strategie für Hochwassermanagement im Mekong Flussgebiet in Phnom Penh (Kambodscha) teilzunehmen. Hier ging es darum, mit der seit 1995 neugegründeten Mekong River Commission (MRC) nach dem großen Hochwasser am Mekong im Jahr 2000 ein Programm für ein regionales Hochwassermanagement am unteren Mekong aufzustellen¹⁶².

Um bei der hierbei anfallenden Aufgabe der Beschaffung eines HW Frühwarnsystems zu helfen, entwickelte ich die Idee, einen Workshop zum ausschließlichen Thema Hochwasservorhersage in Phnom Penh abzuhalten, um die MRC mit international bewährten Vorhersagemodellen und ihren Einsatzmöglichkeiten im Mekong Gebiet bekannt zu machen. Die Idee wurde von der MRC unterstützt, erhielt eine großzügige Finanzierung durch das Deutsche Auswärtige Amt, und wir konnten eine ganze Reihe international führender Wissenschaftler und Praktiker überzeugen, an diesem Workshop teilzunehmen. Der Workshop fand vom 27. Februar bis 1. März 2002 statt. Ich habe später alle Vorträge dieses Workshops zusammengestellt und die Empfehlungen der Gruppe in meinem Bericht herausgearbeitet¹⁶³. Der Bericht ist unter dem Namen des technischen Herausgebers dokumentiert.

Um die Experten für ihr Kommen zu entschädigen (und zu motivieren) organisierte ich das Treffen zusammen mit einem in Siem Reap am Tonle Sap beginnenden Fieldtrip. Damit erhielten die Experten die Möglichkeit, einige Tage früher zu kommen und sich das touristische Spektakel der nördlich von Siem Reap gelegenen alten Kambodschanischen Königsstadt Angkor mit der gewaltigen Tempelanlage Angkor Vat zu gönnen, was auch

die meisten taten. Vor allem sollten die Teilnehmer des Workshops einen Eindruck von der Hydrologie des unteren Mekongs bekommen, denn Siem Reap liegt direkt am Tonle Sap, einem riesigen See in der Mitte Kambodschas, der das fruchtbare Mekong Delta vor übermäßigen Überflutungen schützt. Er steht über einen bei der Hauptstadt Phnom Penh abzweigenden separaten Flussarm mit dem Mekong in Verbindung. Bei Hochwasser im Mekong fließt ein Teil des Flutwassers in den See ab, und fließt bei niedrigem Wasserstand im Mekong in diesen zurück: der See wirkt wie ein riesiges Hochwasserausgleichsbecken.

Meine Partner von der MRC waren zu dieser Zeit *Leeven Geerinck*, ein Belgischer Schiffskapitän, der eigentlich für die Seezeichen am Mekong angeheuert hatte, und sein Laotischer Kollege *Thanongdeth Insiengmay*, mit dem ich später einen ersten Bericht über Hochwasservorhersage am Mekong schrieb¹⁶⁴. *Geerinck* entwickelte aus den Empfehlungen der beiden Workshops ein vier Punkte Programm für die Arbeit der Hochwassergruppe der MRC, das allerdings nicht alle unsere Empfehlungen übernahm. Übernommen wurde die Empfehlung, unbedingt ein eigenes Zentrum zur Hochwasserproblematik einzurichten, das Regional Center for Flood Mitigation and Management (RCFMM). Dieser und ein weiterer Vorschlag, nämlich alljährlich ein Flood Forum zum internationalen Erfahrungsaustausch durchzuführen, wurden übernommen, nicht aber unser weiterer Vorschlag, dass alle wichtigen Modellentwicklungen im Zentrum durchgeführt werden sollten.¹⁶⁵ Das Zentrum wurde zwar mit neuem Personal ins Leben gerufen, aber ein neuer Beraterstab bei der MRC löste den alten ab und einigte sich mit Experten der Geberländer auf Consultants: ein Australisches Team wurde beauftragt, die Pegel am Mekong neu einzurichten mit elektronischen Anzeigen, und diese empfahlen ein australisches, einst von *Eric Laurenson*¹⁶⁶ und seinem Team entwickeltes Hochwasservorhersagesystem URBS in Lizenz zu übernehmen und durch Australische Experten anzupassen und zu warten, was auch geschah – vermutlich kannten die Entscheider unsere Empfehlungen außer dem 4 Punkte Programm gar nicht.

Das neue Team, geleitet vom Holländer *Nico Bakker*, der von Hydrologie wenig Ahnung hat, aber ein guter Organisator ist, sollte das 4 Punkte Programm umsetzen. Mehrfach bin ich mit dem Projekt in der Planungsphase

in Berührung gekommen, so z.B. auf Aufforderung des Projektingenieurs *Bun Veasna* als Gutachter für ein Koreanisches Entwicklungsprojekt für die Hochwassersicherung des unteren Mekongs – ein sehr durchdachtes Konzept, das sicherlich eine weitere Bearbeitung verdient hätte. Dann wurde ich im Februar 2006 eingeladen, als Berater ein Konzept zu entwerfen für das HW Vorhersagesystem. Ich entwickelte ein Konzept, das von einer MRC-eigenen Entwicklung eines Vorhersagemodells auf der Grundlage unseres Berichtes ausging – aber weil die Entscheidung durch die Geberländer für das australische Modell URBS damals bereits gefallen war (was ich nicht wusste), wurde das Konzept nicht umgesetzt – zum Bedauern der dortigen Mitarbeiter, die gerne die Modellentwicklung selbst durchgeführt hätten. Um mein Konzept aber doch einer fachkundigen Öffentlichkeit vorzustellen, benutzte ich die Gelegenheit einer Tagung, zu der *Joseph Lee* (Professor für Wasserbau in Hongkong) auch mich nach Hongkong einlud. Er hatte zusammen mit seinen Chinesischen Kollegen beschlossen, eine neue IAHR Zeitschrift für Asien herauszugeben, und die Tagung fand anlässlich der Gründung statt. Später wurde dann mein Vortrag in der neuen Zeitschrift veröffentlicht¹⁶⁷.

Weil mich aber wirklich ärgerte, dass anstatt einer eigenen Modellentwicklung von der MRC viel Geld ausgegeben werden sollte, um ein bestehendes Programm anzupassen – sehr teure Konsultanten, plus Lizenzgebühren etc. – beschloss ich, mein Konzept selber mit Hilfe eines Doktoranden umzusetzen. Ein vom DAAD durch ein Stipendium geförderten pakistanischer Student, *Khurram M. Shahzad*, war bereit, mit diesem Thema zu promovieren. Meine Vorgabe war, ein möglichst einfaches Modell zu entwickeln, dass die vorhandene Datenbasis möglichst vollständig nutzt, aber mit einem Minimum von Parametern auskommt. *Khurram* und ich einigten uns auf die Entwicklung von zwei einfachen Modellen auf der Basis der vorhandenen Daten: Zeitreihen von täglichen Niederschlagshöhen (gemessen an 31 Stationen auf dem ca. 600000 km² großen Gebiet des mittleren Mekong), und Abflussmessungen an 7 Pegeln. Unsere Ergebnisse zeigten, dass die einfachen Modelle in Kombination ebenso gute oder auch manchmal bessere Vorhersagen liefern, als das teure und komplexe Modell, das die MRC von den Australiern erhalten hatten. Wir haben dann im Rahmen meiner Beteiligung an den Mekong Flood Foren versucht, unsere Modelle und Sichtweisen in das Programm der MRC einzubringen, wir gewannen auch Partner,

wie den Hydrologen *Peter Adamson*, die uns unterstützten, aber am Ende blieb nach einer Reihe von Vorträgen bei den MRC Foren nur die Möglichkeit, durch Veröffentlichung in der peer begutachteten Literatur unsere Modelle zu archivieren und auf ein besseres Verständnis bei zukünftigen Generationen von Ingenieuren zu hoffen (!?). Nach *Khurrams* Dissertation (2012) sind die Ergebnisse nach vielen Revisionen endlich im Jahre 2014 veröffentlicht worden¹⁶⁸.

Für mich das interessanteste an diesen Modellen war, dass sie mir die Möglichkeit boten, die Bayessche Theorie so anzuwenden, wie es *Roman Krzysztofowicz*¹⁶⁹ in einer Reihe von Veröffentlichungen vorgeschlagen hatte – und dabei konnte ich mich so mit dieser Theorie auseinandersetzen, dass ich mit großem Vergnügen wesentliche grundsätzliche Erkenntnisse für Vorhersagemodelle daraus ableiten konnte. Anlässlich des 70. Geburtstag von *Ezio Todini* in Bologna im Jahr 2013 stellte ich meine ersten Ergebnisse kurz vor – die sehr stark von *Todini*¹⁷⁰ beeinflusst waren. Mit ihm hatte ich einen Schriftwechsel zu diesem Thema geführt, durch den ich Lust bekam, mich mit dem Thema genauer auseinanderzusetzen. An dieser Problemstellung habe ich bis 2015 gearbeitet und hierzu meinen letzten wissenschaftlichen Aufsatz¹⁷¹ vorgelegt - weniger aus wissenschaftlichem Ehrgeiz, als vor allem um mir selbst zu beweisen, dass ich noch mithalten kann mit meinen jüngeren Kollegen – und weil es mir riesig Spaß gemacht hat, noch einmal eine komplexe Theorie zu verstehen und anzuwenden.

6.3 Hydrologische Gebietsforschung.

Nachdem wir uns in den ersten beiden Jahrzehnten meiner Tätigkeit in Karlsruhe hauptsächlich mit Modellentwicklung für den Hochwasserschutz beschäftigt hatten, brauchte ich eine neue Zielsetzung für die Weiterführung der hydrologischen Arbeiten. Drei wichtige Ansätze erschienen mir zu sein: Untermauerung der Prozessforschung durch Experimente im Feld, Einbindung der Ergebnisse dieser Untersuchungen in Modelle für mittelgroße Einzugsgebiete, und schließlich die Anwendung hydrologischer Modelle auf den Transport von Schadstoffen in und aus Einzugsgebieten.

6.3.1 Der Weg zur experimentellen Hydrologie.

Ab den 80-er Jahren ist die internationale Forschung zur Hydrologie mehr und mehr degeneriert zu prozessorientierten numerische Detailstudien, in

denen mathematische Verfahren der verschiedensten Art mit Hilfe von Großrechnern auf hydrologische Daten angewendet wurden. Geographische Informationssysteme ermöglichten die Zerlegung eines Einzugsgebiets in beliebig definierte Kleingebiete – Gebiete, die von einfachen rechteckigen Zellen bis zu geographisch/ geologisch definierten „response units“ reichen können. Auf jedes von diesen werden die Grundgleichungen des Wasserhaushalts angesetzt und schließlich alle zusammen in geeigneter Weise verknüpft und über das ganze Einzugsgebiet integriert. Der Computer ermöglicht eine fast beliebig große Auflösung, die Berücksichtigung der räumlichen Verteilung von Eingangsgrößen, wie Niederschlag und Verdunstung bieten Anwendungsmöglichkeiten von geostatistischen Verfahren, und eine Vielzahl von Studien entstand, in denen die gleichen Niederschlags- Abflussprozesse mit verschiedenen Kombinationen von Analyseverfahren untersucht wurden. Nach dem häufig verwendeten Bearbeitungsschema: eine neue Methode wird entdeckt, oder weiterentwickelt, die in der Hydrologie anwendbar zu sein scheint, eine Situation wird identifiziert, möglichst mit vorhandenen Daten, auf die die Methode angewendet werden könnte, Bearbeitung im Rahmen einer Dissertation, Veröffentlichung, in der die Ergebnisse verglichen werden mit denen aus anderen Ansätzen. Dabei sind fast immer nur die Eingangsgrößen: Niederschlag und Gebietsparameter vorgegeben und die Modelle werden an Ausgangsgrößen, meistens dem Abfluss, angepasst. Die dazwischenliegenden Prozesse werden mehr oder weniger so angepasst, dass berechnete Abflusswellen optimal mit gemessenen Wellen übereinstimmen. Auch bei unserer hydrologischen Modellentwicklung sind wir zunächst so vorgegangen. Mit dem Modell FGM von *Ihringer* war für mich jedoch diese Art Arbeiten abgeschlossen, und ich wollte nun dem Forschungsprogramm des Instituts eine neue Richtung geben.

6.3.2 Feldversuche zur Prozessklärung.

Bis Ende der 80-er Jahre hatten wir immer nur mit gegebenen Daten numerisch gearbeitet. Aber es war mir klar, dass neue Erkenntnisse zum vertieften Erkennen hydrologischer Prozesse nicht aus mathematischen Modellen, sondern nur aus Beobachtungen in der Natur entstehen konnten. Schon bei den hydrologischen Hochwassermodellen bemühten wir uns, der Geologie der Landschaft intuitiv gerecht zu werden – allerdings nur durch Berücksichtigung großräumiger Geologie in den Abflussbeiwerten. Aber

nun sollte der Schritt getan werden von der numerischen Hydrologie zur experimentellen Hydrologie - weg vom reinen Datenverwerter zum Daten-erzeuger.

Die Gelegenheit hierzu ergab sich durch ein Angebot der Landesanstalt für Umwelt Baden Württemberg, eine Versuchsstation am Saugraben bei Bruchsal zu übernehmen. Sie bestand aus einem Grabenabschnitt von ca. 100 m Länge und 10 m Breite neben dem Graben, und einer an einem Ende des Geländes befindlichen Baracke für die Unterbringung von Geräten und als Zuflucht für das Versuchspersonal. Das Angebot nahm ich gerne an, und als erstes nutzten wir dieses Gelände, um die räumliche Variabilität der Infiltrationsrate zu ermitteln. Theoretische Überlegungen zur Beschreibung der räumlichen Variabilität hydrologischer Parameter hatten schon früher dazu geführt, die Anwendbarkeit geostatistischer Verfahren zu versuchen, und *Wolfgang Lehmann* legte hierzu 1995 seine Dissertation zum Thema "Räumliche Variabilität der Bodenfeuchte in ländlichen Einzugsgebieten" vor, für das *András Bárdossy*¹⁷² das theoretische geostatistische Gerüst lieferte. Aber experimentelle Daten gab es wenig, und so untersuchte *Gerd R. Schiffler* in seiner Dissertation von 1992 an einer langen Reihe von nebeneinander angeordneten Infiltrometern am Saugraben die räumliche Variabilität der Infiltrationsraten. Zu weiteren Untersuchungen in diesem Gebiet ist es nicht gekommen und wir gaben das Gebiet auf: zu meinem Bedauern – gern hätte ich ein dem IHW zugeordnetes Versuchsgelände gehabt, aber es erwies sich, dass dies Gebiet zu weit von der Universität entfernt gelegen war. Aber es ergab sich danach durchaus die Gelegenheit, weitere Prozessversuche durchzuführen, nämlich im Rahmen des Weiherbachprojekts. Das Projekt verdient einen besonderen Abschnitt.

6.3.3 Das Weiherbachprojekt.

In der Umweltforschung wurde in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts immer deutlicher, dass auch landwirtschaftliche Gebiete – und nicht nur Kläranlagen – zur Beeinträchtigung der Wasserqualität in Flüssen und Gewässern wie auch im Grundwasser beitragen. Pestizide und nicht abgebaute Mineraldünger werden durch die Niederschläge ins Grundwasser infiltriert oder von der Bodenoberfläche abgewaschen und in die Vorfluter gespült. Aus der wachsenden Erkenntnis von der Belastung der Umwelt durch Schadstoffe, die über den Wasserkreislauf in die Gewässer ge-

langen können, stellen sich neue Anforderungen an die Hydrologen, die im Einklang mit der hydrologischen Forschung weltweit auch unsere Forschungsprojekte der nächsten Jahre bestimmen: es müssen Modelle entwickelt werden, mit denen sich Schadstoffbelastungen berechnen lassen.

Solche Modelle können beschreibend sein, indem über Bilanzen bestimmte Hypothesen über Schadstofftransport oder Schadstoffwirkung getestet werden. Ein gelungenes Beispiel hierzu hat *Hans Joachim Caspary* in seiner Dissertation von 1990 bearbeitet, in welchem er aus der Interpretation von jahreszeitlichen und längerfristigen Veränderungen des Abflussbeiwertes eine umfangreiche Indizienkette über den Vorgang der Waldschädigung durch sauren Regen ableitete. Hierfür standen ihm die im Oberlauf der Eyach, einem Nebenfluss der Enz, gemachten Untersuchungen der Wasserwirtschaftsverwaltung zur Verfügung.

Wir wollten uns in unserer Forschung jedoch nicht auf Indizien stützen, sondern Gewässergüteprobleme von den Ursachen her untersuchen. Die typische Ausgangssituation ist ein Schadstoffeintrag (Nitrate, Herbizide usw.) an einem Punkt eines Einzugsgebiets. Ziel unserer Untersuchung sollte sein, die durch den Niederschlag bedingte Verlagerung eines solchen Schadstoffs experimentell und im Modell zu verfolgen, d.h. die Prozesskette der Transportvorgänge des Schadstoffes in einem Einzugsgebiet von der Eintragsstelle bis zum Vorfluter nachzubilden. Externe zeitvariable treibende Größen dieser Wirkungskette sind einerseits der raum - zeitlich erfolgende Eintrag des Schadstoffs, und andererseits lokale Klimagrößen wie Niederschlag, Temperatur und Sonneneinstrahlung. Durch den hydrologischen Prozess der Abflussbildung wird der Schadstoff als Schadstoffkonzentration des Abflusses dem unterliegenden Gewässersystem zugeführt und mit den Austrägen aus allen Teileinzugsgebieten vermischt. Die genauere Modellierung dieses Transportvorganges ist eine sehr komplexe Aufgabe und braucht ein genaues Studium aller Teilprozesse der Kette, bei der das Niederschlagswasser in erster Linie als Transportmittel dient. Modelle hierfür haben eine andere Struktur als Hochwassermodelle, es kommt vielmehrdarauf an, den Pfad des Wassers und die Aufenthaltszeiten der Stoffe im Boden zu beschreiben, und zwar nicht nur bei Hochwasserereignissen, sondern auch in den Zeiten zwischen den Regenfällen.

Durch das Projekt von *Gerd R. Schiffler* hatten wir erste Erfahrungen mit der experimentellen Hydrologie gesammelt. Solche Versuche hätte ich gerne weitergeführt, um damit einmal die ganze Prozesskette des Stofftransports für ein kleines Einzugsgebiet mit Hilfe eines mathematischen Modellsystems vollständig abzubilden, wobei jede Modellkomponente durch Experimente in einem echten charakteristischen Gebiet überprüft („validiert“) werden sollte. Die Vision eines Großprojektes Gesamtmodell Stofftransport aus mittelgroßen Einzugsgebieten trug ich Prof. *Eberle*, dem Projektleiter Wasser beim Bundesministerium für Forschung und Technologie vor, der mich ermutigte, beim BMFT ein an der Universität Karlsruhe durchzuführendes Großprojekt zu diesem Thema zu beantragen. Es liegt auf der Hand, dass Hydrologen nur für Teilaspekte eines solchen umfassenden Projektes die geeigneten Fachleute sind. Daher war naheliegend, an dieser Studie auch andere Institute der Universität zu beteiligen, mit genügend Experten für die Bearbeitung der verschiedenen Aspekte der Kette. 15 Institute der Universität Karlsruhe und Versuchsanstalten des Landes Baden- Württemberg wollten zusammenarbeiten, wobei die Koordinierungsaufgabe und die Verwaltung des Projektes unter meiner Leitung beim IHW lagen¹⁷³.

Wir suchten nun in der Nähe von Karlsruhe ein hierfür geeignetes Versuchsgebiet. Unser *W.Buck* schlug auf Grund seiner profunden Ortskenntnisse das Weiherbachgebiet im Kraichgau bei Münzesheim als besonders für eine Detailuntersuchung geeignet vor, und wir folgten seinem Rat, eine Entscheidung, die sich als besonderer Glücksgriff erweisen sollte. Denn einerseits war es bereits im Rahmen der Flurbereinigung gut vermessen und hatte auch einen eigenen Pegel bekommen, andererseits konnte es als reines Lössgebiet charakteristisch für die vielen Lösslandschaften Mitteleuropas mit ähnlicher Struktur gelten, auf die die Ergebnisse aus dem Weiherbachgebiet übertragbar sind.

Für das Großprojekts in diesem Gebiet beantragten wir die Unterstützung des BMFT, und im Jahr 1989 erhielten wir hierfür die nicht unbeträchtlichen Mittel, die später, im Jahr 1992 erweitert wurden durch die Einwerbung des DFG Graduiertenkollegs „Oekologische Wasserwirtschaft“, das von Dr. *Charlotte Kämpf* betreut, bis 2001 bestand. So entstand das „Weiherbachprojekt“. Dass es nach etlichen Zwischentiefs letztendlich ein recht

erfolgreiches und gut dokumentiertes Projekt wurde, verdanken wir in erster Linie der langjährigen Unterstützung durch den Projektträger des BMBF, vertreten durch Prof. *Eberle*, vor allem aber auch dem engagierten Einsatz der nicht direkt am Weiherbachprojekt beteiligten Mitarbeiter des IHWs: *Werner Buck* war beteiligt an der Konzeption für das Verbundvorhaben, mit *Jürgen Loeser* als Koordinator für technische Belange und *Jürgen Ihringer* als fachlicher Berater. Zu diesem Team gehörten auch Sekretärin *Katharina Remmler*, der Techniker *Udo Lächler* und andere.

Das Projekt wurde bearbeitet durch Doktoranden und Hilfskräfte der beteiligten Institute der eigenen und benachbarter Fakultäten, sowie Beteiligung vieler Kollegen der eigenen Fakultät und der einbezogenen Landesanstalt für landwirtschaftliche Forschung Augustenburg. Am IHW wurden das Modell entwickelt, die Meteorologen machten umfangreiche Klimauntersuchungen: Niederschlag, Temperatur, Windverhältnisse, Geodäten arbeiteten an der Datenbasis (allerdings mit wenig Erfolg: am Ende wurde für das Datenmanagement ein kommerziell erhältliches Geographisches Informationssystem „Arc Info“ eingesetzt), Geographen untersuchten lokale Infiltrationsraten, u.A. mit Time Domain Reflectometry (TDR) Feuchtesonden, die der IHW Mitarbeiter *Rolf Becker* weiter entwickelte für Messung des vertikalen Feuchteprofils im Boden, Agrarökologen ermittelten die landwirtschaftlichen Nutzungs- und Stoffeintragsdaten – z.B. Eintrag und Abbau von Pflanzenschutzmitteln, usw.

Als Teilaufgabe im Verbundprojekt hatte das IHW in erster Linie die Modellierung des Wasserpfadades übernommen, mit dem Ziel, ein Modell für den N–A Prozess auf einem Hang zu entwickeln, das an Weiherbachdaten validiert werden konnte. Ein wichtiger erster Baustein hierfür wurde von *Axel Bronstert* (Dissertation 1994) mit dem Modell "HILLFLOW" entwickelt¹⁷⁴, das nicht nur im Weiherbachgebiet Verwendung fand, sondern auch als Teil eines internationalen Programms anderen Forschergruppen zur Verfügung gestellt wurde. Das zunächst auf einem rechtwinkligen Netz beruhende Hangmodell wurde auf ein der Oberflächenkontour angepasstes Koordinatensystem durch *Thomas Maurer* (Dissertation 1997) umgestellt. Das Gesamtabflussmodell CATFLOW, das nach Vorarbeiten von *Axel Bronstert* und anderer von *Thomas Maurer* und *Erwin Zehe* in eine übertragbare Form gebracht wurde, wird heute vielfach eingesetzt als physika-

lich basiertes Modell für den Wasserabfluss von Hängen und dient zur Umrechnung von Niederschlägen in Wasser- und Stofftransport in den Boden und zu Oberflächengewässern.

Von besonderer Bedeutung für die Modellierung des N-A Prozesses ist die standortgerechte Modellierung des Infiltrationsvorgangs, die im Weiherbachgebiet durch *E.Zehe* in Angriff genommen wurde. In seiner Dissertation hatte *Gerd Schiffler* bereits die starke räumliche Verschiedenheit der Infiltrationsraten beobachtet. Er konnte nachweisen, dass bereits auf kleinstem Raume große Unterschiede auftraten, wobei sich zwei wesentlich verschiedene Kollektive von Infiltrationsraten herausstellten: die (langsame und kleinräumige) Infiltration in die Poren des Bodens, und die (schnelle) Infiltration in Makroporen. Die Ursachen dieser auch im Weiherbachgebiet beobachteten Variabilität wurde von *Erwin Zehe* in seiner Dissertation untersucht¹⁷⁵. Durch Einfärbung der Fließwege, die er dann anhand von vertikalen Abgrabungen genau ausmessen konnte, konnte er die wesentliche Rolle, die Regenwürmer bei der Infiltration spielen, nachweisen¹⁷⁶. Sein daraus abgeleiteter Ansatz zur Berücksichtigung der verschiedenartigen Fließvorgänge im Boden ist eine wesentliche Bereicherung für kleinräumige hydrologische Modellierung.

Als letztes Glied der Modellkette, die an Hand des Weiherbachgebiets abgearbeitet wurde, fehlte noch die Verbindung des Grundmodells von *Maurer* mit der Stoffkomponente, die an den Wassertransport angehängt werden musste, - eine Aufgabe, die vor allem durch *Erwin Zehe* (Dissertation 1999) als Teilaufgabe in seiner Dissertation gelöst wurde, der damit das Modell von *Bronstert, Merz* und *Maurer* vervollständigte. An der Stoffdynamik hat in unserem Institut auch *Ilona Bärlund* (Dissertation 1999) mit einem anderen als unserem Transportmodell gearbeitet. Wichtig ist auch der erwähnte Beitrag aus dem Institut für Wasserbau zum Weiherbachprojekt zur Oberflächenerosion von *Kai Gerlinger*. (Dissertation 1999). Trotz mancher Unvollkommenheiten sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen beachtlich, und in zahlreichen Veröffentlichungen beschrieben, vor allem einerseits durch einen von mir und *Erwin Zehe* verfassten umfangreichen, Ergebnis orientierten kurzen Artikel ¹⁷⁷ in englischer Sprache, und dann als Abschluss des Projektes auf Deutsch in einem von uns beiden herausgegebenen Buch¹⁷⁸.

Ich glaube, dass unser Buch einen Meilenstein der Hydrologie von Hängen in Lössgebieten darstellt und einen wirklichen Höhepunkt auch meines Schaffens bedeutet, obwohl es erst 11 Jahre nach meiner Emeritierung fertig wurde. Darüber hinaus entstand ein sehr reiches Datenmaterial, das nicht nur in Karlsruhe auch nach Drucklegung des Buches noch in zahlreichen Dissertationen vertieft ausgewertet wurde. Wissenschaftlich gesehen, sind als Beiträge des Instituts zur theoretischen Hydrologie als Ergebnisse des Projektes vor allem die Erstellung des Grundmodells und seiner Validierung an gemessenen Daten und die Erkenntnisse zur kleinräumigen Variabilität der Infiltration besonders zu erwähnen.

6.3.4 Erfassung von Prozessen bei Skalenübergängen.

Ein bereits erwähnter Vorteil der Weiherbachstudie ist, dass das Weiherbachgebiet zusammengesetzt werden konnte aus homogenen Hängen, die durch das Gewässernetz verknüpft sind und jeweils durch das gleiche Grundmodell beschrieben werden können. Eine solche Homogenität von Geologie, Topographie und Landnutzung der Flächenelemente gibt es in der Natur zwar immer wieder, die Regel sind aber eher Landschaften, die aus verschiedenen Grundelementen zusammengesetzt sind. Diesen Grundelementen entsprechend gibt es je nach der Gebietsgröße und Art ganz verschiedene Modelle, um den im Grunde immer gleichen Umwandlungsprozess von Niederschlag in Abfluss unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse zu modellieren: die Überschwemmung eines Parkplatzes wird mit einem anderen Modell berechnet, als das für den Hochwasserschutz am Unterlauf eines Flusses zu verwendende. Eine wichtige Rolle spielt die Größe des Gebietes: werden diese immer größer, so müssen in die Modellierung Faktoren einbezogen werden, wie z.B. Bebauung, Landnutzungsänderungen usw., die auf der Kleinfläche keine Rolle spielen, während bei immer größeren Einzugsgebieten die Prozesse auf der Elementarfläche (von ca. 1 m^2) nur noch kumulativ wirken und Variabilität zwischen aneinander angrenzenden Elementarflächen über viele Elementarflächen herausgemittelt wird. Eine wichtige Rolle spielt auch die Aufgabenstellung, wie z.B. Hochwasserschutz, bei dem z.B. für mittelgroße Einzugsgebiete Modelle vom Typ des Flussgebietsmodells des Institut zum Einsatz kommen. Die verschiedenartigen Modelle habe ich unter Verwendung der bei uns entwickelten Modelle klassifiziert, und das Ergebnis in einem Artikel

zum Thema zusammengefasst ¹⁷⁹, als Basis für den Vortrag, den ich hielt, als mir die Darcy Medaille der European Geographical Union verliehen wurde¹⁸⁰.

Mich hat bei der Betrachtung solcher skalenabhängigen Modelle immer die Frage interessiert, was denn in den Übergangsbereichen zwischen den Skalen passiert, wo verschiedene Modellbereiche überlappen. Es liegt auf der Hand, dass es sinnlos ist, schon beim Übergang von der Punktmessung zu einer Flächenmessung auf einige m² die Infiltration des Gebietes aus einzelnen Poren zusammzusetzen. Dazu kommt, dass bei Vergrößerung der Fläche auch andere Böden und Bodennutzungen einbezogen werden, sodass sich der für die größere Fläche maßgebliche Mittelwert durchaus vom lokalen Mittelwert unterscheidet – was dazu führt, dass bei immer größeren Flächen ein hydrologischer Teilprozess wie die lokale Infiltrationsrate immer mehr an Bedeutung verliert und z.B. am Ende ab einer kritischen Größe des Gebietes eine neue, räumlich quasi-konstante virtuelle Infiltrationsrate zur Modellierung für größere Flächen erscheint, die sich aus lokalen Messungen nicht ableiten lässt. Die Bedeutung solcher Grenzübergänge zwischen verschiedenen Gebietstypen habe ich in dem erwähnten Vortrag hervorgehoben. Die wissenschaftliche Untersuchung solcher Übergänge wurde uns durch Mitarbeit im DFG Schwerpunkt "Regionalisierung in der Hydrologie" ermöglicht, und *Bruno Merz* (Dissertation 1996) übernahm die Aufgabe, an Hand der Weiherbachdaten eine statistische Untersuchung zum Übergang von der Punktskala zur Skala einiger ha durchzuführen. Er untersuchte auf der Basis seines Modells SAKE diesen Skalenübergang in kleinen Gebieten im Bereich des Weiherbacheinzugsgebiets durch Simulationen, mit Schwerpunkt auf den Übergang von Kleinstgebieten mit vollständig erfassten, statistischen und kleinräumigen bodenphysikalischen Gesetzmäßigkeiten mit vollständig erfasster kleinräumigen bodenphysikalischen Gesetzmäßigkeiten auf die Modellierung von Wasserbilanzen in nächstgrößeren Gebieten ^{181 182}, um festzustellen, von welcher Gebietsgröße an lokal nur durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschreibbare physikalische Variabilitäten, wie z.B die Infiltration in Makroporen, durch Mittelwerte ersetzt werden können.

6.3.5 Niederschlagsgenerierte Flächenerosion.

Seit meiner ersten Beschäftigungen mit der Hydrologie war mir klar, dass auch der Feststofftransport ein wichtiges hydrologisches Thema sein müsse, insbesondere wenn der Feststoff kontaminiert ist, oder aus Fremdstoffen besteht. Denn der Feststoffeintrag von den Flächen wird durch Niederschlag und Abfluss bewirkt, und daher muss die Hydrologie die Modelle für den Feststoffeintrag von erodierenden Flächen in die Vorfluter liefern. Ich hatte an mehreren natürlichen Flüssen gesehen, dass in den Zeiten großer Niederschläge der maßgebliche Feststoffanteil in den Flüssen nicht aus Sohlerosionsmaterial, sondern als Schwebstoff transportiert wurde. Der Schwebstoff aber konnte nur aus Zufuhr von Feststoff durch die Erosion von Landflächen entstehen. Oberflächenerosion durch Niederschlag erzeugt andere Feststoffarten mit meistens feinerer Körnung als die durch Wirkung der Strömung auf Ufer und Sohle des Flussbettes bewirkte Flusserosion.

Daher erschien mir eine Betrachtung des Feststofftransports ohne separate Berücksichtigung des Feststoffanteils, der von Landoberflächen abgewaschen wird, nicht sinnvoll – besonders in Gebieten mit wenig Wald und hoher Bodenerosivität. Allerdings lassen sich die beiden Effekte im Fluss selber kaum ohne schwierige Analysen trennen: sobald die Feststoffe in den Fluss gelangt sind, hängen die wesentlichen Transportprozesse nicht von der Herkunft der Feststoffe, sondern von ihren Korngrößen ab: schwerere Stoffe (größere Körnungen, hauptsächlich durch Flusserosion) werden als Feststoff entlang der Sohle bewegt, feinere Stoffe (hauptsächlich aus Oberflächenerosion) werden durch die Turbulenz des Wassers suspendiert und als Schwebstoff transportiert.

Es liegt nahe, den Prozess der Oberflächenerosion in die den Abfluss bildende Prozesskette einzubringen, um aus dem Niederschlag nicht nur den Abfluss, sondern auch den Feststoffabtrag von Landgebieten zu berechnen. Allerdings habe ich bei meinen ersten Gehversuchen in der Hydrologie doch die Anwendungsmöglichkeit der Systemtheorie überschätzt. Weil ich als ersten Versuch 1971 gleich die Zeitreihen von Abflüssen und Geschiebetransport durch eine Transferfunktion zu verknüpfen versuchte, scheiterte ich ziemlich kläglich, und ich musste erkennen, dass erhebliche Erkenntnisarbeit nötig war, weil aus guten Gründen eine einzige lineare Transferfunk-

tion (wie ich sie einsetzte) nicht ausreicht, um den instationären Geschiebetransport zu modellieren. Vielmehr braucht man ein Modell, das an den Abflussprozess von der Kleinfläche gekoppelt ist. Ein solches Modell entwickelte *Vlassios Hrissanthou* in seiner Dissertation (1987), in welchen er unser Niederschlag –Abflussmodell mit der sogenannten Universal Soil Loss Equation (USLE) verknüpfte (ohne Transferfunktion von Abfluss in Geschiebe), durch die der Feststoffabtrag von jeder der Teilflächen des hydrologischen Modells berechnet wurde. Exemplarisch hat er dieses kombinierte Modell dann auf ein bayerisches Gebiet angewendet¹⁸³. Mit dem von ihm weiter entwickelten Modell hat er später in seiner griechischen Heimat recht brauchbare Berechnungen durchgeführt. Ein detailliertes Erosionsmodell, das statt der USLE ein ziemlich empirisches Erosionsmodell auf der Basis der auf die Oberfläche durch die Abflüsse erzeugten Schubspannung verwendet, hat auch *Kai Gerlinger* (Dissertation 1996) als wichtigen Beitrag zum Weiherbachprojekts entwickelt. Mit ihm zusammen habe ich die wichtigsten Erkenntnisse zum Thema Oberflächenerosion in einem Aufsatz niedergelegt¹⁸⁴ -, der allerdings seinen wesentlichen Gehalt durch die eingearbeiteten schönen Forschungsergebnisse von *Kai Gerlinger* (auch ohne Transferfunktion von Abfluss in Geschiebe) erhalten hat.

Das Thema Feststofftransport als hydrologisches Problem hat mir oft interessante Aufgaben beschert. Vor allem aber brachte mir das Feststoffproblem einen der angenehmsten Kontakte meiner Karriere. Im März 1980 nahm ich am 1. International Symposium on Sedimentation Research (ISRS) in Beijing teil. Damals war in China gerade der Spuk der anti-modernen Dreierbande überwunden und Premierminister Deng öffnete China für den Rest der Welt, um den Weg zur modernen Wirtschaftsmacht China vorzubereiten. Wissenschaftler kehrten aus den Feldern und Bergwerken an ihre Schreibtische zurück, und eine rege Bautätigkeit setzte ein – unter anderen auch im Staudammbau. Da galt es, Erfahrungen der Vergangenheit aufzuarbeiten: vor allem die mit dem von den Russen erbauten Staudamm San Men Chia, der den Gelben Fluss aufstaut, und der innerhalb von wenigen Jahren den größten Teil seines Staauraums durch Feststoffablagerungen verloren hatte. Dies Problem sollte unter allen Umständen bei den geplanten, noch wesentlich größeren Staudämmen – vordringlich dem „Drei Schluchten Damm“ am Yangtse - vermieden werden, und chinesische Wissenschaftler unternahmen gewaltige Forschungsanstrengungen, um bei

neuen Bauwerken solche Probleme zu vermeiden. Dabei sollte auch die Erfahrung internationaler Wissenschaftler herangezogen werden, und hierzu gehörte auch das ISRS, an dem ich teilnahm¹⁸⁵.

Zu meiner Freude traf ich dort *Bing Nan Lin* wieder, der einstmals in Ft. Collins einer meiner Lehrer gewesen war und sich auch noch an mich erinnerte. Aus diesem Treffen entstand ein freundschaftlicher Kontakt, vermittelt durch *Lin's* Schüler *Zhao Yin Wang*¹⁸⁶, der bis zu *Lin's* Tod im Jahre 2013 anhielt und durch die Freundschaft mit *Zhao Yin Wang* weitergeführt wurde. Viele Jahre lang war ich Mitglied des Advisory Boards des in Beijing angesiedelten International Training and Research Centers for Erosion and Sedimentation Research (IRTCES – geführt von einer Gruppe älterer, sehr erfahrener Feststoffexperten, unter Leitung von *Bing Nan Lin*), durch welches die chinesischen Feststoffforscher ihre großen Erfahrungen an andere Länder Asiens weitergeben wollten.

6.3.6 Flächendeckende Modellierung in Baden – Württemberg.

In den letzten Jahren meiner Tätigkeit kam ich zum Schluss, dass das Ziel eines hydrologischen Forschungsprogramms eines Lehrstuhls für Hydrologie sein muss, für seinen Einzugsbereich (in unserem Fall Nordbaden und Nord Württemberg) die Hydrologischen Vorgänge flächendeckend zu identifizieren und nachzubilden, um für jede wasserwirtschaftliche Aufgabe ein den örtlichen geologischen und topographischen Gegebenheiten angepasstes Modell bereitstellen zu können. Unser Modell FGM deckt ungefähr den Hochwasserbereich ab, und für Prozesse in der Landwirtschaft, in Gebieten von der Größenordnung einiger km² war das "Weiherbachprojekt" ein erster wesentlicher Baustein. Seine Grundstruktur ist durch das Modell CAT-FLOW beschrieben. Es war als Hangmodell auf Abflussvorgänge im Hügel-land des Kraichgau ausgerichtet. Ergebnisse von diesem Gebiet können daher ohne Schwierigkeiten übertragen werden auf andere Lössgebiete. Auf andere Arten von Gebieten, z.B. auf die Verhältnisse in der Rheinebene, kann das Weiherbachmodell aber nicht ohne weiteres angewendet werden.

Um uns auch mit der Hydrologie im Flachland der Rheinebene vertraut zu machen, wurde im Rahmen des "Regio-Klima-Projektes" (REKLIP) eine kleinere Feldstudie durchgeführt, mit *Markus Disse* (Dissertation 1995) als Sachbearbeiter. Es gelang ihm, mit Hilfe einer kleinen Arbeitsgruppe von

Hilfsassistenten, eine überzeugende Wasserbilanz für dieses Gebiet aufzustellen. Auch dieses Gebiet ist wie das Weiherbachgebiet vergleichsweise homogen, Ergebnisse also auf andere Orte in der Rheinebene übertragbar. Anders die Situation im Schwarzwald, wo in den Randzonen geologisch und topographisch sehr vielschichtige Landschaften zusammenwirken. Als erster Einblick in solche Verhältnisse wurde hierzu das bereits von *Caspari* untersuchte Gebiet am Oberlauf der Eyach, am Nordrand des Schwarzwaldes von *Marcus Casper* (Dissertation 2002) bearbeitet¹⁸⁷. Hier ging es weniger darum ein Modell aufzustellen, als die hydrologischen Teilprozesse von vielen verschiedenen geologischen Formationen und abflussbildenden Flächen zu identifizieren und voneinander zu trennen, um aus dem Zusammenwirken der Abflussprozesse dieser verschiedenen Landschaften zu einem Gesamtbild für den Abfluss zu kommen. Diese Art der Untersuchungen hat *Marcus Casper* als Professor an der Universität Trier sehr erfolgreich weitergeführt.

KAPITEL 7. WASSERWIRTSCHAFTLICHE ANWENDUNGEN DER HYDROLOGIE

Bis hierher habe ich nur den Niederschlags- Abfluss Prozess der Hydrologie von Landflächen beschrieben, aber es war naheliegend, auch die Bewirtschaftung der Abflüsse in den Gewässern als eine Ingenieuraufgabe für den Ingenieurhydrologen zu sehen, und hierbei spielt die Wasserspeicherung eine maßgebliche zusätzliche Rolle. Die Infiltration bewirkt eine solche Speicherung im Gebiet, aber von ebenso großer Bedeutung ist die Speicherung des Gewässers in Seen oder künstlichen Wasserspeichern. Der Unterschied zur N-A Hydrologie ist, dass hier das Volumen des Zuflusses eine wichtige Rolle spielt, während bei Hochwasserdeichen und ähnlichen Bauwerken nur der Wasserstand von Bedeutung ist. Es war daher von vorneherein das Ziel unserer Arbeit, auch Probleme der Speicherung in die Institutsarbeit einzubeziehen.

Das oben erwähnte Betriebsmodell von *Goeppert* für die Biggetalsperre ist ein Beispiel einer Anwendung hydrologischer Modelle auf einen Speicherbetrieb. Solche Aufgaben hatten *Gert Schultz* und ich als Schwerpunkt einer Forschung zur Hochwasserbewältigung bereits 1970 vor Augen. Damals hatten die Operations-Research-(OR)Verfahren gerade Eingang in die Wasserwirtschaft gefunden. Allgemeines Ziel war die Anwendung von OR-Methoden zur Schaffung besserer Grundlagen für die Bemessung wasserwirtschaftlicher Systeme. Als wichtigen Aufgabenbereich wurde das Thema des optimalen Einsatzes von Wasserspeichern von kleinen Behältern bis zu Rückhaltebecken und Talsperre erkannt. Die wichtigste Anwendung war der Einsatz von Speichern im Langzeitbetrieb, so für Wasserversorgung oder Bewässerung. Als Basis für die Bearbeitung solcher Probleme stellte *Gert Schultz* in seiner Habilitationsschrift von 1972 den Kenntnisstand über Speicherplanung zusammen, auf dessen Grundlage das Thema Speicherplanung in vielfältiger Form in der Arbeit des Instituts eingebracht wurde. Als methodische Grundlage hierfür sollten OR Verfahren dienen, und hierzu entwickelte ich bereits 1971 zusammen mit Prof. *Hermann H. Hahn* eine Vorlesung „Operations Research“, als ersten Teil des neuen Lehrangebots des Instituts, die in den Lehrplan der Fakultät verbindlich für alle Bauingenieure eingeführt wurde. Für diese Vorlesung musste ich mich zum „Instant Expert“ entwickeln, aber die Beschäftigung mit dieser Vorlesung mit ihrem

Nachdruck auf Optimierungsverfahren hat sich sehr für mich gelohnt – ich habe viel gelernt, und konnte daraus einige Beiträge zum hydrologischen Forschungsprogramm des Instituts ableiten. Allerdings muss zusammenfassend zu unserem Engagement in OR Methoden gesagt werden, dass wir zwar sehr interessante Ergebnisse mit mathematischen Optimierungsverfahren erzielt haben, dass sich aber von allen möglichen OR Modellen nur die Simulationstechnik auf der Basis von Langzeitsimulationsmodellen wirklich bewährt hat.

Zur Bewusstseinsbildung der Mitarbeiter für OR Fragen haben auch die Besuche von *Lucien Duckstein* beigetragen. *Lucien*, mein alter Freund aus den Studienjahren in Ft. Collins, war Professor of Systems Engineering an der University of Arizona, und ein international anerkannter Wissenschaftler auf dem Gebiet des OR. Er war ein häufiger und gern gesehener Gast am IHW und hat viele Mitarbeiter motiviert, OR Verfahren in ihre Arbeiten einzubeziehen – teilweise auch außerhalb des Institutsprogramms. Wir alle haben immer wieder von seinen regelmäßig fast jedes Jahr stattfindenden Besuchen profitiert (weiter hierzu siehe Abschnitt 8.2).

7.1 Wasserwirtschaftliche Grundlagen

7.1.1 Modelle für Langzeitsimulationen

Die Modellierung des Speicherbetriebs war der Grund, warum wir uns von Anfang an in Karlsruhe mit hydrologischen Simulationsverfahren auseinandersetzten. Das klassische Beispiel hierfür ist natürlich der Speicher in der Form von kleinen oder großen Hochwasserrückhaltebecken oder Talsperren. Dabei wird der aktuelle Speicherbetrieb virtuell nachgebildet, in dem der Speicher durch eine beobachtete oder künstliche langjährige Datenreihe des Zuflusses gefüllt, und nach einer vorgegebenen Betriebsregel für die Auslässe des Speichers entleert wird. Durch solche Rechnungen kann man Auftraggeber am ehesten von einem Vorschlag zur Verbesserung der Betriebsregelungen von Speichern überzeugen, wenn der Betrieb sozusagen in virtueller Zeit und im Zeitraffermodus demonstriert wird. Aber auch die Auswirkungen örtlicher Maßnahmen des Flussbaus können mit Hilfe von Langzeitsimulationen bemessen werden –einschließlich der

Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit, die ein modernes Maß für die Sicherheit eines Bauwerks ist (siehe hierzu 8.1.2).

Von uns verbesserte Simulationsmodelle kommen heute in verschiedenen Modifikationen zum Einsatz, aufbauend auf dem bekannten Fiering-Modell. Solche Modelle extrapolieren die bis zum Beobachtungszeitraum vorhandenen Abflüsse in die Zukunft unter Verwendung von Übergangswahrscheinlichkeiten. Sie haben sich bewährt für Vorhersagen von Mittelwerten über längeren Zeitabschnitten, z.B. von Monatsmittelwerten. Wir haben solche Modelle bereits seit den 70-er Jahren in abgewandelter Form mehrfach eingesetzt. Allerdings sind Modelle vom Typ des Fiering Modells für kleinere Speicher nicht gut brauchbar, da sie Monatsmittel generieren und kleine Speicher oft nur ein Fassungsvermögen von einem Bruchteil der Monatsmittel haben. Ein Versuch, dieselbe Modellstruktur auf kürzere Zeitintervalle anzuwenden, trifft auf das Problem, dass bei immer kleineren Zeitintervallen statt Monaten der Aufwand der Modellierung immer größer wird. Daher versuchten wir, das Fiering Modell um ein Kurzzeitmodul zu erweitern, das immer dann, wenn bei der Simulation auf der Basis von Monatsmitteln ein Speicher über eine kritische Grenze gefüllt zu werden, oder leerzulaufen drohte, dazu geschaltet wurde. Ein solches Modul wurde von *Hans Joachim Meier* in seiner Dissertation von 1987 entwickelt. Auch auf anderen Gebieten haben wir Simulationsmodelle dieser Art mit gutem Erfolg einsetzen können, so z.B. in den 90-er Jahren in einem Projekt zur Entwicklung eines Modells für den Betrieb des Elbe-Havel-Kanals im Auftrag der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Ost in Kooperation mit der Bundesanstalt für Wasserbau.

Ein Sonderfall ist die Generierung von künstlichen Zuflüssen in Gebieten, wo Niederschläge nur selten auftreten (ich werde auf ein solches Gebiet weiter unten eingehen). Für ein solches Gebiet haben wir ein stochastisches Langzeitmodell entwickelt¹⁸⁸, mit einem dreistufigen Generierungsprozess: Erstellung eines Generierungsmodells für die Folge von Tagen mit und Tagen ohne Niederschläge, dann Entwicklung eines Generierungsmodell für die Größe der Niederschläge, und zum dritten ein Generierungsmodell für den täglichen Basisabfluss.

Einen ganz neuen Weg für die Langzeitmodellierung, und zwar zur Simulation von Tageswerten der Abflüsse, ging *Bertold Treiber* in seiner Dissertation von 1975¹⁸⁹. Sein Modell, das auch an anderen Instituten mehrfach für Forschungszwecke verwendet wurde, ist in besonderem Maße geeignet, sehr realitätsnahe Abflussganglinien zu erzeugen. Es beruht auf der Tatsache, dass mit dem Beginn eines Niederschlages der Abfluss ansteigt. Wenn also umgekehrt ein Anstieg in der Abflussganglinie zu beobachten ist, dann kann auch auf einen Niederschlag geschlossen werden. Vereinfachend stellte sich *Treiber* vor, dass dieser Niederschlag über einen Tag gleichmäßig verteilt sei (als Tagespulse), und dass die Umwandlung des Niederschlages in einen Abfluss über eine lineare Systemfunktion (d.h. durch eine Funktion wie die Einheitsganglinie) entsteht. Mit diesen Annahmen kann man *allein aus dem Abfluss* über eine Autokorrelation die Systemfunktion ermitteln (nach einem bekannten mathematischen Theorem der Zeitreihenanalyse), und mit dieser Funktion dann in einem zweiten Rechengang aus den ursprünglichen Abflussdaten auch die Höhe dieser Tagespulse bestimmen. Weitere Entwicklung dieses Modells bestehen darin, diese Tagespulse, die ja reine Rechengrößen sind, mit dem Niederschlag zu korrelieren, oder realistischere Eingangspulse zu verwenden, die sich über mehrere Tage erstrecken - die Dissertation von *Albrecht Pfaud* von 1982 war ein solcher Versuch, angewendet auf einen großen Fluss, und verbunden mit der Berechnung von Zeitreihen transportierter Schadstoffe.

Eine wichtige Weiterentwicklung des Modells von *Treiber* ist die gleichzeitige Anwendung auf zwei (oder mehr) verschiedene Flüsse durch *Wolfgang Kron*¹⁹⁰. Dies interessante Modell geht von gleichzeitigem Auftreten von Niederschlagstageswerten in den Flussgebieten der beiden Flüsse aus, die dann jeweils zum kombinierten Abfluss in den beiden Flüssen führt. Die Abflüsse sind dann nicht mehr direkt korreliert. Damit kann z.B. das Zusammenwirken von Schadstoffen oder Feststofftransport aus zwei Flüssen modelliert werden. Und noch in der letzten von mir betreuten Dissertation von *Martin Helms* (2015) war die Modellierung des Abflusses in der Elbe zwischen Dresden und Aken das Ausgangsmodell am *Treiber* Modell orientiert.

Langzeitmodelle sind besonders geeignet, um die Langzeitwirkungen von sich mit der Zeit verändernder (instationären) Eingangsgrößen vorherzu-

sagen – z.B. für die Abschätzung des Einflusses von allmählich eintretenden Klimaänderungen. Eine erste Untersuchung mit solchen instationären Zeitreihen führte ich bereits in den 70-er Jahren durch, um die Ursachen für die mögliche Veränderung der Sturmfluthäufigkeit in der Stadt Hamburg zu klären und die Ursachen für die erhöhten Sturmflutschäden im Hamburger Hafen aufzuspüren. Ich griff diese Aufgabe mit großem Vergnügen auf, gab sie mir doch die Gelegenheit, einmal so richtig nicht ganz einfache statistische Verfahren anwenden zu können – mit einem direkten Nutzen! Es ist bekannt, dass weltweit der Meeresspiegel um ca. 16 cm/Jahrhundert ansteigt. Das ist der Langzeittrend. Eine detaillierte statistische Analyse der Sturmflutwellen zeigte, dass bis Ende der 70-er Jahre in Cuxhaven keine Zunahme von maximalen Sturmfluthöhen über den Langzeittrend hinaus zu erkennen war, aber doch die Sturmfluthöhe in Hamburg wahrscheinlich (wenn auch nicht statistisch signifikant) zugenommen hat. Letzteres wurde durch spätere Analysen allein der Extremsturmfluten voll bestätigt und wir konnten zeigen, dass die seit 1950 beobachtete Zunahme der Sturmfluthöhen in Hamburg durch Veränderung im Unterlauf der Elbe bewirkt wurden und zunächst nicht durch eine ansonsten vermutete Klimaänderung. Die zusammen mit *Jürgen Ihringer* entstandenen Arbeiten zur Sturmflutstatistik wurden zwar im Wesentlichen bereits in den 80-er Jahren zum Abschluss gebracht¹⁹¹. Ich hielt dieses Thema aber für so wichtig und unseren Beitrag für so interessant, dass ich ihn mehrmals – allerdings stets vor neueren Zuhörerschaften - vorgetragen habe. Der Vortrag wurde dann jeweils an die neueste Datenlage angepasst und mit Ergänzungen versehen. So trug ich z.B. die wichtigsten Ergebnisse im Jahr 1993 beim NATO Advanced Study Institute in Deauville in einem zusammenfassenden Artikel¹⁹² vor, in welchem ich den Einfluss eines durch den Klimawandel erhöhten Wasserstandes berücksichtigte. Zum letzten Male benutzte ich das Modell in einer erweiterten Form unter Einschluss von Risikobetrachtungen in Rio 1995 als Beitrag zu einer Konferenz von Küsteningenieurern, zu der ich auf Veranlassung von Prof. *Zimmermann* aus Hannover eingeladen wurde¹⁹³.

7.1.2 Langzeitmodelle für Feststoffprobleme.

Weitere wichtige Anwendungen der Langzeitsimulation ergeben sich durch die Verknüpfung hydrologischer Modelle mit Modulen für den Feststofftransport. In Flüssen besteht der Feststoff aus Geschiebe: Sand oder

Kies mit größeren Körnern, der sich im Wesentlichen an der Flusssohle bewegt, und aus Schwebstoff, der durch Abspülen von Feststoffen durch den Regen von den Landflächen entsteht und in der Regel aus sehr feinen Körnern besteht und daher durch die Turbulenz des Wassers als Schwebstoff fein verteilt über den Fließquerschnitt transportiert wird. In der Praxis ist die Messung des grobkörnigen Feststoffes recht schwierig, da er sehr ungleich über der Sohle verteilt ist. Der Schwebstoff ist dagegen in der Regel recht gleichförmig über den ganzen Flussquerschnitt verteilt, und so genügt eine Messung in an einem Punkt, um zusammen mit einer Messung des Durchflusses ungefähr auf die Gesamtmenge an Schwebstoff zu schließen. Daher wird in praktischen Fällen an natürlichen Flüssen mit großen Feststofftransportraten meistens der Gesamttransport näherungsweise aus der Menge des in Suspension befindlichen feinen Schwebstoffs berechnet und einfach um 10 bis 20 % erhöht, um auch die auf der Flusssohle entlang treibende Geschiebemenge mit zu erfassen. Für jeden Flussquerschnitt wird eine empirische Feststofftransportkurve aufgestellt, in dem gleichzeitig gemessene Schwebstoffmengen und Durchflüsse gegeneinander aufgetragen werden. Diese Methode wurde z.B. von *Ihringer* für ein Speicherverlandungsmodell verwendet, bei welchem ein einfaches Generierungsmodell für Abflüsse mit einer solchen Kurve verknüpft wurde. Auf dieser Basis berechneten wir auch die Feststoffzufuhr für geplante Staubecken in der Tihama (siehe weiter unten in Abschnitt 8.2.2).

Ähnlich benutzte *Wolfgang Kron*¹⁹⁴ solche empirischen Kurven in seiner Dissertation von 1996, um das Zusammenwirken der Feststoffzufuhren von Isar und Donau auf die Donausohle im Mündungsbereich der Isar in die Donau zu untersuchen¹⁹⁵. Dabei verwandte er die in 7.4.1 beschriebene elegante Abflussgenerierungsmethode von *Treiber* zur Berechnung der Durchflusswassermenge als Eingang für das empirische Verfahren. Die Ergebnisse wurden in Modellen für den Feststofftransport verwendet, um z.B. die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von flussbaulichen Versagensfällen, etwa infolge Untergrabung einer Stützmauer, zu berechnen. Der als Anwendung betrachtete Vorgang der Erosion der Donau (durch Donauhochwasser) und Deposition (von Geschiebe durch die Isar) zwischen Straubing und Vilshofen¹⁹⁶ zeigte in besonders eindrucksvoller Weise die Güte des (etwas modifizierten) Modells, das durch seine Realitätsnähe dar-

über hinaus auch gegenüber klassischen Marcov Modellen den Vorteil der physikalischen Interpretierbarkeit hat.

Das von *W. Kron* behandelte Problem brachte die Frage auf, wie denn der Feststofftransport instationär behandelt werden muss: hierzu hatte *Zhao Yin Wang* gewisse Vorstellungen entwickelt, und auch ich sah die Notwendigkeit¹⁹⁷, die zeitliche Veränderung von Feststoffmengen bei Langzeitsimulation zu berücksichtigen. Angeregt durch *W.Kron* und *Z.Y. Wang* wurde in Zusammenarbeit mit dem IRTCES ein experimentelles Programm zum instationären Feststofftransport konzipiert, und im Jahre 1993 beantragte ich beim Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) die Einrichtung einer kleinen Deutsch - Chinesischen Arbeitsgruppe: GESINUS, (German Chinese Workgroup on Unsteady Sediment Transport). Das Projekt wurde im Rahmen eines Förderungsprogramm des BMFT zur deutsch-chinesischen Zusammenarbeit bewilligt, und hat inzwischen seit mehr als 20 Jahre einen Austausch von deutschen und chinesischen Feststoffforschern ermöglicht. Dank des Engagements von *Wolfgang Kron* konnte als erstes zu diesem Thema ein deutsch-chinesischer Workshop durchgeführt werden, der nicht nur deutschen Wissenschaftlern die umfangreichen chinesischen Kenntnisse über den Feststofftransport näherbrachte, sondern der auch zu einem Erfahrungsaustausch der deutschen Feststoffforscher untereinander führte, die sich seitdem regelmäßig treffen. Im Jahr 2013 konnten wir die 20.GESINUS -Jahresfeier begehen, bei der ich in einem kleinen Festvortrag über deutsch - chinesische gemeinsame Feststoffforschung daran erinnerte, dass diese bereits in den 30-er Jahren des 20. Jahrhunderts ihren Anfang fand, als der Dresdner Wasserbauprofessor *Hubert Engels*, der Begründer der experimentellen Flussbauforschung, Feststoffversuchen für den Gelben Fluss durchführte.

7.1.3 Langzeitmodelle für Niederschläge.

Ein logischer Ansatz für die Langzeitmodellierung von Abflüssen besteht in der Anwendung von N-A Modellen mit unveränderten Systemparametern, aber mit einer Zeitreihe von Niederschlägen als Eingang. Im einfachsten Fall kann man von einer gleichförmigen Überregnung eines Gebietes ausgehen, wofür man nur eindimensionale Zeitreihen der Niederschläge braucht. Am einfachsten ist hierfür die Verwendung von historischen Zeit-

reihen, die an Niederschlagsmessstationen gemessen werden. Ergänzt werden müssen diese Reihen jedoch in vielen Fällen durch künstlich generierte Zeitreihen, die für die statistische Auswertung von Abflussensembles gebraucht werden. Je nach Bedarf müssen Tages- oder Stundenwerte des Niederschlags für ein vorgegebenes Gebiet generiert oder gemessen werden, wie es oben bereits kurz für das Modell von *Treiber* (1977) beschrieben wurde. Ein erstes solches Modell legte *A.M. Binark* in seiner Dissertation (1979) vor. Mit diesem lassen sich eindimensionale Zeitreihen von Regenfeldern erzeugen, allerdings nur bei über alle Flächen gleichen Niederschlägen.

Diese Annahme gleicher Niederschläge auf der ganzen betrachteten Fläche ist zwar für mittelgroße Gebiete durchaus ausreichend und gerechtfertigt, aber für eine detailliertere Untersuchung des Niederschlags-Abfluss Geschehens in großen Flussgebieten (oder in Stadtgebieten) reicht diese Annahme nicht aus. In großen Gebieten muss auch die räumliche Verteilung des gleichzeitig auftretenden Niederschlages berücksichtigt werden. Bereits *Binark* versuchte daher, durch einfache Korrelationen der Messwerte zwischen benachbarten Niederschlagsmessstationen, die räumlichen Unterschiede zu erfassen. Das Modell wird jedoch sehr schnell zu kompliziert und erfordert unverhältnismäßig viel Parameter, d.h. man braucht sehr lange Messreihen, um stabile Parameterschätzungen zu erhalten.

In späteren Jahren griffen wir das Thema wieder auf und eine Generierung von raum-zeitlich variablen Niederschlagsfeldern wurde in das Forschungsprogramm des Instituts aufgenommen. Es war mir klar, dass reine stochastische Modelle nicht ausreichen würden, um Fortschritte zu machen. Vielmehr musste die physikalische Struktur der Niederschlagsfelder berücksichtigt werden. Als Basis für die zukünftige Arbeit fertigte ich eine umfassende Zusammenstellung möglicher eindimensionaler Strukturmodelle an, die ich im Jahre 1985 als „invited lecture“ in einer Hydrologenkonferenz in Ft. Collins vorstellte (die bereits in Abschnitt 3.1 erwähnte Arbeit *Plate*, 1986). Danach sollte das Gesamtmodell aus zwei Teilmodellen bestehen. Das erste Modell soll einerseits berücksichtigen, dass der Niederschlagsprozess intermittierend ist, andererseits aber auch, dass die innerhalb einer Regenperiode fallende Niederschlagsmenge nicht gleichmäßig fällt, sondern aus Regenzellen, die über das Gebiet ziehen, was nach einer

Strukturanalyse der Regenperioden durch geeignete stochastische Modelle vom Typ des Neymann - Scott Modelles beschrieben und parametrisiert werden muss. Das zweite Teilmodell ist wesentlich einfacher. Mit ihm wird die Niederschlagsmenge ermittelt, die in einem bestimmten Zeitraum fällt, wofür typische eindimensionale Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen angewendet werden können. Um diese Modellvorstellung umzusetzen, stellte ich einen Forschungsantrag bei der DFG, der auch genehmigt wurde, und ich konnte *Andras Bárdossy* für die Durchführung des Projektes gewinnen. Er legte zu diesem Thema im Jahre 1994 seine (2.) Dissertation vor. Sein Vorhersagemodell¹⁹⁸ der Niederschläge besteht aus einem statistischen Tageswertmodell, das gekoppelt ist an die vom Deutschen Wetterdienst klassifizierten Wetterlagen, durch die eine wesentlich engere Korrelation zwischen der raum-zeitlichen Struktur von Niederschlagsfeldern aufeinanderfolgender Tage erreicht werden konnte als durch einfache Regressions- oder Markovmodelle. Das Modell von *Bárdossy* wurde von *Holger Muster* auf kürzere Zeiträume angewendet.

Der Gedanke, die Wetterlagen des Deutschen Wetterdienstes für Langzeitvorhersagen zu verwenden, führte zu dem sicherlich wichtigsten Beitrag aus dem Institut zum Klimawandel. Indem sie eine Langzeitanalyse der Wetterlagen durchführten, konnten *Hans Joachim Caspary* und *Andras Bárdossy* die Statistik der vom Deutschen Wetterdienst seit vielen Jahrzehnten analysierten Wetterlagen auf Veränderungen der Wetterlagenhäufigkeit als Indikatoren für Klimawandel verwenden¹⁹⁹, – eine Idee, die international große Beachtung und viele Nachfolger fand.

7.2 Speicherplanung

Ein wichtiges Grundelement der Wasserwirtschaft ist der Speicher, in seinen verschiedenen Formen: als Wasserbehälter (wie z.B. Wassertürme), als Speicherbecken für die Wasserversorgung, als Rückhaltebecken für den Hochwasserschutz, oder als Talsperren mit ihren mannigfaltigen Aufgaben. Für all diese Speicherarten gilt, dass die Abgabe von Wasser aus ihnen durch ein Auslassbauwerk dem Zwecke des Speichers entsprechend kontrolliert werden muss. Es ist das Ziel der Speicherplanung, einerseits die Speicher und die Auslassorgane der Größe nach zu bemessen, und andererseits die Betriebsregeln für die Wasserabgabe aus dem Speicher aufzustellen. Dabei ist die Beckengröße bei Speicherbecken und Talsperren in

der Regel durch die Topographie des Gebietes vorgegeben, sodass die Festlegung der Betriebsregel die wichtigste Aufgabe der Speicherplanung ist. Das Thema Speicheroptimierung wurde als Operations Research Aufgabe in den 70-er Jahren international sehr viel bearbeitet, und auch wir haben uns mit Probleme dieser Art befasst: die Anwendung von Optimierungsverfahren in der Speicherplanung hat von Anfang an im Arbeitsprogramm der Arbeit des IHW gestanden (als 5. Abschnitt des Arbeitsprogramms in 3.1.2). Schon *Gert Schultz* als Oberingenieur hatte sich das Thema „Speicherplanung“ für seine Habilitationsschrift ausgewählt und in dieser Schrift den Stand des Wissens zum Thema bis etwa 1970 zusammengefasst. Speicherplanung blieb dann auch nach seinem Weggang ein ziemlich zentrales Arbeitsgebiet des IHWs. Zunächst betrachteten wir spezifisch Speicher als Teil des Hochwasserschutzes.

Für den Betrieb eines Speichers oder einer Gruppe von Speichern muss der Betreiber sich entscheiden, ob er steuern oder regeln will. Steuern heißt, eine feste (optimale) Betriebsregel vorzugeben und nach dieser die Abgaben aus dem Speicher festzulegen, z. B. in der Form einer konstanten oder alternativ einer am Füllungszustand des Beckens orientierte Wassermenge. Diese festen Regeln werden einmalig bei der Bemessung des Speichers aufgestellt und in späteren Jahren nachjustiert. Regeln dagegen bedeutet, die Abgaberegeln während des Betriebes so zu ändern, dass die Abgaben (Istwerte) möglichst nahe an der Zielgröße (Sollwert) liegen, z.B. bei einem Hochwasserrückhaltebecken Einhalten der Zielgröße „kritischer Wasserstand“ im Gewässer unterhalb des Speichers, oder beim Einsatz einer Talsperre für die Wasserversorgung „kritischer Wasserbedarf“, oder allgemeiner, mit einer Wasserbedarfsfunktion als Zielgröße.

Es ist die Regelung also im Gegensatz zur Steuerung eine zu jedem Zeitpunkt neu zu lösende Aufgabe. Sie wird dann besonders interessant, wenn die Zielgrößen (Sollwerte) gar nicht oder nur zeitweise erreicht werden können. Dann gilt es Regeln aufzustellen, um den durch die Abweichung von der Zielgröße entstehenden Schaden möglichst klein zu halten: d.h. die Aufstellung der Regel wird zur Optimierungsaufgabe, zu lösen mit den Methoden des Operations Research (OP). Der Schaden wird ausgedrückt durch die Abweichung des Ist- vom Sollwert, multipliziert mit einer Zielfunktion, die den Schaden bewertet. Im einfachsten Fall ist der Schaden die

Abweichung selber, häufig werden aber auch monetäre Zielfunktionen verwendet. In den letzten Jahren meiner Tätigkeit habe ich die Diskussion des Bemessungsproblems für Speicher in dieser Art erweitert und als „Design under uncertainty“ Problem neu formuliert, d.h. als Anwendung der Theorie der Zuverlässigkeit – ein Konzept, das ich durch meine Mitarbeiter in deren Dissertationen an praktischen Fällen ausprobieren lies. In Abschnitt 8.1.2 werde ich näher darauf eingehen.

7.2.1 Speicherplanung für den Hochwasserschutz.

Als erste Anwendungen der OR Methoden sahen wir spezielle Fragen des Hochwasserschutzes. Unsere Beiträge zu diesem Thema begannen mit dem Versuch, für ein bestehendes System von mehreren Hochwasserrückhaltebecken die beste Steuerung für den Betrieb der Speicher im Falle eines Extremregens zu ermitteln, *Gert Schultz* z.B. wandte einfache Optimierungsmethoden an, um die beste Steuerung für zwei Speicher in den Zuflüssen Breg und Brigach der Donau oberhalb von Donaueschingen infolge eines Extremereignisses zu finden²⁰⁰. Die Lösung solcher Aufgabe erschien uns als besonders wichtig für die Praxis, denn die für den Hochwasserschutz für Flussgebiete in Baden – Württemberg erforderlichen Systeme von Hochwasserrückhaltebecken sollten alle aus Einzelspeichern mit Einrichtungen für Steuerung oder Regelung der Kontrollorgane bestehen. Entscheidend war, dass die Rückhaltebecken einzeln zu klein waren, um z.B. das im Durchschnitt einmal im Jahrhundert auftretende Hochwasser aufzunehmen, und niemand wusste recht, wie denn eine Steuerung oder Regelung bei solchen Systemen aussehen könnte.

Bei dieser durch die beschränkte Speichergröße bestehenden Problematik wurden drei wesentliche OR-Aufgaben erkennbar:

1. das Problem der optimalen Steuerung eines einzelnen Hochwasserrückhaltebeckens, um seine Kapazität optimal zur Reduzierung von Fluthöhen unterhalb des Speichers zu nutzen – ein Thema, das *Gert Schultz* und ich in der unter ²⁰¹ veröffentlichten Studie untersuchten,
2. das Problem der Steuerung eines ganzen Systems von parallel oder in Serie geschalteten Speicherbecken verschiedener Größen für diesen Zweck.

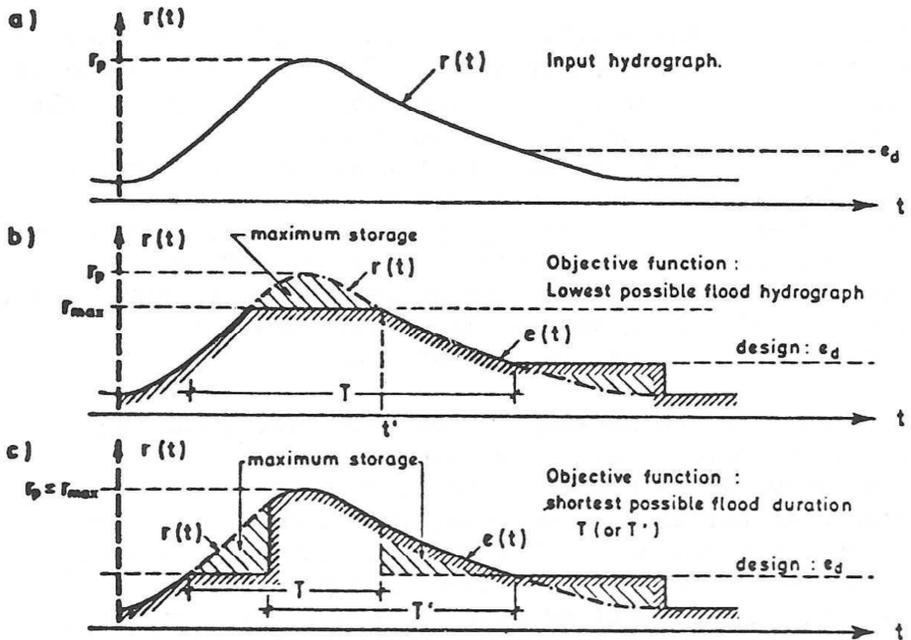
3. das Problem der kostengünstigsten Ausbaureihenfolge für den Bau der Rückhaltebecken der Hochwasserschutzsysteme bei begrenzten jährlichen Bereitstellungen von Baumitteln.

Mutig wie wir waren, packten wir gleich alle drei Probleme an. Als ideales Anwendungsgebiet für unsere Forschungen erwies sich das mit einem Sondermessnetz ausgestattete Sulmgebiet (die Sulm ist ein Nebenfluss des Neckars bei Heilbronn), für das ein solches System von Speichern geplant war. An diesem System probierten wir unsere Ideen aus, zunächst im Rahmen eines DFG-Projektes, später mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg, in einem ersten von später vielen guten gemeinsamen Projekten mit der Wasserwirtschaftsverwaltung des Landes Baden-Württemberg.

Die erste Aufgabe ist die Bemessung eines einzelnen Hochwasserschutzbeckens. Für einen einzelnen Speicher ist die Festlegung des notwendigen Speicherraumes einfach, wenn genügend Platz für jede erforderliche Speichergroße vorhanden ist. Dann ist es möglich, Speicher von beliebiger Größe zu bauen, und eine optimale Speichergroße kann durch Minimierung des Kosten – Nutzen Verhältnisses ermittelt werden. Bei den meisten Rückhaltebecken an den Baden – Württembergischen Flüssen lässt sich ein Speicher von idealer Größe aber nicht realisieren und die örtliche Topographie bestimmt, wie groß das Becken sein kann. Weil aber die meisten Becken nur für den Hochwasserschutz geplant sind, sind sie normalerweise leer und können ein maximales Wasservolumen aufnehmen, und der Abfluss unterhalb des Beckens vor Beginn des Hochwasserereignisses hat keine große Bedeutung. Eingangsgröße für die Speicherbemessung sind Serien von Hochwasserzuflüssen, und die Aufgabe des Betriebes ist, das zufließende Wasser so abzugeben, dass der Wasserstand im Unterlauf den geringsten Schaden erzeugt.

Dies ist in der Abbildung für ein einzelnes HW-Ereignis $r(t)$ illustriert. In a. ist der Zufluss $r(t)$ und der Wasserstand e_D , als obere Grenze für den schadensfreien Abfluss gezeigt. In Abb. b wird die Spitze des HWs durch das (zu kleine) Becken (gestrichelt gezeichnet) abgeschnitten, um den Wasserstand unterhalb des Speicher so niedrig wie möglich zu halten, in Abb. c werden zu Beginn und am Ende des HW Ereignisses Zuflüsse im Speicher

zurückgehalten, um die Dauer der Überschreitung des Sollwertes für zwei verschiedenen Kriterien zu minimieren. Beides sind typische Betriebsregeln, die nur durch Regelung (mit e_D als Sollwert) realisiert werden können, wenn a. der Verlauf $r(t)$ durch eine Vorhersage genau bekannt ist, und b. die Auslassorgane des Speichers gut genug angepasst werden können.



Typischer Einsatz eines HW-Rückhaltbeckens zur Schadensreduzierung

Der Versuch, Betriebsregeln für eine optimale Speichersteuerung bei vorgegebenen Zuflüssen aufzustellen, führte uns zunächst auf einen Irrweg. Ich hatte mir vorgestellt, dass der Weg zu einer optimalen Speichersteuerung über einen Analogrechner führen könnte, mit einer Steuerung auf der Basis von On-line-Messergebnissen von Wasserstand oder Zufluss. Ich regte eine entsprechende Dissertation an, die *Manfred Reuter* im Jahre 1977 vorlegte. Die Aufgabe war aber zu kompliziert, um in einer vernünftigen Weise mit Analogrechnern durchgeführt zu werden. Auch war schon damals zu erkennen - und wurde von *Reuter* betont, dass der Weg über Analogsteuerungen nicht mit den Möglichkeiten immer schneller werdender Digitalrechner mithalten konnte. Der Analogrechner (und die Idee von festverdrahteten Betriebsregeln) wurde daher bald aufgegeben. Danach wurden die Rechnungen für alle weiteren Arbeiten des Instituts digital

durchgeführt. Die Ergebnisse der ersten Untersuchungen mit dem Digitalrechner für das Breg – Brigach System der oberen Donau haben *Gert Schultz* und ich dann abschließend zusammengefasst²⁰².

Das zweite Problem war die gleichzeitige Optimierung eines ganzen Systems von mehreren, parallel und/oder in Serie geschalteten Speichern. *Jürgen Meyer-Zurwelle* zeigte (Dissertation 1975), dass zwar das System von Rückhaltebecken durch Zusammenfassung von mehreren Becken in ein Ersatzbecken stark vereinfacht werden kann, dass aber eine sinnvolle Optimierung nicht möglich war, sodass er sich auf eine empirische Lösung festlegte, die durch Simulation erstellt wurde.

Für das dritte Problem erarbeitete *Janos Bogardi* (1979) einen Ad-hoc-Algorithmus für die Festlegung der Ausbaureihenfolge der Speicher des Sulmgebiets, der zwar eine optimale Ausbaufolge lieferte, aber nur insofern auf andere Speichersysteme übertragbar war, als gezeigt wurde, dass es sinnvoll ist, auf jeden Fall den größten Speicher als ersten zu bauen.

Zusammenfassend muss ich feststellen, dass die Anwendung der Optimierungsverfahren auf das erste Problem als Regelungsproblem für Einzelspeicher sinnvoll ist, unter Voraussetzung einer guten Vorhersage für den Zufluss, dass für die beiden anderen Probleme jedoch unsere Ergebnisse nicht befriedigend waren.

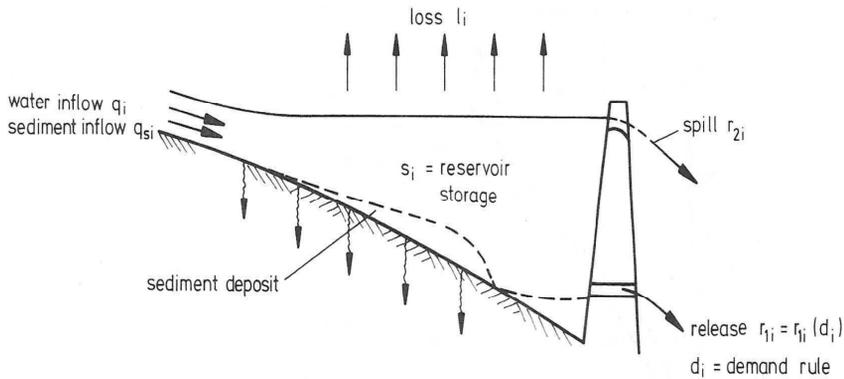
7.2.2 Speicherplanung für Bewässerung

Mitte der 70-er Jahre trat das Ingenieurbüro Björnson, Koblenz, an uns heran, an der Planung für ein Bewässerungsprojekt in dem Gebiet der Tihama in Saudi Arabien mitzuarbeiten. Die Firma hatte den Auftrag, im Rahmen der Entwicklungshilfe, die Wassernutzung für dieses Gebiet zu optimieren, für die wir die hydrologischen Grundlagen liefern sollten. Dies wurde mein erstes Auslandsprojekt und weil ich es bei allen Projekten für wichtig hielt, vor dem Arbeitsbeginn erstmal vor Ort die Situation zu sichten, gab mir dies Projekt die Gelegenheit, dies geologisch und kulturell interessante Gebiet am Ostrande des Roten Meeres zu bereisen.

Die Tihama ist ein Trockengebiet an der Westseite der arabischen Halbinsel, zwischen Rotem Meer und den hohen Azir Bergen, an welchen sich die

seltener von Westen kommenden Wolken aufstauen und zu sturzartigen Regenfällen führen können, die in den auf kürzestem Weg zwischen Azirgebirge und Rotem Meer verlaufenden Wadis abfließen. Dann werden die ansonsten trockenen Wadis zu reißenden Flüssen. Die Bauern hatten gelernt, die Wadis durch Erddämme zu blockieren, durch die das Wasser des Wadis auf die Felder umgeleitet wurde. Bei unerwartet großen Hochwasserspitzen wurde der Erddamm von den Fluten fortgespült, ehe der Wasserstrom auf die Felder so groß wurde, dass er Schaden anrichten konnte. Diese jahrhundertlang bewährte Bewässerungsart hatte in der Neuzeit eine wesentliche Veränderung erfahren durch den Einsatz von Bulldozern für den Bau dieser Umleitungsdämme, wodurch größere Dämme in kürzester Zeit gebaut werden konnten: mit dem negativen Erfolg, dass oft viel zu große Wassermengen abgeleitet wurden, welche die Zuflusskanäle zu den Feldern und diese selbst zerstörten.

Diese Situation sollte durch ein Projekt der deutschen Entwicklungshilfe technisch verbessert werden. Dazu gab es zwei Vorschläge: einer war, in den größten Wadis große Staudämme zu bauen und das ganze Wasser aufzufangen (wie bereits an einem Wadi geschehen war) und dann Bewässerungswasser nach Bedarf abzugeben. Der zweite, von der Firma Bjørnsen bevorzugte Plan sah vor, den traditionellen Erddammbau durch technische Maßnahmen, d.h. durch Wehre nachzuahmen. Die entsprechenden hydrologischen Grundlagen hierfür haben wir aus den dort vorhandenen, durch die italienische Entwicklungshilfe eingerichteten Pegeln und Niederschlagsstationen gewonnenen Unterlagen schaffen können. Hier besonders machte ich die Erfahrung, dass ohne eine Beobachtung des Landes, für das Hydrologie gemacht wird, keine vernünftigen Ergebnisse erzielt werden können. Wie gut sind die Daten und das Messnetz? Aber auch: was ist die optimale Möglichkeit für den Einsatz des Wassers? Bald nach Abschluss unserer Arbeiten wurde das Projekt beendet, und ich kann mir nicht vorstellen, dass das Projekt von anderer Seite weiter geführt wurde. Wir haben sehr bedauert, dass die Modelle in der Tihama nie eingesetzt wurden, denn nach Auslaufen des Projekts von Bjørnsen brach unser Kontakt dort hin ab.



Das Speicherproblem

Nach Abschluss des Projekts hat mich die Problemstellung der Bewässerungsoptimierung weiter verfolgt, und dies führte zu einem der interessantesten Projekte meiner Tätigkeit. Bei meinem Besuch in der Tihama erkannte ich, dass hier der Erfolg der Bewässerung gänzlich von der verfügbaren Wassermenge abhing: Land, das bewässert werden könnte, war genug vorhanden. Dieser Fall der durch das Wasserdargebot limitierten Bewässerung reizte mich als wissenschaftliche Aufgabe: ich sah hier eine sehr geeignete Anwendung von wasserwirtschaftlichen Optimierungsverfahren. Daher entwickelte ich Bewässerungsmodell für das Gebiet der Tihama, für das *Treiber* ein Niederschlagsmodell auf der Basis seines in 8.1.1 beschriebenen Simulationsmodells aufstellte. Damit konnte mein Konzept an einem einfachen Beispiel durchgerechnet werden. In der oben erwähnten Arbeit von *Plate* und *Treiber* (1979) haben wir dies Beispiel zur Diskussion gestellt.

Diese Arbeit war die Grundlage für einen Forschungsantrag zur Bearbeitung des Optimierungsproblems der optimalen Nutzung des vorhandenen Wassers zur Bewässerung, das durch ein Rückhaltebecken zwischengespeichert wird und unter Verwendung einer Wasserbedarfs- und Dargebotsvorhersage auf die Felder verteilt wird. Mit der ausführlichen Bearbeitung des Themas wurde *Otto Schmidt* beauftragt, der im Jahre 1981 promovierte (siehe ²⁰³ für die Zusammenfassung der Arbeit).

Als Eingang wurde die bereits in eine auf Tageswerten basierende Zeitreihe künstlich generierter Zuflüsse angewendet. Diese Zuflüsse wurden in einem Bewässerungsspeicher gesammelt und nach Bedarf abgegeben. Die Bedarfsregel orientierte sich nach dem Wasserbedarf der Sesampflanzen

(oder anderer Kulturpflanzen). Als Generierungsmodell verwendete auch *Schmidt*²⁰⁴ das bereits früher für die Tihama entwickelte Langzeitmodell von *Treiber* und *Plate* (1979). Das Optimierungsproblem bestand dann darin, für gegebenen Wasserbedarf der Pflanzen und gegebenen Funktionen zur Berechnung von Verdunstung und Speicherverlandung bei gegebener Speichergröße den maximalen Ernteertrag durch Bewässerung zu generieren. Das Modell sollte für den allgemeinen Fall einer durch das Wasserdargebot limitierten Situation anwendbar sein, aber exemplarisch benutzte er die Daten vom Tihama Projekt, für das das Ziel war, die Produktion von Hirse (Sesam) zu maximieren. Es gelang *Schmidt* allerdings nicht, eine allgemein anwendbare optimale Regelung für die komplexe Situation der Bedarfsoptimierung aufzustellen, aber immerhin konnte er mit Erfolg eine optimale Regelung durch Simulationen nach dem „trial and error“ Prinzip erzielen.

Eine Anwendung dieses Modells, trotz seiner Vorzüge, in Saudi Arabien ist nicht in Sicht. Es gilt generell, dass die Umsetzung von neuen Ideen in wasserwirtschaftlichen Planungen mühsam und voller kleinerer zeitraubender Probleme ist. Geduld und einen langen Atem braucht man für solche Projekte, und - nach unseren Erfahrungen - auch die Unterstützung durch einen hochrangigen Vertreter der Praxis, der sich mit seinem Prestige für den Einsatz des Verfahrens verwendet. Auch die Dringlichkeit ist wichtig, und die ist in Saudi Arabien nicht gegeben. Weil Geld in Saudi Arabien keine Rolle spielt, fragten sich die zuständigen Beamten wohl, warum man denn überhaupt eine landwirtschaftliche Produktion betreiben soll, wenn die gewünschten Produkte durch den Einsatz von mühelos gewonnenen Petrodollarn auf dem Weltmarkt zu haben sind? Ich habe noch bei mehreren Gelegenheiten für unser Modell geworben – vor allem bei meinen Vorträgen in Indien, und ich hoffe, dass es in geeigneten Situationen aufgegriffen wurde oder wird.

KAPITEL 8: RISIKOMANAGEMENT

Die klassische Bauingenieurpraxis geht von deterministischen Bemessungen aus: Material und Form eines Bauwerks müssen so bemessen werden, dass die maximale zu erwartende Belastung auf das Bauwerk kleiner ist als die minimale Belastbarkeit. Das ist ein deterministisches Problem. In Wirklichkeit sind Belastungen wie auch Belastbarkeit nur Schätzgrößen, sodass die Belastung eines Bauwerks durch Wahrscheinlichkeiten ausgedrückt werden müsste. Das trifft besonders zu bei natürlichen Belastungen – z.B. Hochwasser, Wasserwellen, Wind oder Erdbeben, die eindeutig stochastische Größen sind, und deren Stärken nur durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben werden können. In geringerem Maße ist aber auch die Belastbarkeit, d.h. die Fähigkeit des Bauwerks, die Belastungen aufnehmen zu können, eine statistische Größe. Das wissen auch die Ingenieure, und deshalb haben sie Sicherheitsfaktoren eingeführt, z.B. werden im konstruktiven Ingenieurbau die Belastungen des Bauwerkes mit einem Zuschlag von 30% versehen, und die Belastbarkeit des Bauwerkes ebenfalls mit 30%.

Eine genauere Erfassung der Unsicherheiten von Belastung und Belastbarkeit führt zur Methode der stochastischen Bemessung, bei welcher das Bemessungskriterium ersetzt wird durch eine statistische Aussage, die lautet: die Wahrscheinlichkeit für das Versagen eines Bauwerks muss kleiner oder gleich einer zulässigen Versagungswahrscheinlichkeit sein. Um diese zu berechnen, muss man Belastung und Belastbarkeit als Zufallsvariable in einer zweidimensionalen Wahrscheinlichkeitsverteilung kombinieren und hieraus die Versagenswahrscheinlichkeit ermitteln, die mit einer zulässigen Wahrscheinlichkeit verglichen werden muss. Dabei gilt allerdings, wie ich zeigen konnte, dass eine solche zweidimensionale Bemessung nur dann sinnvoll ist, wenn die Varianzen von Belastung und Belastbarkeit etwa gleich groß sind: ein Fall, dem man im Wasserbau oder bei der Bemessung gegen extreme Naturereignisse nur selten begegnet. Dominiert die Varianz der Belastung, so ist eine genauere Untersuchung der Verteilung der Belastbarkeit nicht erforderlich und ein deterministischer Mittelwert ist ausreichend: die Versagenswahrscheinlichkeit wird gleich der Überschreitungswahrscheinlichkeit für die deterministische Belastbarkeit des Bauwerks²⁰⁵,

Nach einigen eigenen Überlegungen merkte ich, dass stochastische Bemessung als zweidimensionale Wahrscheinlichkeitsaufgabe bereits weitgehend von Bauingenieuren entwickelt worden war. Die Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit ist Ziel der Zuverlässigkeitstheorie. Sie muss kleiner sein, als ein bestimmtes vorgegebenes Maximum. Die Theorie ist nach der Zuverlässigkeit benannt: weil der Begriff Versagen als Kriterium kein Vertrauen einflößt, haben die Ingenieure entschieden, die Bemessung nach Versagenswahrscheinlichkeit umzubenennen in die Bemessung nach Zuverlässigkeit: das ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauwerk nicht versagt. Denn es klingt gefühlsmäßig besser, wenn man von einer Zuverlässigkeit von 99% spricht als von einer Versagenswahrscheinlichkeit von 1 %..

Die Zuverlässigkeitstheorie unterscheidet drei Bemessungsstufen: Stufe 1, bei welcher nur die Belastung als Zufallsvariable eingeführt wird, Stufe 2, die FOSM (first order, second moment) Methode, bei welcher sowohl Belastung als auch Belastbarkeit als Zufallsvariablen betrachtet werden, aber beide als normalverteilt angenommen werden (so dass Mittelwert und Streuung ausreichen, um die Versagenswahrscheinlichkeit zu bestimmen). Diese Methode hat den riesigen Vorteil, dass die weit entwickelten Verfahren der Statistik von normalverteilten Variablen angewendet werden können, hat aber den Nachteil, viele Belastungen und Belastbarkeit nur ungenau zu erfassen, weil sie in Wirklichkeit nicht normalverteilt sind. Dies wird bei der Bemessung nach der dritten Stufe berücksichtigt, bei der die tatsächlichen Verteilungsfunktionen von Belastung und Belastbarkeit verwendet werden. Das erfordert natürlich einen erheblich größeren Aufwand durch die Notwendigkeit, statistische Verteilungsfunktionen zu ermitteln, der bei den meisten Routineaufgaben der Bauingenieurpraxis nicht angemessen ist. Daher ist die Bemessung nach den Regeln der Technik mit Sicherheitsfaktoren durchaus sinnvoll: sodass die stochastische Bemessung erst für komplexere Bauwerke einzusetzen ist.

Ein weiterer Mangel der üblichen deterministischen Bemessungspraxis mit Sicherheitszuschlägen ist, dass bei allgemein gültigen Sicherheitszuschlägen die Bedeutung des Bauwerks keine Rolle spielt. Das gilt auch für die stochastische Bemessung: überspitzt gesprochen, hat ein nach einer einheitlichen zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit bemessener Steg über

einen Bach die gleiche Sicherheit gegen Versagen wie eine Brücke über den Rhein. Man kann zwar die Wertigkeit des Versagens berücksichtigen, indem die Schwere der Konsequenzen des Versagens in einer zulässigen Grenzwahrscheinlichkeit beurteilt wird, z.B. könnte bei einem Versagen ohne Gefährdung von Menschen eine höhere Versagenswahrscheinlichkeit zugelassen werden als bei einem Versagen mit Bedrohung von Menschenleben. In der Praxis heißt dies, dass für jede Art von Bauwerk eine kritische Versagenswahrscheinlichkeit vorgegeben werden sollte, die bei der Bemessung des Bauwerkes nicht überschritten werden darf. Diese ist zwar auch kein absolutes Sicherheitskriterium, aber eine solche, vom Auftraggeber vorgegebene Versagenswahrscheinlichkeit oder Zuverlässigkeit kann als gutes Maß für die Vergleichbarkeit von Lösungen für eine Konstruktionsaufgabe dienen: Lösungen sind gleichwertig, wenn die Versagenswahrscheinlichkeit (oder Zuverlässigkeit) die gleiche ist. In diesem Sinne setzte ich mich für eine Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie im Wasserbau ein. Als Sicherheitskriterium aber hat die Zuverlässigkeit den Mangel, den auch die Überschreitungswahrscheinlichkeit hat: Belastbarkeit des Bauwerkes und Belastung werden mit großem Aufwand berechnet, aber das Ergebnis wird an einem recht willkürlich gewählten Gütekriterium, einer vorgegebenen Versagenswahrscheinlichkeit, bewertet.

Eine Möglichkeit, eine objektivere Bewertung in die Bemessungspraxis einzubringen, besteht in der Einführung einer 4. Ebene, auf welcher nach einer optimalen Lösung mit Hilfe einer bewertenden sogenannten Zielfunktion gesucht wird. Das Ergebnis (der Erwartungswert der Zielfunktion) ist das Risiko, das mit einem akzeptablen Risiko verglichen wird. Das akzeptable Risiko kann z.B. ein Erwartungswert der Gesamtkosten sein. Dabei wird der Entwurf gesucht, für den die Gesamtkosten unter Berücksichtigung von Kosten und Nutzen ein Minimum erreichen. Eine vollständige Risikoanalyse ist am überzeugendsten, wenn auch am aufwendigsten, wenn die Lösung durch die Anwendung der Methoden des Operations Research gewonnen wird. Die Logik dieses Ansatzes, der natürlich nur für Großprojekte durchgeführt werden kann, hat mich sehr überzeugt, und in vielen unserer wissenschaftlichen Arbeiten habe ich versucht, neben der Idee der stochastischen Bemessung auch die Gedankenwelt des OR in die Arbeit der Ingenieurpraxis im Wasserbau einzubringen.

Solche Überlegungen brachten mich auch beruflich in Kontakt zu meinem alten Freund *Lucien Duckstein*, dem als Systemanalytiker diese Methoden sehr vertraut waren. Um unsere gemeinsamen Interessen auf diesem Gebiet zu vertiefen und in die internationale Forschung einzubringen, beschlossen wir, ein NATO Advanced Study Institute zu diesem Thema zu veranstalten. Es fand 1987 in Tucson, Arizona statt, mit Beteiligung der angesehensten einschlägigen Forscher Europas und den USA. Das entstandene Buch wird noch heute von vielen als Einstieg in die Materie empfohlen, obgleich es schon wegen der hohen Kosten nicht einfach zugänglich ist. Unsere eigenen Beiträge fassten wir in zwei Vorträgen zusammen: *Lucien* brachte das systemtheoretische Konzept eines allgemein definierten Systems ein, das mit Hilfe einer oder mehrerer Zielfunktionen optimiert wird (mit einer Vielzahl von numerisch durch relative Häufigkeit bestimmbarer möglichen Zielfunktionen) – illustriert an ein paar einfachen Beispielen²⁰⁶. Ich brachte den spezifischen Fall der Zuverlässigkeit²⁰⁷ ein.

Von da an habe ich verstärkt versucht, den Gedanken des Risiko-basierten Planens und Bemessens zu propagieren. Zunächst, indem *Lucien* und ich die in Tucson entwickelten Ideen einem breiteren Publikum verfügbar machten durch einen in der „peer reviewed“ Literatur zugänglichen Aufsatz²⁰⁸. Hierzu möchte ich aber auch den ganz zentral für eine größere Zuhörerschaft bestimmten Vortrag²⁰⁹ erwähnen, den ich anlässlich meiner Ehrenpromotion an der Universität Hannover am 24. Februar 1993 gehalten habe. Darin stellte ich den Hochwasserschutz dar als gesellschaftliche Aufgabe im Rahmen der von den Vereinten Nationen deklarierten Internationalen Dekade für Katastrophenvorbeugung (UN-IDNDR, 1990 - 2000).

Aber ich wusste ja, dass die Fachwelt nicht durch gute Ratschläge eines Theoretikers dazu gebracht wird, eine bestimmte Theorie zu akzeptieren, sondern nur durch Beispiele, die den Vorteil des neuen Verfahrens gegenüber traditionellen Methoden erweisen. Dadurch war der Weg vorgezeichnet, den wir gehen mussten: nämlich an einer Reihe von konzeptionellen und durchgerechneten Beispielen den Vorteil der Methoden von Zuverlässigkeit und Risiko für den Wasserbau nachzuweisen. In zahlreichen Konferenzen und Lehrgängen, wie auch in Veröffentlichungen habe ich diese Methodik vorgetragen und mit konzeptionellen Beispielen unterfüttert. Dabei habe ich mich bemüht, möglichst bei jedem weiteren Vortrag ein

weiteres Beispiel einzuführen, aber auch weiterführende Erkenntnisse aus Arbeiten des Instituts mitzuteilen²¹⁰²¹¹. Darüber hinaus habe ich mich bemüht, Forschungsaktivitäten zu diesem Thema anzuregen. Im eigenen Institut haben wir in mehreren von der DFG und vom BMFT geförderten Projekten wichtige praktische Beispiele durchgearbeitet. Einige dieser Arbeiten werden in Kapitel 8.2 zitiert. Auch haben wir unsere Ergebnisse in Lehrgängen mitgeteilt, und als Leiter der Kommission für Wasserforschung konnte ich für das Thema in einem Fachgespräch²¹² der Kommission werben.

8.1 Bemessung nach Zuverlässigkeit

Die ersten drei Ebenen der stochastischen Bemessungen bestehen in der Anwendung der Wahrscheinlichkeitstheorie zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit. Dabei muss man unterscheiden zwischen zwei Arten von Versagen: dem Betriebsversagen und dem Bauwerksversagen. Der Unterschied lässt sich leicht am Beispiel einer Talsperre verdeutlichen. Da ist zuerst das Betriebsversagen, d.h. Versagen der Funktion des Bauwerks – es entsteht bei einem Hochwasserschutzspeicher, wenn der Speicher nicht ausreicht, um die Wassermengen dem Betriebsplan entsprechend zu kontrollieren (sodass er überläuft und die Hochwasserentlastungsanlage anspringt), oder bei einer Talsperre für die Wasserversorgung, wenn der Speicher leer läuft. Die zweite Art ist das Bauwerksversagen, wobei das Bauwerk selbst zerstört wird, also bei einem Speicher das Versagen des Dammes oder der Talsperre. Oder im Fall eines Windenergiegenerators: Betriebsversagen, wenn der Generator keine Energie erzeugt, weil zu wenig oder zu viel Wind bläst, während das Bauwerksversagen die Zerstörung des Windrades selber bedeutet.

Bei vielen Gelegenheiten habe ich einführende Vorträge zum Thema „Risikobasierte Bemessung“ gehalten, und bei vielen Konferenzen die Idee des „Stochastic designs“ propagiert und mit den Ergebnissen unserer (und anderer) Forschung unterfüttert. Eine gründliche Zusammenstellung der Methoden findet sich in meinem Statistikbuch, oder z.B. in meinem Beitrag (als keynote lecturer) zur IAHR Stochastic Hydraulics Konferenz in Beijing im Jahr 2000.²¹³ Dabei habe ich die beiden für den Nachweis der Bauwerkssicherheit gegen Bauwerksversagen üblichen Vorgehensweisen berücksichtigt: die üblichen Bemessungspraxis, bei der die Konstruktion

nach den Regeln der Technik bemessen wird und dann nachträglich der Nachweis geführt, dass die vorhandene Versagenswahrscheinlichkeit oder das Risiko kleiner als zulässig ist. Bei der zweiten Art ist die kritische (zulässige) Überschreitungswahrscheinlich oder das kritische Risiko ein Teil der Bemessung und wird als Nebenbedingung der optimalen Bemessung eingeführt.

8.1.1 Anwendungen bei Bauwerken unter Windlasten.

Am Anfang einer systematischen Vorgehensweise zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit stand, angeregt von *Alan Davenport*, die Konzeption der Belastungskette, nach der die Belastung und die Belastbarkeit eines Bauwerks unter Wind- oder Wassereinwirkung eine Kette bilden²¹⁴. Diese Kette berücksichtigt die statistische Variabilität von Belastungen durch Verkehr oder natürliche Größen wie Wind und Wasser, von Material, Baukonstruktion, Zusammenwirken von Bauteilen usw. Diese auch für viele praktische Fälle anwendbare Kette benutzte ich als Grundstruktur für den SFB 210, den ich viele Jahre lang leitete. Ein Beispiel hierzu ist die Untersuchung der Festigkeit typischer Fassadenelemente unter Einwirkung der turbulenten Druckspitzen durch *Jürgen Wacker*²¹⁵.

8.1.2 Staudammsicherheit.

In der Hydrologie ist das nächstliegende Beispiel für die Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie der Nachweis der tatsächlichen Sicherheit, (ausgedrückt durch die Zuverlässigkeit) einer Talsperre, und zwar sowohl der des Bauwerks als auch der des Talsperrenbetriebs, die gewährleistet ist, solange der Stausee seine Funktion als Speicher erfüllen kann: eine leere Talsperre kann kein Wasser abgeben, aber die Sicherheit des Staudamms ist dadurch nicht beeinträchtigt. Ist die Talsperre jedoch voll wenn ein extremes Hochwasser kommt, dann kann durchaus der Fall der Bauwerkssicherheit wichtig sein. Ein Staudamm ist ein Bauwerk von gewaltigen Dimensionen, und erfordert enorm hohe Investitionen. Daher sollte ein Staudamm doch eigentlich durch eine exakte Abstimmung von Bedarf und Dargebot als Unikat bemessen sein, d.h. unter Berücksichtigung einer sehr hohen Zuverlässigkeit für die Bauwerkssicherheit, und einer angemessenen Versagenswahrscheinlichkeit für den Betrieb. Das ist aber nicht der Fall: heute (2005) wird in der Bemessungspraxis weder die Versagens-

wahrscheinlichkeit theoretisch nach den Regeln der Wahrscheinlichkeitslehre bestimmt, noch wird die zulässige Versagenswahrscheinlichkeit nach irgendeinem objektiven Kriterium festgesetzt. Bereits 1982 habe ich auf die fehlende Konsistenz üblicher Bemessungsverfahren für Talsperren hingewiesen und das analytische Konzept einer konsistenten, Risiko basierten Bemessung vorgestellt²¹⁶, ein Konzept, das ich noch weiterentwickelte, indem ich Staudammversagen als Langzeituntersuchung für das Risiko darstellte²¹⁷.

Dieses zunächst theoretische Konzept wollte ich mit meinen Mitarbeitern systematisch an praktischen Beispielen abarbeiten. Ich entwickelte ein entsprechendes Programm, das dann auch mit Mitteln der DFG durchgeführt wurde. Dabei fand ich die Unterstützung von *W. Buck* und *J. Ihringer*, die den Doktoranden bei ihren Arbeiten zur Seite standen. Am einfachsten kann die Aufgabe der Bestimmung beider Arten von Zuverlässigkeit von Speichern empirisch gelöst werden, und zwar unter Verwendung von Langzeitsimulationen, bei denen der Speicherbetrieb virtuell nachgebildet wird. Dafür muss ein spezielles Abflussmodell entwickelt werden, das von der Größe des Speichers abhängt und an die beobachteten Abflussganglinien angepasst wird. Mit einem solchen Modell werden lange Jahresreihen von Abflüssen generiert, die unter Beachtung der Betriebsregeln für den Talsperrenbetrieb im Speicher aufgefangen oder abgegeben werden – einfach eine virtuelle computergestützte Nachahmung des geplanten Betriebs der Talsperre. Exemplarisch für ein Bauwerksversagen hat *H.J. Meier* in seiner Dissertation (1989) die Bauwerkssicherheit für die Talsperre Nonweiler im Saarland untersucht²¹⁸ und hierfür das bereits in 7.4.2 erwähnte, dem Speicherbetrieb angepasste Modell für die Zuflussganglinien entwickelte Modell verwendet. *G. Meon* hat mehr Erfolg mit einer rein probabilistischen Betrachtung gehabt, indem er durch eine Langzeitsimulation eine Stichprobe von Versagensfällen als Funktion der (festen) Betriebsregel ermittelte, ausgedrückt durch das Volumen, das bei voller Talsperre an die Unterlieger weitegeleitet wird, und damit ein in sich konsistentes Modell für die Ermittlung der Staudammsicherheit in seiner Dissertation von 1989 vorgelegt^{219,220}. Das von *Meon* bearbeitete Problem habe ich als Beispiel für Anwendung die Zuverlässigkeitstheorie auf die Bemessung, in einem Übersichtsaufsatz in der Zeitschrift „Nordic Hydrology“²²¹ vorgestellt, zusam-

men mit dem für die Tihama entwickelten Bewässerungsmodell als Beispiel für die Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie auf den Betrieb.

Die Simulation von Speicherbetrieb und Speicherzuflüssen hat den Vorteil, dass auch direkt Feststoffeinträge in die Speicher mit simuliert werden können – und verbunden mit einem hydraulischen Modell auch der zeitlich verlaufende Vorgang der Auffüllung des Speichervolumens durch Feststoffe. Hierfür wird zunächst eine empirische Beziehung zwischen Schwebstofffracht und Wassermenge aufgestellt. Auf diese Weise wurde das oben genannte Simulationsmodell für die Berechnung der Speicherverlandung auf der Basis von Schwebstoffmessungen von *Ihringer* entwickelt, das später auch auf Risikobestimmung ausgedehnt wurde²²².

Gerne hätten wir unsere Modelle insbesondere zur Bewässerung in der Praxis angewendet. Aber unsere Modelle für Ermittlung der Talsperrensicherheit gaben mir genügend Erfahrung, um im Auftrag der NATO als Projektträger als Gutachter für ein NATO-PO Projekt in Portugal zur Untersuchungen der Staudammsicherheit zu wirken, das Prof. *Betamio de Almeida*²²³ von der Technischen Universität Lissabon initiiert hatte. *Er* ging von einem hydrodynamischen Dammbrechmodell aus, das er mit seinen Mitarbeitern entwickelt hatte, und er hatte Partner gefunden, mit denen er eine systematische Untersuchung der Sicherheit von einigen Staudämmen in Portugal durchführen wollte. Konzeptionell konnte ich ihm helfen mit meinen Erfahrungen zum Risikomanagement und durch Beratung an allen Teilprojekten. Auch für mich war dies hilfreich, da die Portugiesen sehr zielgerichtet vorgehen – und auf alle Vorschläge eingingen.

9.1.3 Deichversagen.

Zu den direktesten Anwendungen der Zuverlässigkeitstheorie gehört die Untersuchung zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit von Deichen. Hierbei muss die Hochwasserwahrscheinlichkeit verknüpft werden mit der Wahrscheinlichkeit, dass bei einem bestimmten Hochwasser der Deich an irgendeiner Stelle überströmt wird und bricht. Eine solche Untersuchung knüpften wir in den 80-er Jahren an die Sturmflutuntersuchungen für Hamburg an, die im Abschnitt 7.4.1 beschrieben wurde. Die Extremwertstatistik für die Elbe am Elbeunterlauf wurde verwendet und mit der Deichsicherheit in diesem Bereich verknüpft, um die Versagenswahr-

scheinlichkeit für die Deiche zu bestimmen.²²⁴ Eine interessante Variante dieser Fragestellung behandelte ich für die ICOSSAR Konferenz von 2005 in Rom²²⁵, in der ich die Frage stellte, wie hoch nach einem Meeresspiegelanstieg ein Deich sein muss, um denselben Sicherheitszustand wiederherzustellen wie vor dem Anstieg.

8.1.4 Gewässergüteprobleme.

Zu den für die Anwendung der Risikoforschung besonders gut geeigneten Aufgaben gehört die Untersuchung des Schadstoffeintrags in Flüsse. Im Zuge der Bestrebungen, die Flüsse Europas sauber zu halten, sind Grenzwerte für bestimmte Schadstoffe in den Flüssen vorgegeben, die in allen Einleitungen eingehalten werden müssen. Es ist einsichtig, dass damit nicht gemeint sein kann, dass Grenzwerte nie überschritten werden dürfen – das würde viel zu harte Bedingungen an die notwendigen Einleitungen stellen. Naheliegender ist daher, eine zulässige Überschreitungswahrscheinlichkeit für einen vorgegebenen Grenzwert, z.B. einen kritischen Sauerstoffwert im Vorfluter, zu fordern. Damit wird diese Ermittlung eine Aufgabe der Zuverlässigkeitsberechnung. Diese Aufgabe wollten wir lösen und aufzeigen, wie man von der Bemessung nach der üblichen emissionsbegrenzten Einleitung zu einer durch die Vorfluterbelastung begrenzten, d.h. immissionsbestimmten Bemessung nach einer (möglicherweise bewerteten) Überschreitungswahrscheinlichkeit gelangt. Einen schematischen Ansatz für die Behandlung dieses Problems gab ich bereits 1986²²⁶, wobei ich die Überschreitungswahrscheinlichkeit für eine kritische Konzentration c_{cri} für den Fall ermittelte, dass sowohl Emission als auch Wassermengen als Zufallsvariablen betrachtet werden müssen: eine im Prinzip einfache Aufgabe aus der Zuverlässigkeitstheorie. Wir haben ein Konzept für eine allgemeinere stochastische Betrachtung von Verschmutzungen des Flusswassers durch Einträge aus landwirtschaftlichen Gebieten für Nitratbelastung aufgestellt und das Gesamtproblem der Flussbelastung durch Schadstoffe aus ländlichen und städtischen Gebieten in mehreren Konferenzbeiträgen bearbeitet^{227,228}, und darauf aufbauend haben *Lucien Duckstein* und ich ein Berechnungsschema für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilung von Schadstoffen im Fluss, die von einer Fläche abgespült werden, als Beitrag zum oben beschriebenen Weiherbachprojekt²²⁹ aufgestellt.

8.1.5 Anwendung in der Stadthydrologie.

Aus der Staudammstudie gewann ich die Erkenntnis, dass die Zuverlässigkeitstheorie nicht zuerst bei Bauwerken wie Staudämmen angewendet werden sollte, bei denen das Versagen ein sehr seltener Fall mit enorm großen Konsequenzen ist. Die Theorie ist viel geeigneter für Fälle, bei denen die Belastung zwar probabilistisch ist, ein Versagen aber keine so gravierenden Konsequenzen nach sich zieht. Häufigeres Versagen bedeutet besser abgesicherte empirische statistische Verteilungsfunktionen und damit besser abgesicherte Ergebnisse. Besonders geeignet erschien mir daher die Anwendung auf Probleme der Stadthydrologie. Bereits in den siebziger Jahren erkannten wir sehr deutlich, dass die Untersuchungen hydrologischer Hochwassersituationen nicht auf ländliche Gebiete beschränkt sein sollten, sondern dass auch der Abfluss von Regenwasser in städtischen Gebieten nach hydrologischen Methoden berechnet werden muss. Das sich hier ein wichtiges Arbeitsgebiet aufzutun würde, war uns klar, und der damalige Oberingenieur, *Bertold Treiber*, wurde beauftragt, sich dieses Thema in besonderem Maße vorzunehmen. Zur Einführung in diese Materie haben wir in Zusammenarbeit mit Prof. *Georg Euler* von der TH Darmstadt im Jahre 1981 den 13. DVWK-Lehrgang in Bad Herrenalb abgehalten, in welchem alle wichtigen, bis dahin bekannten Ergebnisse der Stadthydrologie zusammengefasst wurden. Nach *Treibers* Ausscheiden hat auch der nächste Oberingenieur, *Albrecht Pfaud*, auf diesem Gebiet gearbeitet. Später sahen wir aber dann, dass *Friedhelm Sieker* in Hannover seine ganze Energie auf die Bearbeitung einer hydrologisch orientierten Kanalisationsberechnung richtete. Wir wollten daher die Bemessungsfragen für die innerstädtischen Bauwerke *Sieker* überlassen, und uns auf den hydrologischen Aspekt der Stadthydrologie beschränken. Das hieß daher für uns zunächst, ein NA-Modell für die Hochwasserberechnung von Stadtgebieten zu entwickeln, das als Komponente direkt an unser Flussgebietsmodell angeschlossen werden konnte. Dabei ging es uns nicht um die Anwendung auf lokale Hochwasserprobleme innerhalb der Stadt, sondern um die Berechnung des Zuflusses aus dem Stadtgebiet in das Gewässer. Es sollte einfach, aber dennoch genügend genau sein. Ein solches Modul wurde von *Joachim Figlus* in seiner Dissertation von 1988 auf der Basis einer Einheitsganglinie erstellt, die er aus den Fließzeiten im vorhandenen Kanalisationsnetz einer Mischkanalisation berechnete. Die Gültigkeit seines Mo-

dells konnte in einem internationalen Vergleich von Modellrechnungen bestens bestätigt werden.

Erst im Rahmen des von mir als Vorsitzenden der Kommission Wasserforschung der DFG initiierten Schwerpunktprogramms "Stadthydrologie" haben wir uns nochmal mit den stadthydrologischen Aspekten des Gewässergüteproblems befasst, mit Ergebnissen, die wir zusammenfassend in Paris²³⁰ vorgestellt haben. In diesem Aufsatz wurden Beiträge von *Wolf-Dieter Beelitz* und *Peter Schmitt-Heiderich* zum Problem der stochastischen Bemessung eines Regenüberlaufbeckens vorgestellt. Beide gehen von einer gleichmäßigen Überregnung des betroffenen Stadtgebiets aus. *Beelitz* (Dissertation 1996) erfand eine Methode, um die Größe des Beckens als eine bei der Bemessung zu ermittelnde Variable darstellen zu können und führte damit für eine gegebene Niederschlagszeitreihe eine Simulationsrechnung durch. *Schmitt-Heiderich* (Dissertation 1996) systematisierte den Ansatz der Schmutzfrachtberechnung, um für beliebige Verteilungsfunktionen des Niederschlags eine klar definierte Versagenswahrscheinlichkeit ermitteln zu können.

Weiterführend hätten wir das Konzept konstanter Überregnung aufgeben und Niederschlagsfelder in die Stadthydrologie einfügen müssen. Denn die Annahme konstanter Überregnung für das städtische Einzugsgebiet genügt in den meisten Fällen nicht, weil in der Regel kleinräumigere Niederschlagsfelder für das lokale Versagen maßgeblich sind. Möglicherweise tritt der kritische Fall auch nicht bei Hochwasser auf, sondern dann, wenn nach einer langen Trockenheit ein starker lokaler Regen den Schmutz von den Straßen abspült und über das Regenüberlaufbecken in den mit niedriger Wasserführung fließenden Bach entwässert. Es sind daher flächendetailiertere Modelle als unsere üblichen Niederschlag-Abfluss-Modelle für den Einsatz zur Hochwasserermittlung in Stadtgebieten zu verwenden: Modelle, bei denen in kurzen Zeitabständen gemessene Niederschläge zur Generierung von Zeitreihen für Langzeitsimulationen verwendet werden, und zwar gleichzeitig für viele Punkte des betrachteten Einzugsgebiets. Modelle für Niederschlagsfelder wie sie von *Binark* oder *Bardossy* in ihren Dissertationen am IHW aufgestellt wurden (siehe Abschnitt 7.4.2), waren erste Versuche, die raumzeitliche Entwicklung von Niederschlagsfeldern zu er-

fassen. *Andras Bardossy* hat nach seiner Übernahme des Lehrstuhls für Hydrologie an der Universität Stuttgart diese Ideen weiter entwickelt.

8.1.6 Hangrutschungen durch Infiltration.

Ein weiteres, im Rahmen einer Wirkungskette darstellbares Risikoproblem ist das der Hangrutschung von bindigen Böden infolge hohen Wassergehalts, wobei wir uns vorstellten, dass nicht nur das Gewicht des Wassers, sondern auch die Bodenfeuchte selber eine Rolle bei der Entstehung einer Rutschung spielt. Eine Kombination von Langzeit - Niederschlagsgenerierung mit einem Bodenwassertransportmodell und einem bodenmechanischen Gleitmodell könnte danach verwendet werden, um die Rutschwahrscheinlichkeit eines Hanges zu berechnen - ein Projekt, das durch die DFG gefördert und von *Hans-Werner Theisen* in seiner Dissertation von 1998 bearbeitet wurde. Zu diesem Thema versuchten wir auch zum ersten Male im europäischen Rahmen zu arbeiten und beteiligten uns im letzten Jahr meiner Amtstätigkeit an einem Forschungsvorhaben des Geologen Prof. *Czurda* zur Ermittlung der Rutschungsgefährdung eines Hanges im Vorarlberggebiet in Österreich.

8.2 Risikoforschung

Eine elegantere Bemessungsart als die Bemessung nach Versagenswahrscheinlichkeit ist die Bemessung als Optimalitätsaufgabe (nach Ebene 4): diejenige Bemessung ist die beste, bei der die Zielfunktion das Optimum erreicht, z.B. das Minimum einer Zielfunktion „Gesamtkosten“. Zu beiden Bemessungsarten haben wir Beispiele erarbeitet, und ein wichtiger Teil der Forschungsaktivitäten des Instituts in den 90-er Jahren bestand darin, praktische Beispiele sowohl auf dem Gebiet der Gebäudeaerodynamik als auch aus dem Gebiet des Wasserbaus durchzurechnen.

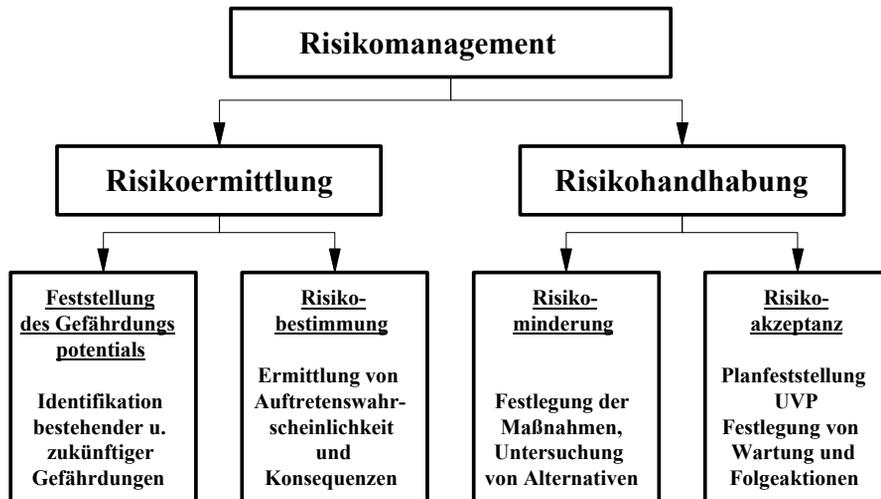
Bereits in unserem ersten Aufsatz zur Zuverlässigkeitsproblematik hatten *Duckstein* und ich auf die vielfältigen Möglichkeiten eines Risikos (definiert als mit einer Konsequenzfunktion gewichteter Überschreitungswahrscheinlichkeit) hingewiesen, die in geeigneter Weise zu einem „Performance Index“ zusammengefasst werden, und soziologische und ökonomi-

sche Faktoren einschließen kann²³¹. Das NATO ASI in Tucson 1987 war insofern ein gewisser Höhepunkt unserer Tätigkeiten, weil in den Vorträgen zu diesem Advanced Study Institut der Begriff des Risikos eine prominente Rolle spielte, und *Lucien Duckstein* und ich als Veranstalter die Breite des Standes des Wissens hierzu vorführen konnten. Den Begriff des Risikos habe ich seither immer in einem breiteren Sinne verwendet und versucht, durch ein risikobasiertes Gesamtkonzept alle Arten von Bemessungsaufgaben auf eine gemeinsame Basis zu stellen. Denn dieses Konzept gilt natürlich nicht nur für die Hydrologie. In einem späteren Aufsatz habe ich (zusammen mit *A. Davenport*)²³² gezeigt, dass auch die Probleme der Gebäudeaerodynamik in einem solchen Rahmen darstellbar sind. Damit ist die Aufgabe der risikobasierten Bemessung zurückgeführt auf die zusätzliche Bereitstellung einer Konsequenzfunktion. Der dafür erforderliche Aufwand - bei einem Mangel an brauchbaren Daten - ist ein Grund, warum sich die Risikobasierte Bemessung bisher kaum durchgesetzt hat.

Die Risikoforschung verwendet das Risiko in einer doppelten Funktion: als Bemessungsgröße einerseits, aber andererseits auch als Richtgröße für die Aufgabe der Verminderung eines vorhandenen Risikos oder Restrisikos. Das Beispiel ist Hochwasservorbeugung. Das Risiko ist definiert über die einfache Formel: $R_i = E \cdot K \cdot P$, d.h. das Risiko R_i ist das Produkt der Konsequenz K , d.h. Schaden oder Schadenskosten, modifiziert durch E als „Exposure“ (d.h. E = Grad der Konsequenz, z.B. Prozentsatz an Gebäuden, die durch ein Hochwasser bestimmter Größe gefährdet sind) und multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Ereignisses, das Konsequenz K haben kann - z.B. Überschreiten eines kritischen Hochwasserspiegels, mit Konsequenz Überschwemmung mit einem Schaden K . Die einfachste Zielfunktion entsteht, wenn die Konsequenzfunktion $K \cdot E = 1$ ist, und das Risiko zur Versagenswahrscheinlichkeit wird.

Das Gesamtkonzept des Risikomanagement ist in der Abbildung formal so dargestellt, wie es sich als Ergebnis einer Folge von vielen Entwicklungsstufen heute darstellt. Es würde hier zu weit führen, dies Konzept im Einzelnen zu beschreiben - dies habe ich in einem Aufsatz²³³ ausführlich getan (in der wahrscheinlichsten erfolgreichsten aller meiner Veröffentlichungen, eine der meistgelesenen nach ResearchGate) - hier soll anhand der Abbildung auf dieser Seite nur deutlich gemacht werden, dass die Zuver-

lässigkeit, die die Wahrscheinlichkeit ausdrückt, dass ein Bauwerk in seiner Funktion nicht versagt, in einem solchen Schema seinen festen Platz hat.



Die Struktur des Risikomanagements

Es liegt auf der Hand, dass dieses Schema des Risikomanagements besonders, aber natürlich nicht nur, für die Vermeidung von Naturkatastrophen anzuwenden ist, als Planungsmethode für den Fall des Versagens von bestehenden Schutzbauwerken. Dies ist ein Aspekt des Managements des Restrisikos. Es geht dabei nicht um das Risiko für das Bauwerk, sondern um die zu erwartenden Konsequenzen für die Betroffenen bei Eintritt des Falles, dass der Betrieb oder ein Bauwerk in einem geplanten oder vorhandenen System versagt. Hier ist das Risiko als Leitgröße für die Vorbeugung zu sehen, und erfordert eine ganzheitliche Betrachtung, basierend auf einer Modellierung der Vernetzung von Mensch, Landschaft und Wirtschaft. Sie ist auf interdisziplinäre Zusammenarbeit angewiesen, da eine Reihe der Teilfragen, die durch eine Risikoanalyse beantwortet werden müssen, außerhalb der Zuständigkeit des Ingenieurs - oder des Hydrologen - liegen. Eine solche Betrachtungsweise sollte aber nicht nur für öffentliche Großanlagen: Schutzsysteme für Flüsse, oder Verkehrsanlagen, sondern auch für jede größere Baumaßnahme angewendet werden; denn jede Entscheidung für eine größere Baumaßnahme greift ein in ein soziales Gefüge - und darum sollte vor der Entscheidung festgestellt werden, wie sie auf Menschen

und Umwelt einwirkt, und ob die Maßnahme nachhaltig, d.h. auch für die Zukunft sinnvoll, ist. Dieses Thema hat international seit den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts besonderes Interesse gefunden, insbesondere als Nachwirkung eines spektakulären Staudammbruchs in den USA, (des des Teton Dams, bei Idaho Falls, Idaho, am 5. Juni 1976), wonach die Amerikaner begannen, ihre Sicherheitsphilosophie²³⁴ neu zu überdenken.

In den letzten Jahren meiner Tätigkeit am KIT Karlsruhe habe ich Katastrophenmanagement im Wasserbau im Sinne der Risikoverminderung immer mehr in den Mittelpunkt meiner eigenen Aktivitäten gestellt. Eine detaillierte Betrachtung solcher durch wasserwirtschaftlichen Maßnahmen bewirkten Zusammenhänge schien mir besonders reizvoll. Dabei ist es natürlich, dass das Restrisiko sich nicht als eine feste Größe in einem Einzugsgebiet definieren lässt, vielmehr werden z.B. nicht nur Bauwerksversagen zu untersuchen sein, sondern auch allgemein alle Auswirkungen z.B. flussbaulicher Eingriffe auf menschlichen Aktivitäten. Besonders greifen wasserbauliche Maßnahmen an Flüssen, Seen und am Meer in die natürlichen Abflussverhältnisse ein, mit Auswirkungen, die in klimatisch ungünstigen Gegenden von Überschwemmungen bis zu Dürren reichen. Sie führt direkt zur Aufgabe, das Optimum der Auswirkung als „Performance Index“ zu finden, wodurch die Methoden der Zuverlässigkeitstheorie auch auf diesem Gebiet zum Tragen kommen.

Ende der 80-er Jahre des 20. Jahrhunderts wurde das Thema Schutz vor Naturkatastrophen als Politikum international (neu) entdeckt, und Risikovermeidung oder Vorbeugung begann eine wichtige Rolle in der öffentlichen Diskussion zu spielen. Daher mehrten sich die Versuche einzelner Wissenschaftler, sich auch öffentlich für Katastrophenverhütung einzusetzen. Im Jahr 1987 hörte ich vom Vorschlag des angesehenen Seismologen *Frank Press* (damals Präsident der US National Academy of Sciences), eine Internationale Dekade für Katastrophenvorbeugung (IDNDR= International Decade for Natural Disaster Reduction) einzuführen. Dies sah ich als eine zunächst von der Erdbebenforschung ausgehende Werbung für die Risikoforschung und als ideale Gelegenheit, den erweiterten Risikobegriff (des Restrisikos) populär zu machen. Daher habe ich diesen Vorschlag mit großem Nachdruck aufgegriffen. Ich machte als damaliger Vorsitzender der DFG Kommission für Wasserforschung der DFG den Vorschlag, eine DFG

Arbeitsgruppe einzurichten, die zunächst in der Vorbereitung dieser Dekade mitwirken sollte, um sie später auch wissenschaftlich zu begleiten. Der damalige Sachbearbeiter für Wasserforschung bei der DFG, *Dr. Ulrich de Haar*, unterstützte diesen Vorschlag nachdrücklich, und es entstand ein wissenschaftlicher Beirat (unter meiner Leitung, mit *de Haar* als DFG Betreuer), zur Unterstützung der Ziele der IDNDR. Diese Arbeitsgruppe stellte zunächst einen Sachstandsbericht²³⁵ zum Katastrophenmanagement über den Stand der Katastrophenforschung in Deutschland zusammen.

Die Arbeitsgruppe wurde dann, nachdem die IDNDR tatsächlich von den Vereinten Nationen für die Jahre 1991 - 2000 deklariert wurde, zum wissenschaftlichen Beirat des Deutschen Nationalkomitees für die IDNDR, den ich bis zum Jahr 2000 leitete²³⁶. Zwei meiner Doktoranden, *Wolfgang Kron*, und später *Bruno Merz*, wurden nacheinander als Sekretäre des Beirats tätig, erst in Karlsruhe, und dann am Geoforschungsinstitut in Potsdam²³⁷, und als ich dann in das Deutsche Nationalkomitee und kurz darauf als Mitglied in das International Scientific and Technological Committee (STC) für die Dekade berufen wurde, begann für mich eine internationale Tätigkeit der Beratung, die mich in viele Länder der Welt und in Berührung mit angesehenen Wissenschaftlern und Politikern aus vieler Herren Länder²³⁸ brachte. Höhepunkte waren die IDNDR Konferenzen in Yokohama und in Bonn, an denen allerdings das STC kaum beteiligt war: denn der Nachdruck der Dekade verschob sich sehr schnell von der wissenschaftlichen Seite zur rein operationellen: Rotes Kreuz, THW und Feuerwehr bestimmten die Themen, und in den Konferenzen beschrieben vor allem Regierungsvertreter der beteiligten Länder, was in ihren Ländern zum Katastrophenschutz getan wird. Fruchtbarer war die Wirkung in Deutschland, wo der Wissenschaftliche Beirat einen umfassenden Abschlussbericht²³⁹ zusammenstellte, der viele Wissenschaftler motivierte, sich nicht nur während, sondern auch nach dem Ende der Dekade mit ihren Forschungen an den Zielen der Dekade zu orientieren.

Für mich war ein Nebenergebnis, dass ich wegen meiner Rolle als Vorsitzender dieses Beirats in eine Kommission für die Gründung eines Deutschen Forschungs- und Ausbildungszentrums (Research and Trainings Center, RTC) der United Nations University (UNU-EHS, EHS = Environment and Human Security) gewählt wurde, deren Leitung ich nach kurzer Zeit über-

nahm. Diese Aufgabe hat mich viele Jahre lang beschäftigt und brachte mir Reisen in alle Welt und interessante Kontakte.²⁴⁰ Es begann mit einem von mir im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) organisierten Workshop, für den ich ein Gesamtkonzept entworfen habe, brachte mir dann auch die Aufgabe, unter geeigneten Bewerbern die beste Person für die Leitung des zu gründenden RTC zu finden, und danach für viele Jahre im Advisory Board dieses RTCs zu wirken. Dabei kam ich auch wieder in den Kontakt mit meinem früheren Doktoranden *Janos Bogardi*²⁴¹, der der erste Leiter des UNU-EHS RTC wurde. In diesem Zusammenhang entstand auch meine letzte wissenschaftliche Veröffentlichung zum Thema Risiko. Ich fragte mich, wie denn Großkatastrophen volkswirtschaftlich zu bewerten seien: es ist ziemlich einleuchtend, dass ein Hochwasser mit einem Schaden von 1 Mrd Dollar in Frankreich die französische Volkswirtschaft weniger belastet, als ein Ereignis derselben Größe in einem kleinen Land in Südamerika die dortige. Meine Empfehlung war, Katastrophenschäden nicht in absoluten Größen anzugeben, sondern als Prozentsatz des Brutto Nationaleinkommens (BNE) – eine naheliegende Bewertungsmöglichkeit²⁴².

8.2.2 Stichwort Nachhaltige Entwicklung

Zum Abschluss dieser Berufserinnerungen möchte ich noch kurz auf ein wichtiges Thema kommen, das mich zeitweilig sehr beschäftigt hat: das ist das Thema „Nachhaltige Entwicklung“, oder Sustainable development. Dieser Begriff entstand in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts, als mögliches Konzept zur Bewältigung der großen existentiellen Problem der Menschheit: dem dramatischen Ressourcenverbrauch, der gewaltigen Vermehrung der Weltbevölkerung und dem sich abzeichnenden Klimawandel. Es geht darum, eine Welt zu schaffen, in der auch zukünftige Generationen ein auskömmliches und lebenswertes Leben führen könnten, in einer weitest möglich erhaltenen Natur.

Ausgangspunkt war der sogenannte Brundtland Report: „Our common future“, der weitgehend als Entwicklungsprogramm für die Menschheit gesehen wurde. Der Bericht wurde enthusiastisch von der Politik aufgegriffen, weil es kein „Zurück zur Natur“ Programm war, sondern weil es (scheinbar ohne allzu große Opfer zu fordern) einen Weg aus dem Dilemma einer nur

durch ständiges Wachstum und begleitender Umweltzerstörung machbaren Weltwirtschaft zu weisen schien. Allerdings: was unter einer nachhaltigen Entwicklung im Detail zu verstehen ist, und was die Umsetzung dieses Konzepts für die einzelnen Fachdisziplinen bedeutet, bleibt der weiteren Gestaltung durch Wissenschaft und Politik überlassen. Auf dem Gebiet der Wasserwirtschaft führte dies zu einer Reihe von Konferenzen, deren wichtigste die „International Conference on Environment and Water“ im Jahr 1992 in Dublin, Irland, war, an der sich auch COWAR, das Komitee für Wasserforschung der ICSU (International Council of Scientific Unions) beteiligte. Damals leitete ich dieses Komitee, und wir stellten mit großem Fleiß und Enthusiasmus einen Katalog von Maßnahmen für eine nachhaltige Entwicklung in der Wasserwirtschaft zusammen. Dieser umfangreiche Bericht²⁴³ war als keynote paper für die Dublin Konferenz vorgesehen – allerdings war dann bei der Konferenz vor lauter politischen Fragen²⁴⁴ keine Zeit für solche Berichte wie dem unsrigen – alle solchen, mit großem Aufwand erstellten Papiere wurden in einem Anlagenband zusammengefasst, der nur zur Konferenz vorlag. Ich habe wie viele andere immer wieder versucht, in Gesprächen und bei Konferenzen auf die Bedeutung der Nachhaltigen Entwicklung hinzuweisen, aber wie das in der Politik so ist: einige wenige Aspekte wurden übernommen und umgesetzt – und man darf sagen, dass das gewachsene Umweltbewusstsein seinen Ursprung auch in den Bemühungen um die Umsetzung des Brundtland Berichts hat, auch wenn ein allgemeiner Trend hin zur Nachhaltigen Entwicklung nur in Ansätzen zu erkennen ist. Eine Zusammenfassung unseres Berichtes habe ich später bei einer Fachkonferenz in Tokyo vorgetragen²⁴⁵.

Für das IHW war das Thema „sustainable development“ zunächst eine Aufforderung, bessere Grundlagen für die Beeinflussung der Umwelt zu schaffen, sowohl in der Bewirtschaftung des Wassers, als auch in den hydrologisch – hydraulischen Grundlagen. Besonders interessierte mich die Möglichkeit, die Zusammenhänge zwischen Wasser und menschlichen Eingriffen in den Wasserhaushalt modellmäßig darzustellen, wie ich einleitend zum 7. Kapitel beschrieben habe.

Ich hatte auch die hydrologischen Arbeiten des IHW als Beiträge, als Werkzeuge, für eine nachhaltige Entwicklung gesehen, und sah eine weitere Verbesserung und als möglichen Beitrag des IHW, die hydraulisch –

strömungsmechanischen Kompetenzen mit denen in der Hydrologie zu vereinen. Es hätte dies auf manchen Gebieten interessante Grundlagenforschungsthemen ergeben können - z.B. bietet sich die Verdunstung als ideales gemeinsames Arbeitsgebiet von Strömungsmechanikern und Hydrologen an, oder die Aero- und Thermodynamik des Wasserdampftransports im Boden, die durch eine Verknüpfung von Hydrologie, Bodenkunde wie auch Bodenmechanik und Pflanzenphysiologie experimentell untersucht werden könnte. Einen entsprechenden Antrag zur Untersuchung der Verdunstung von Böden unter Einwirkung des Windes hatte ich bei der DFG noch gestellt, er wurde aber dem bereits im Ruhestand befindlichen Ordinarius nicht bewilligt. Auch der Stofftransport bietet viele Ansätze gemeinsamer Arbeit von Hydrologen, Strömungsmechanikern und vielen anderen. Da jedoch die strömungsmechanische Komponente des Instituts über die Gebäudeaerodynamik eingebracht wurde - in Fortsetzung des von mir in den USA betriebenen Arbeitsgebietes - ist die Strömungsmechanik für die Hydrologie nicht mobilisierbar gewesen und Strömungsmechaniker des Instituts haben eher, vor allem über die beiden Sonderforschungsbereiche, an denen das Institut beteiligt war, Kontakte zur Hydraulik entwickelt.

Vielleicht hätte eine Weiterentwicklung des Instituts zu einer solchen Verzahnung geführt, aber dazu kam es nicht. Die Fakultät ließ den Lehrstuhl nach meiner Emeritierung unbesetzt, die Gebäudeaerodynamik ging an das Institut für Hydrodynamik und wurde von *Bodo Ruck* in kleinerem Umfang mit neuen Schwerpunkten weitergeführt, während das Arbeitsgebiet Hydrologie, durch *Jürgen Ihringer*, als ein Teil des Instituts für Wasserbau und Gewässerschutz weiter vertreten wurde. In den folgenden Jahren wurde die Fakultät vergrößert zur Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, und es wurde (nach zwölf Jahre!) doch erkannt, wie wichtig die Hydrologie im Zeitalter einer zunehmenden Ökologisierung für die Fakultät geworden ist. Aus dieser Einsicht heraus wurde der Lehrstuhl neu eingerichtet und seit 2012 gibt es mit dem neuen Lehrstuhlinhaber *Erwin Zehe* wieder einen eigenständigen Lehrstuhl Hydrologie.

KAPITEL 9: SCHLUSSWORT

Auf der Basis meiner Erfahrungen in den USA konnte ich in Deutschland ein vielseitiges Forschungsprogramm aufstellen und mit meinen mehr als 50 Doktoranden abarbeiten. Gemeinsam haben wir vieles erreicht, was ich allein nie hätte schaffen können. Dabei habe ich mit Dankbarkeit erfahren, dass die Doktoranden häufig genug ihre eigenen Ideen einbringen wollten und konnten. Ich denke, dass der Schlüssel für meinen Erfolg darin lag, dass ich ein plausibles, anpassungsfähiges wissenschaftliches Programm mit klaren Zielvorstellungen hatte, dass ich die Doktoranden für diese Richtung interessieren und mit Grundideen versorgen konnte, um dann mit Toleranz und Interesse die Weiterführung meiner Ideen in den Händen der Schüler zu verfolgen.

Am Ende meines Berichtes über meine vielen Tätigkeiten möchte ich zuerst sagen, dass ich diesen Bericht mit einem Gefühl der Dankbarkeit beende. Weil man mir die Chance gegeben hat, frei zu entscheiden, was ich machen wollte: durch die Colorado State University, im US Argonne National Laboratory, an der Universität Karlsruhe, und nicht zuletzt durch die Förderer meiner Tätigkeit, allen voran die Deutsche Forschungsgemeinschaft. Wenn ich das Fazit aus meiner Tätigkeit ziehe so darf ich sagen, dass ich zufrieden bin mit dem, was ich erreicht habe.

Ich denke, ich habe mit meinen Mitarbeitern auf allen Gebieten, auf denen wir gearbeitet haben, Erfolge erzielt, die uns die Achtung unserer Kollegen und gelegentlich auch der Fachwelt eingebracht haben. Die Einladungen, bei besonderen Anlässen Festvorträge zu halten, oder die vielen kleineren und größeren Ehrungen, die ich erfahren durfte, scheinen dies zu bestätigen. Wichtiger noch aber gilt meine Dankbarkeit den Menschen, mit denen ich zusammen gearbeitet habe: meinen früheren technischen Mitarbeitern, angefangen mit meiner langjährigen Sekretärin *Margarete Heller – Moussa*, den wissenschaftlichen Mitarbeitern, vor allem der Folge loyaler und kompetenter Oberingenieure *Gert Schultz*, *Bertold Treiber*, *Albrecht Pfaud* und vor allem *Jürgen Ihringer*, und die anderen Gruppenleiter *Reinhard Friedrich* für die SFBs, *Achim Lohmeyer*, *Wolfgang Bächlin* und *Matthias Rau* für die Gebäudeaerodynamik. Und natürlich der großen Reihe von Doktoranden, die meine Ideen weiterentwickelt haben und die durch eigene Beiträge

zum Ansehen des Instituts beitragen. Und ich schließe diese Berufsdarstellungen mit einem Wort der Dankbarkeit: zuerst an meine Frau Gabriele, die mir das Umfeld schuf, in dem ich mich hauptsächlich meinem Beruf widmen konnte. Es war ein schönes Leben. (Beendet 1. Januar 2018)

ANHANG 1: MEIN LEBENS LAUF

- 1929 14.7. Geboren in Hamburg
- 1949 Abitur, ab
- 1950 Studium Bauingenieurwesen, Dipl.-Ing (1958) und Dr.-Ing (1966) Universität Stuttgart
- 1954 -1957 Fulbright Stipendiat USA (MS in Irrigation Engineering, Colorado State University) und Versuchsingenieur
- 1957- 1959 Hilfsassistent und Assistent: Universität Stuttgart.
- 1959 - 1969 Versuchsingenieur und Professor, Colorado State University (CSU) (Full Professor 1968)
- 1969 - 1970 21.4.1969-30.6.1970 Visiting Scientist, Argonne Natl Laboratory.
- 1970 - 1997 ordentlicher Professor, Universität Karlsruhe, bis zum Ruhestand.

ANDERE FUNKTIONEN

- 1974 - 1976 Dekan Bauingenieur- und Vermessungswesen, U.Karlsruhe
- 1975 - 1988 Vorsitzender: Senatskommission Wasserforschung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), Bonn
- 1973 - 1979 Mitglied des Councils (1973 - 1974) und Vize- Präsident der International Association for Hydraulic Research (IAHR), Organisator des IAHR Congresses Baden Baden, 1977
- 1977 - 1981 Director bei der International Water Resources Association (IWRA)
- 1971 - 1994 Mitglied SFB 80 (1971 -1983) und ab 1977 Leitung SFB 80, Leiter des SFB 210 (1983 -1994)
- 1980 - 1983 Secretary Treasurer (1980) und Vize-Präsident des Komitees für Wasserforschung (COWAR) des International Council of Scientific Unions (ICSU) und der Union of International Technical Associations (UATI/UITA)

- 1984 - 1987 Mitglied, UNESCO Advisory Council für das International Research and Training Centre on Erosion and Sedimentation (IRTCES), Beijing China
- 1985 - 1989 Präsident der International Association for Hydraulic Research (IAHR)
- 1987 - 1997 Mitglied des Senats der Universität Karlsruhe
- 1989 - 1999 Mitglied des Deutschen National Komitees für die Internationale Dekade für Katastrophenvorbeugung (IDNDR), und Vorsitzender des Wissenschaftlichen Beirats, sowie
- 1990 - 1996 Mitglied des Internationalen STC (Scientific and Technological Comitee) für die IDNDR
- 1989- 1995 Präsident von COWAR (Committee on Water Research) des Interntional Councils of Scientific Unions
- 1987 Co-Director, NATO Advanced Study Institute on "Risk Analysis in Hydrology and Water Resources", Tucson, Ariz
- 1993 Co-Director, NATO Advanced Study Institute on "Urban Climates", Karlsruhe
- 1995 Co-Director, NATO Advanced Study Institute on "Convective flows", Pforzheim

EHRUNGEN UND PREISE

- 1954 - 1957 Fulbright scholarship
- 1971 J. James R. Croes Medal (second best paper 1970) - Am. Soc. of Civil Engineers (ASCE)
- 1974 Ruf zum Associate Division Director an das Argonne National Laboratory (abgelehnt)
- 1980 Ruf an die Technische Universität Hamburg – Harburg (abgelehnt)
- 1985 "Honorary Fellow", Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research, Beijing, China
- 1986 "Honorary Member", Associazione Idrotecnica Italiana, Rome, Italy

- 1986 First German Japanese Award - Japanese Society for the Promotion of Science (JSPS)
- 1993 Honorary Doctorate, University of Hannover, Germany
- 1993 Best paper award for 1993: Water International.
- 1993 "Honorary member", International Association of Hydraulic Research and Engineerin (IAHR)
- 1997 Special Award European Section, Internatl. Wind Eng. Society
- 1998 Member, Istituto Lombardo, Accademia di Scienze e Lettere, Milano
- 1998 Recipient Cannes Water Prize: "Lumiere de l'Éau"
- 2000 Recipient, Henry Darcy Medal for Hydrology, Europ. Geophysical. Society
- 2007 "Honorary Member" World Association for Sedimentation and Erosion Research (WASER)

ANHANG 2: VERGLEICH USA UND DEUTSCHLAND

Am 1. Juli 1970 begann ich meine Tätigkeit an der Universität Karlsruhe (TH), in einem völlig anderen akademischen Umfeld als an der CSU. Es hat mich immer wieder verwundert, dass man in der deutschen Bildungslandschaft deutsche und amerikanische technische Universitäten verglichen hat – sie sind aber eigentlich gar nicht vergleichbar. Es gibt in den USA eine riesige Zahl von staatlichen und privaten Universitäten, mit großen Qualitätsunterschieden und den verschiedensten Ausbildungszielen – entsprechend sind auch die von ihnen verliehenen akademischen Grade von verschiedenem Wert. Ein BS vom MIT garantiert von vornherein einen guten Job, während ein Absolvent mit einem BS von einem Community College höchstens für Arbeitgeber in direkter Umgebung des Colleges besser qualifiziert erscheint. Den deutschen Universitäten am ähnlichsten sind private Universitäten, wie Stanford, und die großen Universitäten der Staaten, von denen meistens zwei pro Staat von größerer Bedeutung sind, die klassisch ausgerichteten „State Universities“, und auf technischem Gebiet vor allem die aus den früheren Agricultural and Mechanical Colleges hervorgegangenen technischen Universitäten wie CSU. Im Gegensatz zu Deutschland sind auch staatliche Universitäten zum Großteil aus Studiengebühren und Spenden finanziert. Sie werden von mächtigen, oft von außerhalb der Universitätsumgebung kommenden Präsidenten geleitet, die vor allem auch Werbung betreiben müssen (CSUs Präsident war in den meisten Jahren meiner Zeit in Ft.Collins ein ex-General *Morgan*). Professoren sind dadurch Angestellte einer Bildungsmaschine, bei der die gesellschaftliche Komponente eine ebenso große, oder größere Bedeutung hat wie die Ausbildungskomponente – und bei der der erfolgreiche Football coach als Garant der Werbung für die Universität an der Spitze der Gehaltsliste stehen kann.

Die Studenten erwarten von der sehr teuren Universität mehr als nur Wissensvermittlung: ihr ganzes Studentenleben, vor allem als Undergraduate, spielt sich in der Universität ab, angefangen mit der typischen Unterbringung in Dormitories und der umfangreichen Beteiligung am extracurricularen Leben der Universität. Durch die intensive Betreuung durch die Universität und zahlreiche extracurriculare Veranstaltungen entwickelt der Student eine lebenslange Anhänglichkeit an die Universität. Dazu erhält er später ständig Zusendungen von Informationsmaterialien von seiner Uni-

versität, sodass der frühere Student seine Alma Mater nie ganz vergisst und veranlasst wird, die Universität und ihre extracurricularer Aktivitäten – vor allem die sportlichen - gern und oft großzügig zu unterstützen (soweit er oder sie es kann: heute stecken viele Studenten in der Schuldenfalle: das Darlehen für die hohen Studiengebühren muss zurückgezahlt werden, oft aus Einkommen, die weit unter den Erwartungen liegen).

In diesem auf das soziale Umfeld der Studenten orientierten Universitätsleben spielen die Professoren eine doppelte Rolle: als Lehrpersonen durch die Vorlesungen, und als Ratgeber für die Studierenden. Zu meiner Zeit hat jeder Undergraduate einen Professor als „advisor“ gehabt, mit dem er seine Studienangelegenheiten besprach und seinen individuellen Lehrplan aufstellte. Das ist natürlich nur machbar, wenn es sehr viele Professoren gibt. Sie sind in der Regel Angestellte mit Karrieren vom Instructor bis zum distinguished Professor - das Professorenamt ist in den USA eine Laufbahn, die Platz lässt für wesentlich mehr Professoren als das deutsche System. Ich glaube, dass daher auch an die Qualität der Professoren der kleineren Universitäten kein sehr hoher Anspruch gestellt wird: sie müssen gut sein, aber nicht unbedingt die Besten (im Gegensatz vor allem zu den wenigen Spitzenuniversitäten, die aber dafür noch erheblich teurer für die Studenten sind, als die ohnehin schon recht teuren anderen Lehranstalten). Daher der Stolz selbst der Leitung der CSU über x Professoren mit Doktoraten von den Elite-Forschungsuniversitäten wie Stanford oder MIT: wenn der junge Professor gut genug war, um einen PhD von einer dieser Universitäten erhalten zu haben, dann war er gewiss gut genug für eine Karriere an University X.

Hinsichtlich der Vorlesungspflichten für die Undergraduates (vorm Bachelor) bestehen nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Kategorien von Professoren (Lecturer, assistant professor, associate professor und full professor). Ihnen vorgesetzt sind die Department Heads, die die Lehrpläne aufstellen. Erst danach werden die Professoren benannt, die die Vorlesungen zu halten haben. Die Routinevorlesungen mussten nach Bedarf, vor allem durch die jüngsten Professoren (Instructors oder Assistant Professors) gehalten werden – so musste ich z.B. im Anfang meiner Lehrtätigkeit die Vorlesung „Mechanik – Statik“ halten, obgleich mein Arbeitsgebiet ja eigentlich Strömungsmechanik war. Es gibt dadurch sehr

viele Professoren für solche Fächer, so dass in der Lehre kleine Klassen möglich sind – wie denn auch Jahrgänge von Studierenden eines Fachgebietes klein sind im Vergleich zu deutschen Universitäten: 20 – 40 Studierende in den USA, vs. 200 – 400 Studierende in Deutschland. Erst für die Fachvorlesungen – oft aus verschiedenen Vertieferrichtungen, die der Advisor dem Studenten vorschlägt, - werden spezialisierte Fachprofessoren (durchaus auch gelegentlich graduate students) eingesetzt.

In der Betreuung der Lehraufgaben unterscheiden sich in den USA die akademischen Ränge gar nicht: Vorlesungen müssen in der Regel vom Dozenten selbst (oder „seinen“ graduate students) betreut werden, wie auch die üblichen Examen innerhalb des Vorlesungszeitraums. Das Studienjahr ist eingeteilt in gleichgroße Abschnitte – in Semester oder in Quartalen. Beim Quartal System besteht das Studienjahr aus 3 Quartalen von ca. 3 Monaten, das vierte ist vorlesungsfrei. Der Lernfortschritt wird wie in der Schule geprüft durch häufige Hausaufgaben, bestehend aus einer Reihe kleinerer Aufgaben, die meistens mit der Praxis wenig zu tun haben. Im Vergleich dazu sind (waren zu meiner Zeit?) die Übungsaufgaben zu Fachvorlesungen an deutschen technischen Universitäten aufwendiger und wesentlich projektspezifischer: zu meiner Zeit wurde ein ganzer Bahnhof mit allen Gleisen konzipiert und konstruiert, oder ich musste ein kleines Wohnhaus im ganzen Rohbau entwerfen.

Der Vorteil des amerikanischen Systems neben der kleinen Studentenzahlen pro Professor ist, dass durch regelmäßige Examen mindestens alle zwei Monate der Professor mit den Studenten direkten Kontakt hat, und da auch Anwesenheitspflicht besteht, ist in Amerika eine geregeltere Betreuung möglich, und Schwächen des einzelnen Studenten können eher erkannt werden –möglicherweise kann der nicht ausreichend Begabte auch frühzeitig zur Selbsteinsicht gelangen, dass dieses Studium nicht das für ihn richtige ist. Die Anzahl der Studenten ohne Abschluss ist zwar in den USA auch hoch, aber nur wenige werden erst nach dem 2. oder gar 4. Semester ausgeschieden, wie das bei uns der Fall ist. Der Nachteil dieses Systems ist, dass der Student sich von Examen zu Examen hangelt: er lernt für die Arbeit zum nächsten Examen, dann wird der Kopf freigemacht für die nächste Prüfungsvorbereitung. Mit dem Ergebnis, dass manche Studenten ungehal-

ten sind, wenn der Stoff des vorigen Examens noch mal zu einem späteren Zeitpunkt abgefragt wird, weil sie ihn längst vergessen haben....

Auch Graduate Students müssen in den USA einen gewissen Anteil an Vorlesungen erfolgreich absolvieren. Ihre Lehrpläne werden in Absprache mit dem Advisor aus Spezialvorlesungen verschiedener Fakultäten zusammengestellt: in Ft.Collins mussten z.B. Bauingenieure mathematische Spezialvorlesung zusammen mit Mathematikern hören, z.B. über Potential Theorie oder Computertheorie, wie auch ein oder zwei allgemeinbildende Vorlesungen, die von Geisteswissenschaftlern gehalten wurden. Vor allem an der Ausbildung für die Graduate students – MS und PhD Candidates - sind auch die Forschungsprofessoren beteiligt. Diese sind in den Ingenieur fakultäten mehr oder minder selbständige Karriereforscher, die sich nach der Promotion durch die Ränge hochgearbeitet haben. Ehe der junge Professor die akademische Laufbahn einschlug, war er Graduate Student gewesen und hatte, ständig unter Aufsicht, unter einem Professor gearbeitet, dessen Ideen er im Wesentlichen ausführte. Erst nach Abschluss der Promotion wird er wirklich selbständig, und dann erst betreibt der begabte Dozent, meistens auf seiner Dissertation aufbauend, eigenständige Forschung - die er, zumindest im experimentellen Teil, im Wesentlichen durch seine Graduate Students durchführen lässt. Im Gegensatz zum deutschen Ordinarius und Institutsleiter ist der Umfang an administrativen Aufgaben gering, sie bestehen im Wesentlichen in der Einwerbung und Verwaltung von Forschungsgeldern. Alle weiteren administrativen Aufgaben werden von Dean und Department Head erledigt.

Mit Kollegen anderer Universitäten, die ähnliche Forschung betreiben, verbindet den amerikanischen (Forschungs-) Professor ein reger Austausch über zahlreiche nationale und internationale Konferenzen, der sich in gegenseitiger Befruchtung (und gegenseitigem Zitieren) niederschlägt. Die Lehre spielt in der Karriereplanung kaum eine Rolle – die eifrige Einwerbung von Drittmitteln und die Umsetzung von kleinsten Fortschritten bei Forschungsergebnissen in Zeitschriftenartikel nehmen einen so großen Teil der Arbeitszeit des Professors in Anspruch, dass auch Graduate Students die Vorlesungen halten müssen. Es entstand hier das heute auch bei uns geförderte Auseinanderklaffen von Forschung und Lehre: die Forschung mit möglichst vielen Veröffentlichungen in sogenannten „peer re-

viewed journals“ ist das Maß für die Qualität des Professors, die Summe der Beiträge aller Professoren das Maß für die Qualität der Universität. Die Lehre ist daneben für die Karriere von untergeordneter Bedeutung und hat, wie ich an meiner eigenen Karriere oben zeigte, weder direkten Einfluss auf die Forschung, noch hatte die Forschung einen Einfluss auf die Lehre – höchstens im kleinen Kreise der Graduate Students wurden Forschungsergebnisse diskutiert. Das ist auch dadurch bedingt, dass die Forschung in den amerikanischen Ingenieur fakultäten fast überall wenig mit der Praxis zu tun hat, während es insbesondere in der Ausbildung der Undergraduates ausschließlich darum geht, die jungen Studenten für den Beruf zu qualifizieren, wobei im Regelfall Textbooks erfahrener Experten verwendet und auch durchgearbeitet werden. Auch ich habe in Amerika immer Textbooks für Begleitung der Vorlesungen verwendet, allerdings ergänzt durch eigenes Material.

Dagegen bietet die deutsche Technische Universität fast ein Kontrastprogramm. Da ist zunächst der grundsätzliche Unterschied in der Organisationsform der Universitäten: die deutschen Universitäten sind fast ausschließlich aus Steuergeldern finanziert und stehen unter der allgemeinen Aufsicht der zuständigen Ministerien der Länder. Weil sie staatlich finanziert sind, brauchen sie keine Werbungsprogramme, aber sie unterliegen hinsichtlich Finanzierung und Setzung von Schwerpunkten dem Mandat der Politik, und die Finanzierung der Universitäten steht in Konkurrenz zu allen anderen fiskalischen Aufgaben des Staates. Sie haben ihren gesellschaftlichen Auftrag allein im Bereich Bildung und Ausbildung. Da politisch gewollt die Studiengebühren niedrig (oder gleich null) sind, beschränkt sich die Betreuung der Studenten auf das Wesentlichste, und weil auch das extracurriculäre Leben wenig mit der Universität zu tun hat, ist auch die Bindung an die Universität nach Abschluss des Studiums entsprechend gering.

Der wichtigste Unterschied besteht aber (insbesondere in den Ingenieur fächern) in der Rolle der Professoren. Es gibt vergleichsweise wenig Professoren, (daraus ergeben sich Vorlesungen mit sehr vielen Zuhörern). Während meiner Studienzeit in den 50-er Jahren war in der Regel der deutsche Professor in einer Ingenieur fakultät ein erfahrener Fachmann, der sich seine wissenschaftlichen und praktischen Sporen als Mitarbeiter oder

Assistent an einem Lehrstuhl verdient hatte, dann nach der Promotion oder auch etwas später in die Praxis gegangen ist, um dort relativ bald eine Führungsposition zu übernehmen. Dann kehrt er nach einer längeren Anzahl von Jahren als erfolgreicher und ausgewiesener Fachmann an die Universität zurück als Nachfolger eines sein Gebiet vertretenden Ordinarius, und er würzt seine Lehre mit seinen praktischen Erfahrungen, oft in ausführlichen Anekdoten. Er ist in Forschung und Lehre vollständig frei und bringt aus der Praxis ein Bündel von offenen Fragen mit, die er durch seine Forschung mit seinen vom Staat bezahlten Assistenten beantworten will. Er erweitert seine Forschungstätigkeit den Bedürfnissen der Praxis entsprechend, mit der er durch Beratertätigkeit weiter verbunden bleibt. Die Promotion der Mitarbeiter war von sekundärer Bedeutung, sie suchten sich meistens selbst ein Thema aus, das sie nach Rücksprache mit dem Ordinarius selbständig bearbeiteten.

Zu Beginn meiner Tätigkeit in Karlsruhe hatte sich die Situation bereits etwas verändert. Der Professor entsprach dadurch noch dem alten System, dass er in der Regel umfangreiche Berufserfahrung von außerhalb der Universität mitbrachte (bei theoretischen Lehrgebieten allerdings nur in Ausnahmefällen). Heute wird eher auch ein Forscher mit fehlender Praxis (die sein amerikanischer Kollege sowieso nicht hat) zum Professor berufen. Er wird nach wissenschaftlichen Verdiensten ausgewählt (Fähigkeit zum Einwerben von Drittmitteln, Anzahl der Veröffentlichungen oder Leistungen in der Industrie) – auch in Deutschland wird die Lehre zur Nebensache. Wie auch früher wird er (oder sie) nach dem Dienstantritt an der Universität ein Kleinunternehmer, der neben seiner fachspezifischen Lehre ein umfangreiches Gutachten und Forschungsprogramm unterhält. Ist er darüber hinaus Institutsleiter – was Ordinarien in der Regel sind - muss er auch für seine Mitarbeiter Verantwortung übernehmen, in dem er dafür sorgt, dass genügend Forschungsmittel eingeworben werden, um alle immer zu bezahlen. Das bedeutet, dass üblicherweise das Thema des Projektes vom Professor vorgegeben und das Projekt selber von Mitarbeitern/Doktoranden bearbeitet wird. Diese Vorgehensweise hat ganz meinen Veranlagungen entsprochen und mir die Möglichkeit gegeben, ein Forschungsprogramm nach meinen Vorstellungen zu gestalten und bearbeiten zu lassen. Dazu kommt neben dem Halten von Vorlesungen die Beteiligung an der Selbstverwaltung der Universität: Verwaltung des Instituts (in meinem Fall durch aus-

gezeichnete Oberingenieure und durch die Institutssekretärin *Margarethe Heller-Moussa* bewältigt) - Fakultät und Fakultätsrat (je zwei Jahre war ich z.B. Dekan und Prodekan) und gegebenenfalls (wie es bei mir 12 Jahre der Fall war: Mitglied des Senates), und eine umfangreiche Begutachtungs- und Beratungspraxis: Beratung von Industrie und Behörden, Gutachten bei Gericht oder über die Veröffentlichungen und Forschungsanträge anderer Forscher, über Personalien, und über Programme (bei der DFG oder bei Ministerien). Es ist kein Wunder, dass Forschung hauptsächlich durch Mitarbeiter: Doktoranden und Assistenten durchgeführt wird!

Mir scheint, dass eine ideale Technische Universität, die die besten Seiten des amerikanischen und des deutschen (oder europäischen?) Ausbildungssystems zusammenführt, aus Traditionsgründen und wegen mangelnder Erfahrung der maßgeblichen Personen kaum zu verwirklichen ist. Ein günstiger Ansatz zu einer solchen Symbiose schien mir das Asian Institut of Technology (das AIT in Bangkok) in den 70-er und 80-er Jahren zu bieten.²⁴⁶ Am AIT wirkten in den ersten Jahren amerikanische und europäische Professoren – darunter viele Deutsche –gemeinsam und versuchten den Spagat zwischen deutschem und amerikanischen System.

ANHANG 3: ENDVERWEISE

1 Ich selber habe sehr viele wissenschaftliche Arbeiten begutachtet – für praktisch alle bekannten und auch für viele weniger bekannte Zeitschriften meiner Fachgebiete. Dabei bin ich immer von dem Prinzip ausgegangen, dass es die Aufgabe des Gutachters ist, die Arbeit des Autors zu verbessern: bei schlechter Qualität *gut* begründet abzulehnen, bei guter Qualität Fehler zu korrigieren, auf andere Referenzen hinzuweisen, und Klarstellungen zu fordern oder vorzuschlagen – nicht aber, den Inhalt zu verändern. Diese Regeln werden, wie ich gelegentlich selber erfahren musste, nicht von allen Gutachtern geteilt.

2 *Hunter Rouse* hatte in den 30-er Jahren des 20. Jahrhunderts in Karlsruhe promoviert, allerdings nicht im Wasserbau, sondern beim Ordinarius für Strömungsmaschinen Prof. *W.Spannhake*, und ging dann als junger Professor an das California Institute for Technology (Cal-Tech) zu *Vito Vanoni*, der das erste Buch über Geschiebetransport geschrieben hat und *Hunter Rouse* zur Bearbeitung des Problems des Schwebstofftransports veranlasste. *Hunter Rouse* erhielt dann einen Ruf nach Iowa City an die University of Iowa, wo er ein hochangesehenes Forschungsinstitut, das Iowa Institut for Hydraulic Research aufbaute. Meine CSU Professoren *Maurice Albertson* und *James Barton*, wie auch *Lin Bingnan* waren seine Schüler – später auch *Eduard Naudascher* aus Karlsruhe. In den 70-Jahren haben *Eduard Naudascher* (der einige Jahre als Associate Professor in Iowa verbrachte) und ich sehr viel mit *Hunter Rouse* zu tun gehabt, dem in Karlsruhe der Titel eines Ehrendoktors verliehen wurde, und der dann viele Monate an der Universität Karlsruhe verbrachte: er wurde Gabriele und mir ein guter Freund.

3 Seine und seiner Mitarbeiter Erkenntnisse gab er weiter in den Iowa Hydraulics Conferences in Iowa City, an deren vierter (und letzten) im Jahr 1956 ich als CSU Graduate Student teilnehmen konnte. Ich machte damals *Hunter Rouse* den Vorschlag, sein Buch „Elementary Fluid Mechanics“ ins Deutsche zu übersetzen, aber er wiegelte ab: die Bücher von *Ludwig Prandtl* seien viel besser und schon in Deutsch vorhanden. Tatsächlich ist der strömungsmechanische Beitrag in Prandtls Buch überzeugend, es fehlt aber der Bezug zur Hydraulik. Umgekehrt fehlte die strömungsmechanische Komponente in der kompakten Darstellung der praktischen Hydraulik im Kapitel von *Böss* in Schleichers deutschem „Handbuch für Bauingenieu-

re“, das mir in meiner Stuttgarter Studienzeit nicht bekannt war, mir aber heute noch als glänzend geeignet erscheint als Basis in der Bauingenieurpraxis, weil die Grundlagen und die daraus abgeleiteten Formeln für die Praxis dort sehr viel genauer als in *Rouse's* Buch dargestellt sind.

4 Ich habe später mich auch sehr viel mit anderen Themen der Strömungsmechanik befasst, so z.B. mit der Turbulenztheorie - einen großen praktischen Wert habe ich daraus nicht gezogen, nur die grundsätzliche Idee der virtuellen Schubspannung (oder Diffusivität, oder Wärmeleitfähigkeit) habe ich daraus in meine Praxis übernehmen können.

5 *Harry Liu* war ein Absolvent der University of Minnesota und hatte unter *Alvin Anderson* promoviert, der durch eine Arbeit zur Riffelbildung bekannt geworden war. *Harry Liu* blieb bis 1959 in Ft. Collins, nahm dann einen Ruf an die University of California an, wo er aber nie ankam: er verunglückte tödlich auf dem Weg zu seinem neuen Arbeitsplatz.

6 Liu, H. K., J. N. Bradley, and E.J. Plate (1957): Backwater Effects of Piers and Abutments. Colorado State University, Civil Engineering Section, Report CER57HKL10 October 1957. 364 pp

7 Das Manuskript der Vorlesung wurde später in Deutschland als Heft 1 der Institutsmittelungen in deutscher Sprache veröffentlicht (siehe Endnote 16).

8 Plate, E.J., 1993: Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure. (685 Seiten). Berlin: Verlag Ernst & Sohn

9 Den Ansatz über Kontrollvolumen habe ich in Karlsruhe, als theoretische Stütze für den Sonderforschungsbereich 80, in einer neu entwickelten Vorlesung als Grundlage verwendet. Diese Vorlesung sollte später auch die Grundlage bilden für ein Buch über turbulente Transportvorgänge, das allerdings nur in einer unfertigen Form vorliegt - und nie abgeschlossen wird, da ich mich scheue, noch ein notwendiges Literaturstudium durchzuführen: ein Buch über ein wissenschaftliches Thema muss aber den Stand des Wissens wiedergeben und zu viel ist international zu diesen Themen in den Jahren geschrieben worden, seit ich den Schwerpunkt der Institutstätigkeit auf die Hydrologie (und Gebäudeaerodynamik) legte.

10 Eine Episode möchte ich erzählen, die sich hieraus ergab. Ich war etwa 1972 nach Thailand ans Asian Institute of Technology eingeladen, und wollte mich, ehe ich ans AIT aufbrach, in Bangkok etwas umsehen. Ich kannte niemand in Bangkok und erinnerte mich an meinen früheren Studenten *Anat Arbhahirama*, der am AIT eine Rolle spielte und kündigte mich an –erhielt aber keine Antwort. Wie ich aber in Bangkok ankam, wurde ich wortlos von zwei stämmigen uniformierten Typen abgeholt und direkt durch die Menschenmassen an allen Zoll und Anmeldestellen vorbei abgeführt. Mein Schrecken klärte sich in angenehme Überraschung, als ich in ein VIP Zimmer geführt wurde, wo ich von meinem *Anat* höflich zu einem opulenten Mittagmahl (es muss natürlich opulent gewesen sein, aber ich erinnere mich nicht an Details) eingeladen wurde, das wir in angenehmem Austausch von Erinnerungen an Ft.Collins genossen. Er war inzwischen gerade Minister in einer der häufig wechselnden Thai Regierungen geworden.

11 *Phil Gustavson* muss auch zugestimmt haben, als man mir 1974 das Angebot machte, nach Argonne als Assistant Director zurückzukehren, mit der Aufgabe, eine eigene Division aufzubauen (siehe Endnote 13).

12 Plate, E.J., 1971: Aerodynamic Characteristics of Atmospheric Boundary Layers. Oak Ridge, Tenn. Report US Atomic Energy Commission.

13 Obwohl bei unserem Abschied von Argonne vieles, was ich begonnen hatte, unvollkommen geblieben war, muss ich doch wohl einen recht guten Eindruck gemacht haben, denn noch wenige Jahre später (im Jahr 1974) erhielt ich die Einladung, als Associate Division Director an das ANL zurückzukehren – mit der Maßgabe, eine Division aufzubauen, deren Direktor ich werden sollte. Nur mit größtem Bedauern sagte ich ab – wir waren inzwischen so fest in Karlsruhe integriert, dass wir einen nochmaligen Wechsel vor allem auch aus familiären Gründen nicht mehr wollten – immerhin aber brachte dieses Angebot mir zu meiner Verwunderung eine Verbesserung meiner Bezüge vom Land Baden-Württemberg ein!

14 Der Mitarbeiter hieß *Walter Bleines*. Er hatte sich auf Grundwasser und landwirtschaftlichen Wasserbau spezialisiert und war ein unglaublich versierter Kenner der wasserwirtschaftlichen Verhältnisse Badens. (Wie ich später gehört habe, war der Lehrstuhl Wasserbau III eigentlich für ihn geplant worden, aber er kam dann gar nicht auf die Berufungsliste). Er war ein bescheidener Mann, der seine hervorragenden Kenntnisse über Drai-

nagesysteme u.Ä. in einfachen für den Praktiker bestimmten Heften niederlegte. Er starb 1974 in meiner Amtszeit als Dekan.

15 Krasse Meinungsverschiedenheiten über meine Rolle im Gesamtgebiet Wasserbau führten bald nach meinem Dienstantritt zur Distanzierung von *Eduard Naudascher*, und in späteren Jahren konnte ich besser mit Prof. *Emil Mosonyi* arbeiten als mit ihm. Dennoch habe ich ihn wegen seiner Zielstrebigkeit – in Extremsituationen auch Hartnäckigkeit – und der Qualität seiner Arbeit immer sehr geschätzt. Unsere offiziellen Meinungsverschiedenheiten haben uns zwar oft sehr viel Ärger gemacht, aber ohne, wie ich glaube, die gegenseitige Wertschätzung zu beeinträchtigen. Seine Bücher über „Flow induced vibrations“ und „Gerinnehydraulik“ werden Standards bleiben, mit denen sich auch zukünftige Hydrauliker, die an den Grundlagen noch interessiert sind, auseinandersetzen müssen.

Naudascher wandte sich ziemlich bald von der aktiven Beteiligung an der Gestaltung des Wasserbaus sowohl im nationalen als auch im internationalen Bereich ab, er konzentrierte sich auf seine engeren Forschungsinteressen, beteiligte sich durch exzellente Beiträge seiner Mitarbeiter am zweiten SFB 210, der dann unter meiner Leitung stand und nicht so produktiv wie der erste SFB 80 war. *Ed Naudascher* überließ es mir, Deutschland prominent im IAHR zu vertreten. Sein Interesse wandte sich der Technikfolgenforschung zu, und er wurde ein Gegner großer Wasserbauten, was er auch laut verkündete – was wegen der scheinbar undifferenzierten Verdammung von Großbauwerken von vielen als Nestbeschmutzung gewertet wurde. Ich habe aber die durchaus berechtigte Kritik an manchen aus politischen Gründen entstandenen Wasserbauwerken sehr gut verstanden (und geteilt), die ohne ausreichende Voruntersuchungen von Wasserdarbot und Wasserbedarf insbesondere in Entwicklungsländern erstellt worden sind: ich habe mit Staunen festgestellt, wie oft in solchen Ländern Staudämme auf der Basis gänzlich unzureichender hydrologischer und wirtschaftlicher Voruntersuchungen gebaut wurden, weil es die Politik so wollte – die der betroffenen Länder wie auch die der Geberländer, deren große Baufirmen dann den Bauauftrag bekamen. So sagte mir *Jan Veltrup* - Chief Engineer der U.S. Firma Harza Engineering, dass er in seiner 20 jährigen Karriere mehr als 300 Staudämme gebaut hat. (*Jan Veltrup* war mit mir am COWAR Bericht: „Water in our common future“ beteiligt).

¹⁶ Plate, E.J., 1971: Analyse kontinuierlicher Zufallsfunktionen. Univ. Karlsruhe, Institut Wasserbau III, Mitteilungen H. 1, 1971.

-
- ¹⁷ Plate, E.J., 1979: Extreme value models. In: Input for Risk Analysis in Water Resources. Proc. of the Int. Symp. on Risk and Reliability in Water Resources, Waterloo, Ont., Canada, June 26-28,1978. Fort Collins, Col.: Water Res. Publ. 1979, pp. 3 – 26. [\(1979 Extreme values Waterloo.pdf\)](#)
- ¹⁸ Plate, E.J., 1977: Intermittent processes and conditional sampling. In: Stochastic Processes in Water Resources Engineering, Proc.2nd International IAHR Symposium on Stochastic Hydraulics, Lund, Sweden, Aug. 2-4, 1977. L. Gottschalk et al. (Eds.): Fort Collins, Col.: Water Resources Publications. 1977. S. 3 - 29 [\(1977 Intermittent Processes Lund.pdf\)](#)
- ¹⁹ Plate, E.J., 1986: Multivariate analysis of rainfall processes. In: Multivariate Analysis of Hydrologic Processes. Proc. of 4th Internat. Hydrology Symposium, July 15-17, 1985. Eds.: H.W. Shen et al. Fort Collins, Col.: CSU. 1986. pp.66-87 [\(1985 Rainfall fields Ft-Collins. pdf\)](#)

²⁰ IAHR war damals die einzige und sehr angesehene internationale Vertretung der Hydraulikforscher, mit mehreren Tausend Mitgliedern in aller Welt, getragen durch Mitgliedsbeiträge, aber vor allem durch die Beiträge der großen Hydrauliklaboratorien der Welt, mit alle 2 Jahre stattfindenden internationalen Kongressen - der erste fand 1935 in Berlin statt. Das Sekretariat der IAHR war seit Anbeginn im Delfter Hydraulik Laboratorium angesiedelt, und der Direktor des Labors war automatisch der Executive Secretary. In den 70-ger Jahren war dies *Harold Schoemaker*, der mir im Laufe der Zeit ein guter Freund wurde. Das war insofern bemerkenswert, als er mir einmal nach dem Kongress 1977 gestand, dass er sich geschworen hatte, nach den Gräueltaten der deutschen Wehrmacht im 2. Weltkrieg nie wieder etwas mit Deutschen zu tun haben zu wollen, und der deswegen lange gegen die Wiederaufnahme der Deutschen in IAHR gestimmt hatte – aber unter dem Eindruck der Erfahrungen der letzten Jahre seine Meinung geändert habe. Später kamen wir oft zusammen, - mein letzter Besuch war Ende der 90-ger Jahre in Delft –er konnte nur noch durch eine Art Fernglas lesen- und in seinem letzten Brief beklagte er, dass die großen Verdienste der frühen deutschen Wasserbauer nicht angemessen gewürdigt werden!

21 *Theodor Rehbock*, der damals bereits lang emeritierte Karlsruher Mitgründer der IAHR, beschwerte sich in einem Brief an das Sekretariat bitter hierüber, er wehrte sich gegen die Kollektivschuld. Sein Nachfolger *Wittmann* auf dem Wasserbaulehrstuhl in Karlsruhe allerdings konnte sein Amt trotz einer sehr eindeutigen nationalsozialistischen Vergangenheit weiter behalten bis in die 60-er Jahre.

22 Der IAHR Congress in Baden – Baden war sicherlich einer der glanzvollsten Konferenzen, an denen ich je teilnehmen konnte. Das neuerbaute Kongresszentrum in Baden-Baden war noch nicht ausgebucht, und die Betreiber gaben uns günstige Konditionen – Forscher, im Gegensatz zu Praktikern, verfügen über sehr geringe Etats für den Besuch an Tagungen, und Beiträge waren in jenen Tagen sehr niedrig. Ohne Unterstützung – in unserem Falle durch Stadt Baden-Baden, Verkehrsministerium des Bundes und Land Baden – Württemberg, die sich an den Kosten beteiligten, hätten wir den glänzenden Rahmen mit festlichem Dinner im Kurhaus und Festkonzert in und Exkursion nach Heidelberg nicht bieten können. Ebenso wichtig war der großartige Einsatz aller Mitarbeiter, einschließlich ihrer Frauen, die unter Leitung meiner Frau für ein ansprechendes Damen-Programm sorgten. Bei der Bewältigung dieses Kongresses zeigte mein damals ganz neuer Oberingenieur *Bertold Treiber* (unterstützt vom Betriebsingenieur *Jürgen Loeser*) sein großes organisatorisches Talent, das ihm später in seiner weiteren Laufbahn als Bürgermeister von Rheinstetten (statt einer akademischen Karriere mit einem abgelehnten Ruf auf einen Lehrstuhl in Berlin) mehr half als seine vorzüglichen wissenschaftlichen Arbeiten.

23 Und diese Arbeit wurde mir so wichtig, dass ich sogar in den ersten 2 Jahren nach meinem Eintritt in den Ruhestand (1998 bis 2000) die Aufgabe eines „Acting Secretary General“ übernahm (nach Sekretär *Henk – Jan Overbeck*, der nicht nur Nachfolger von *Egbert Prins* als Direktor des Delft Hydraulic Labor, sondern auch dessen Nachfolger beim IAHR wurde). Allerdings gelang es uns, für die IAHR Verwaltung einen neuen Träger in dem Madrider Labor CEDIM zu finden – eine Lösung, die sich seitdem bewährt hat. Das war unter der Präsidentschaft von *Helmut Kobus*, und gemeinsam suchten wir dann auch einen permanenten und hauptamtlichen Sekretär, der dann in dem Engländer *Chris George* gefunden wurde.

24 *Jack F. Kennedy* (mit dem mich später eine jahrelange Freundschaft über die IAHR verband: er war mein Vorgänger als Präsident, von 1980 – 84)

promovierte am MIT bei *Arthur Ippen* und wurde in sehr jungen Jahren Nachfolger von *Hunter Rouse* und Direktor des Iowa Institute of Hydraulic Research (IIHR). Er war *Naudascher* und mir freundschaftlich sehr verbunden, war ein Festredner bei der Feier der 60. Geburtstage (1989) der vier Karlsruher Kollegen: *Hartmann, Naudascher, Plate* und *Larsen*. Damals war er schon von dem Krebsleiden gezeichnet, an welchem er wenige Jahre später starb. Bei einem Erinnerungskolloquium an *Jack Kennedy* im Jahre 1995 habe ich einen Vortrag halten dürfen, in dem ich an zwei Beispielen diskutiert habe, wie Hydraulik und Hydrologie sich gegenseitig ergänzen:

Plate, E.J., 1995: Hydrology and hydraulics: Partners in design of hydraulic systems. In: Issues and Directions in Hydraulics, Kennedy Memorial Conference, May 1995, Iowa City, Iowa, USA. T. Nakato, R. Ettema (eds):. Rotterdam: Balkema 1996, S.361 – 368 [\(1996 Iowa Hydrology u Hydraul.pdf\)](#)

25 *Egbert Prins* war viele Jahre lang Direktor des angesehenen Delft Hydraulic Laboratories in Delft, Niederlande. Ihm wie mir war die Gemeinschaft der Hydrauliker der Welt ein ganz wichtiges Anliegen. Wir blieben Freunde, auch nachdem er sein Amt aus Altersgründen abgeben musste.

26 *Yoshiaki Iwasa*, Professor für Hydraulik in Kyoto, war die „Graue Eminenz“ der im IAHR vertretenen japanischen Hydrauliker. Mit ihm und seiner Frau *Yu* entwickelte sich eine Freundschaft, die zu häufigen gegenseitigen Besuchen führte. Er war auch maßgeblich daran beteiligt (vermute ich), dass ich im Jahr 1986 ein Stipendium der Japan Society for the Promotion of Science (JPS) für einen mehrmonatigen Japanaufenthalt erhielt. Ich entschied mich aber, diesen Aufenthalt nicht in Kyoto zu verbringen, sondern halb in Fukuoka bei *Hisashi Mitsuyasu*, dem ich freundschaftlich verbunden blieb bis heute (um dort in Ruhe arbeiten zu können), und halb in Tokyo, bei Prof. *Nobiyuki Tamai* – auch dieser ein Freund und darüber hinaus einer meiner Nachfolger als Präsident der IAHR.

27 Plate, E.J., 1991: The Promotion of water science in developing countries: Are international professional societies up to the challenge? In: International Symposium to commemorate the 25 years of IHD/IHP, Unesco, 15-17 March 1990, Paris. Unesco 1991, pp. 127–133 [\(1991 IHP 25 Jahre.pdf\)](#)

28 Plate, E.J., 1995: Wasserforschung und internationale Zusammenarbeit. In H.Kobus & U.de Haar: Perspektiven der Wasserforschung. Mitteilung 14 der Senatskomm. f. Wasserforschung der Deutschen Forschungsgemeinschaft, S. 71 – 86, Wiley-VCH, Weinheim (1995 DFG Perspektiven der Wasserforschung.pdf)

29 Plate, E.J. 1984: Engineering and Environment. Festvortrag, gehalten anlässlich des IAHR Symposiums on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, Esslingen, Sept. 3-6,1984, (1984 Festvortrag Esslingen.pdf)

30 Plate, E.J., 1987: Die Wasserwirtschaft der Zukunft - eine Herausforderung an die Universitäten. In: Wasserwirtschaft, Jg. 77, 1987, H. 1, pp. 5 - 12

31 Plate, E. J. 2000: Wasserbau und Wasserwirtschaft im Wandel der Zeiten. In: 100-Jahr-Feier des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Mitteilungen H. 112, (2000), Inst. f. Wasserbau u. Wasserwirtschaft, Techn. Univ. Darmstadt, S. 7 – 25 (2000 Festvortrag Wasserbau Darmstadt.pdf)

32 *Vujica Yevjevich* war ein serbischer Hydrauliker, der nach einer erfolgreichen Karriere in der jugoslawischen Wasserwirtschaftsverwaltung nach dem 2. Weltkrieg nach den USA ausgewandert war, um dort zunächst für den US Geological Survey zu arbeiten. Er entschloss sich aber in den frühen 60-er Jahren die Universitätslaufbahn einzuschlagen und wurde an der CSU mit offenen Armen aufgenommen, wo er ein Programm in moderner Hydraulik entwickelte, dem viele der heute (noch) führenden Hydrologen der USA – *Ignacio Rodriguez –Iturbe, Rafael Bras*, um nur zwei zu nennen, ihre Grundausbildung verdankten. *Vujicas* Engagement hat mir eigentlich erst den Eindruck vermittelt, dass Hydrologie ein wichtiges Gebiet ist, mit dem es sich zu befassen lohnt. Er hat dann mit Interesse die Entwicklung unseres Karlsruher Programms verfolgt, besuchte uns mehrmals, hielt auch den einen oder anderen Vortrag in Karlsruhe und bei einem längeren Aufenthalt in Ft. Collins durfte Rele und ich seine und seiner Frau Gäste sein.

33 *Dean Peterson* war Department Head des Department of Civil Engineering an der CSU, siehe hierzu den Hinweis in meinen Erinnerungen.

34 Bereits gleich nach der Berufung an die Uni Karlsruhe hatte ich mich in den deutschen Fachzeitschriften umgesehen, um festzustellen, wer denn in Deutschland eine moderne Hydrologie betreibt. In den Fachzeitschriften fand ich nur ein oder zwei Artikel zur hydrologischen Modellierung (das HYREUN - Verfahren) von einem jungen Hydrologen namens *Gert A. Schultz*, der sich in Südafrika unter dem Einfluss von *Desmond Midgley* mit der Thematik befasst hatte. Er war inzwischen, nach der Promotion in München bei Prof. *Hartung*, in das Ingenieurbüro Kallweit – Bjoernsen eingetreten, von wo ich ihn als ersten Oberingenieur meines Instituts abwarb. In Zusammenarbeit entwickelten wir dann Hydrologische Grundlagen und wendeten diese und einfache OR Methoden in der Wasserwirtschaft an, und nachdem *Gert* im Jahre 1977 die Professor für Hydrologie und Wasserwirtschaft in Bochum übernahm, habe ich alle Aufgaben in der Hydrologie selbst übernommen

35 Eine Ausnahme gab es: ein Kollege aus dem Maschinenbau hatte ein Gerät namens „Aquapik“ erfunden und entwickelt: einen Zahnreinigungsapparat, der einen pulsierenden Wasserstrahl erzeugt. Das Gerät funktionierte, aber für die Patentanmeldung musste die Funktionsweise erklärt werden. Das gelang dem Erfinder nicht, und ich wurde gefragt, ob ich ihm helfen könnte. Ich tat es unter Verwendung meiner Druckstoßerfahrungen und stellte die entsprechend Berechnung auf – dafür erhielt ich 50\$. Das Gerät hatte großen Erfolg, der Erfinder verkaufte einige Jahre später die für dies Gerät gebaute Fabrik in Ft. Collins für viele Millionen US\$ an einen Investor!

36 Plate, E.J., Heidt, F.D., 1983: Pressure loads on a cooling water pump caused by an aeroplane crash into the water. In: XX. IAHR-Congress, Moscow USSR, Sept. 5-9, 1983, Proc., Subject C, Vol. IV, pp. 348-357 [\(1983 IAHR Moscow Flugzeugabsturz.pdf\)](#)

37 Plate, E.J., Bennett, J., 1969: Rotary flow meter as a turbulence transducer. In: Journal of the Engineering Mechanics Div., ASCE Vol.95, 1969, No.6 , pp.1307-1329

38 Das St. Anthony Falls Laboratory war damals sicherlich das bedeutendste universitäre Versuchslabor für Wasserbauwerke in den USA (neben dem Iowa Institute of Hydraulic Research in Iowa City, Iowa als bedeutendster Forschungsanstalt). Damals war *Lorenz Straub* der Leiter des Labors, ein anerkannter Praktiker mit engen Verbindungen zum Corps of Engineers,

und *Anderson* war dort vor allem für Experimente zuständig. Ich lernte *Anderson* später einmal kennen: er hatte seine Dissertation zum Thema Geschieberiffelentstehung geschrieben und sich dabei auf eine Generierung der Riffel durch Schwerewellen festgelegt –eine These, die auch *Jack F. Kennedy* in seiner Dissertation verwendete. In seiner Dissertation sollte *H.K.Liu* die experimentellen Nachweise für die Gültigkeit von *Andersons* Theorie liefern.

39 Plate, E.J., 1957: Laboratory Studies on the Beginning of Sediment Ripple Formation in an Alluvial Channel. Unpublished MS Thesis, Dept. of Civil Engineering, Colorado State Univ., Fort Collins

40 Plate, E.J (1961).: Berechnung des Konzentrationsverlaufs infolge einer Schadstoffmenge in einem fließenden Gewässer (1961 Geschichte.pdf)

⁴¹ *Bill Sayre* und seine finnische Frau *Roksa* gehörten bereits in der Zeit des Studiums in den 50-er Jahren zu unseren Bekannten. Er wurde auch, wie ich, von *A.R. Chamberlain* als Wissenschaftler angelockt, entschied sich aber nach kurzer Zeit, zum USGS überzuwechseln. Etwa 1961 holte ihn *J.F.Kennedy*, der gerade erst ernannte neue Leiter des Iowa Instituts of Hydraulic Research nach Iowa City, wo er seine Forschungen zur Geschiebediffusion fortsetzte. Wenige Jahre später starb er an einem Herzinfarkt, den er infolge der Anstrengung bei einer Rettungsaktion anlässlich eines Skiunfalls in den Rocky Mountains erlitt.

42 *Kitta Ranga Raju* war als junger Professor der Indischen Universität Roorkee auf Empfehlung seines Mentors *Ram Garde*, im Rahmen des SFB 80 für ein Jahr nach Karlsruhe gekommen. *Garde* war ein Studienkollege in Ft. Collins und inzwischen als Professor in Roorkee zu einem der angesehensten Hydrauliker des Landes aufgestiegen. Wir hielten nach dem Studium einen losen Kontakt, und so wurde ich z.B anlässlich seines 70. Geburtstags nach Roorkee eingeladen.

43 *Hsieh Wen(Sherwin) Shen* war ein chinesischer Doktorand von *Hans Albert Einstein* in Berkeley, wo er ca. 1960 promovierte. Er stammte aus einer vornehmen chinesischen Familie, die den Nationalchinesen um *Chiangkai Chek* nahestand. Wie viele vornehme Chinesen wurde auch er nach Amerika beordert, um aus dem politisch unsicheren China zu entkommen. Er

konzentrierte sich – wie sein Mentor – auf Geschiebetransport, und wurde erst Professor in Ft. Collins, wo wir uns anfreundeten, um dann nach dem Ausscheiden *Einsteins* dessen Nachfolger in Berkeley zu werden. Wir luden ihn einmal ein, in Karlsruhe sein Sabbatical Year zu verbringen. Er kam, – aber nur kurz: denn seine Frau *Claire* wurde am Campus von einem groben Radfahrer angefahren, was ihr den Spaß an Deutschland verdarb. Wir blieben aber freundschaftlich verbunden und verbrachten in den 90-er Jahren ein paar schöne Tage bei ihnen (vorm IAHR Kongress im August in San Francisco 1997).

44 Plate, E.J., 1974: Hydraulik zweidimensionaler Dichteströmungen. Univ. Karlsruhe, Institut Wasserbau III, Mitteilungen H. 3, 1974. Dass. in: SFB 80, Univ. Karlsruhe, SFB80/ET/40, Juli 1974

45 *Richard Denton* kam zu uns aus Neuseeland, wo *Ian Wood* an der University of Canterbury, in Christchurch, ein Forschungsprogramm über Schichtenströmungen eingeführt hatte, in welchem *Denton* promoviert hat. Wir konnten ihm eine Postdoktorstelle im Rahmen des SFBs anbieten, und er blieb 2 Jahre, um dann eine Stelle an der University of California, in Berkeley anzunehmen.

46 Denton, R.A., Faust, K.M., Plate, E.J., 1981: Aspects of Stratified Flow in Man-Made Reservoirs. Univ. Karlsruhe, Institut Wasserbau III, Mitteilungen H. 20, 1981

47 Der SFB 210: „Strömungsmechanische Bemessungsgrundlagen für Bauwerke“ war unser von mir konzipiertes Folgeprojekt zum SFB 80 „Strömungsmechanische Grundlagen des Wasser- und Stofftransports“, der von 1970 -1982 bestand. Er wurde durch alle möglichen Förderungsperioden hindurch von 1983 bis 1994 gefördert. Den SFB 80 leitete ich ab 1977, und anschließend den SFB 210 während seiner ganzen Dauer.

48 *Achim Lohmeyer* war einer von drei jungen Ingenieure von der TU Hannover, die der nationalen Ausschreibung von Stellen im 1970 neugegründeten Sonderforschungsbereich 80 folgten. Er übernahm das genannte Projekt. Es wurde wissenschaftlich verstärkt durch *Shia Yen Yih*, der für einige Zeit als Gastdozent nach Karlsruhe kam. Dieser vermittelte auch eine Praktikantenstelle für *Lohmeyer* in Michigan. Doch konnte weder ich noch *Yih Lohmeyer* von einer wissenschaftlichen Laufbahn überzeugen: er ging sei-

nen eigenen Weg und gründete ein heute gut florierendes Ingenieurbüro für Umweltprobleme, in dem er die am IHW erworbenen Kenntnisse bestens einbringen konnte. Später kam auch *Wolfgang Bächlin* als Geschäftsführer zu ihm.

- 49 Lohmeyer, A., Plate, E.J., 1977: Selective withdrawal from two-layer stratified flow. In: Hydraulic Engineering for Improved Water Management. Proc. 17th IAHR Congress, 15-19 Aug.1977, Baden-Baden. Vol. 1, pp. 343 – 35 [\(1977 selective withdrawal IAHR\)](#)
- 50 Lohmeyer, A., Plate, E.J., 1979: Physical modelling of the selective withdrawal from two-layer density stratified fluid. In: Hydraulic Engineering in Water Resources Development and Management. Proc. 18th IAHR Congress, 10.-14.Sept.1979, Cagliari, Italy, Vol.4, pp. 333-338 [\(1979 Lohmeier selectiveCagliari.pdf\)](#)
- 51 Plate, E.J., Friedrich, R., 1975: The stability of an interface in stratified channel flow. In: Fundamental Tools to be used in Environmental Problems. Proc. 16th. IAHR-Congress, July 27 - Aug. 1, Sao Paulo 1975, Vol. 3, pp. 9 – 21 [\(1975 interface stability IAHR\)](#)
- 52 Plate, E.J., Maier-Erbacher, J., Friedrich, R., 1984: Modeling of water droplet generation by wind. In: H. Kobus (ed.) IAHR Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, Esslingen, Sept. 3-6, Stuttgart. pp. 5.3-1 - 5.3-4 [\(1984 IAHR Esslingen Drop generation.pdf\)](#)
- 53 Faust, K.M., Denton, R.A., Plate, E.J., 1983: Schichtungseffekte in Flussstauhaltungen: Laborversuche. In: Wasserwirtschaft, Jg. 73, 1983, H. 11, pp. 386– 392
- 54 *Heinz Lettau* war im Zuge der Übernahme von deutschen Experten um *Werner v. Braun* nach dem Kriege in die USA gekommen und war nicht nur US Army Berater, sondern auch Professor für Meteorologie an der University of Wisconsin in Milwaukee. Er war vor allem berühmt durch seine Messung in den 30-er Jahren des ersten bis in größere Höhen gemessene bodennahen Windprofils, (das berühmte Leipziger Profil), mit dem er den Nachweis erbrachte, dass die *Prandtl'sche* (logarithmische) Grenzschichttheorie auch im großen, atmosphärischen Maßstab gültig ist. So wurde er einer der Begründer der Mikrometeorologie. Nach dem 2. Weltkrieg aus

Deutschland in die USA von der US Army geholt, wurde er zu einem der einflussreichsten Meteorologen der USA.

55 In Ft. Collins gab es bereits einen kleineren Windkanal mit großer, aber kurzer Versuchsstrecke, an welchem *Cermak* und ein sonst nicht weiter in meiner Vita in Erscheinung tretender Professor „*Ike*“ *Koloseus* bereits Anfang der 50-er Jahre Versuche über die Verdunstung am Lake Hefner in Florida gemacht hatten. Dafür verwendeten sie Ähnlichkeitskriterien, nach denen sie glaubten, die Modellergebnisse auf die Natur übertragen zu können. Ihre Arbeit wurde in einem Bericht zusammengefasst, wurde aber (glaube ich) nie veröffentlicht – vielleicht, weil *Cermak* den Ergebnissen wohl nicht ganz getraut hatte – auch heute würde ich nicht wagen, solche Ergebnisse ohne experimentelle Überprüfung in der Natur herauszugeben. Viele Jahre später habe ich versucht, die Rheinverdunstung auf ähnliche Weise zu modellieren, wofür *Arnold Schuler* die entsprechenden Tracerversuche gemacht hat. Die Ergebnisse waren aber so unsicher, dass ich sie in einer Schreibtischschublade verschwinden ließ.

56 *Mike Poreh* und seine Frau *Shoshana* kehrten nach Israel zurück, *Mike* wurde Professor am Technion in Haifa, verbrachte aber immer die Sommer in Ft. Collins, wo er mit *Jack Cermak* zusammen arbeitete und nicht wenig zu *Cermaks* Reputation beitrug. Wir trafen uns immer mal wieder – ich in Haifa, er in Deutschland oder *Rele* und ich in den USA und zuletzt 2009 in Jerusalem, wohin *Rele* und ich anlässlich einer Feier der Deutsch-Israelischen Gesellschaft eingeladen wurden. Ein lang geplantes Treffen in Berlin im November 2014 mussten wir nach einem sehr freundschaftlichen Abendessen mit seinem im Amerika lebenden Sohn Amir kurzfristig abbrechen.

57 Im Jahr 2010 wurde ich aufgefordert, die Planung für ein Duplikat des Ft. Collins Windkanals für Dubai (unter Aufsicht der ETH Lausanne) zu beurteilen: da wurden von den anbietenden Firmen allein für die Planung des Kanals bis zu 3 Mio. \$ gefordert!

58 Ich fand in der gewaltigen Halle des „Industrial Arts Buildings“, die ja ursprünglich für die Unterbringung der Windkanäle vorgesehen war, eine Unmenge an US Army Surplus Material vor – damals konnten sich Universitäten für Aufträge des US Militärs aus langen Listen Material aussuchen, das von der US Army nicht mehr gebraucht wurde. Darunter war auch der für den Antrieb des Propellers erforderliche Gleichstromgenerator der

Firma Westinghouse, der aus dem Jahr 1927 stammte – ein Riesending, das aber bis zum Ende seinen Dienst getan hat, wie mir gesagt wurde!!

59 Plate, E.J., Cermak, J.E., 1963: Micrometeorological Wind Tunnel Facilities: Description and Characteristics. Report CSU CER63EJP-JEC9, Final report on Contract No. DA-36-039-SC-80371 with U.S. Army Electronic Research and Development Activity, Fort Huachuca, Arizona

60 *Peter Eagleson*, damals noch voll als Hydrauliker tätig im unter der Leitung von *Arthur Ippen* stehenden MIT Hydromechanik Labor, hat eine Karriere gehabt, die der meinen sehr ähnlich war: auch er wechselte später von der Strömungsmechanik zur Hydrologie. Er wurde auf diesem Gebiet sehr angesehen und schrieb in den 70-er Jahren ein Buch über Systemhydrologie, in welchem er manche Ideen aus der Strömungsmesstechnik auf die Hydrologie übertrug.

61 Das kam aber erst später, noch stritt man sich um die relativen Vorteile von Analog und Digitalrechnungen – noch bei meiner späteren Tätigkeit in Karlsruhe 1971 musste ich dem Techniker *Jürgen Loeser* eine mechanische Rechenmaschine zur Verfügung stellen, die ziemlich viel kostete – allerdings nicht annähernd so viel wie damals die erste elektronische Rechenmaschine, ein Wang Rechner mit 40k Speicher und 64k bits/sec Rechenkapazität, der DM 40,000 gekostet hat!

62 *Ralph Asmus* war ein wunderbarer Kamerad und ein tüchtiger Werkstattleiter, mit dem ich gern zusammengearbeitet habe. Er leitete die Werkstatt in all den Jahren, die ich in Ft. Collins war und hat die ganze Entwicklung der Windkanäle vom ersten Umbau der Versuchsstrecke, über den Bau des Wind-Wellengeräts bis zur Gestaltung der Großwerkstatt für die ganze im Foothills Komplex zusammengeführten Laboratorien geleitet. Er war ein guter Freund unserer Familie; so manches Mal sind wir bei Ralph und seiner Frau Thelma mit unseren Kindern im Poudre Valley zu Besuch gewesen. Er ist bald nach meinem Ausscheiden in den Ruhestand zu seiner Tochter nach Texas gegangen: wir verloren zu unserem Bedauern gänzlich seine Spur.

63 Plate, E.J., Sandborn, V.A., 1966: Modeling of a Thermally Stratified Boundary Layer. CSU Research Memorandum No. 8, 1966, CEM66-EJP- VAS8 (1966 Plate-Sandborn.pdf)

64 Er musste wohl bei der ständigen Zunahme der Computerisierung vor den numerischen Modellen weichen: es fand sich unter den jungen Ingenieuren niemand mehr, der mit dem Gerät arbeiten wollte – da einfach experimentelle Forschung zu langsam war und den Doktoranden zu viel Geduld und Zeit abverlangte! Wie auch immer begründet: die Universitätsleitung beschloss die Verschrottung, weil man glaubte, den dadurch frei werdenden Platz besser verwenden zu können. Ich habe das natürlich bedauert, aber ich habe nie die Meinung vertreten, dass nur aus Tradition Dinge, die nicht mehr zeitgemäß waren, erhalten werden müssten.

65 Plate, E.J., 1974: Der Wind als Faktor der Bauwerks- und Städteplanung. In: Der Bauingenieur, Jg. 49, 1974, pp. 457 – 466

66 Im Zuge der Entwicklung des Programms haben wir später noch mehrere Windkanäle gebaut, aber ohne lange Versuchsstrecken und unter Einbeziehung der örtlichen Verhältnisse: die Grenzschicht wurde vielmehr durch den Einbau von haifischflossig geformten Störkörpern im Einlauf erzeugt. Der früh verstorbene Ingenieur *Jürgen Löser* setzte meine Skizzen um, die auf den Erfahrungen mit allen früheren Windkanälen beruhten, und wir bauten z.B. einen vielfältig einsetzbaren Arbeitskanal, in dem während meiner ganzen Amtszeit am IHW ununterbrochen wissenschaftliche und praktische Untersuchungen in künstlichen Grenzschichten stattfanden.

67 Wolfgang *Bächlin* verließ das Institut im Jahre 1992 und wurde Geschäftsführer bei *Lohmeyer*.

68 Leider trennten sich die beiden Partner nach kurzer Zeit, und *Rau* widmete sich mehr den Umweltproblemen und entfaltete eine breite Palette differenzierter Verfahren für die verschiedensten Arten von Luftreinhaltaufgaben. *Wacker* konzentrierte sich auf den Ingenieurbauaspekt und führte vor allem Windkraftuntersuchungen in eigenen Windkanälen an nicht normungsfähigen Gebäuden durch. Mit sehr großem internationale Erfolg. Neben einer großen Anzahl von konventionellen Windkraftuntersuchungen an Türmen und anderen Bauwerken wurden von ihm und seinen Mitarbeitern mehr als 20 Fußballstadien und hunderte von Textilbauwerke aller Art untersucht, und das Ingenieurbüro *Wacker* erlangte insbesondere auf diesen beiden Gebieten Weltgeltung.

69 Plate, E.J. (2004): Wind and Urban Climates. Lecture for special session (in honor of the 75-th birthday of Prof. E.J. Plate) Preprint J7.8: Fifth International Conference on Urban Meteorology, Vancouver, Canada, August 23 -27, American Meteorological Society, Boston ([2004 Paper AMS Vancouver.pdf](#))

70 Plate, E.J., Quraishi, A.A., 1965: Modeling of velocity distributions inside and above tall crops. In: Journal of Applied Meteorology, Vol. 4, 1965, No. 3, pp. 400 – 408

71 Das Buch war ein erster Versuch, immer von der Perspektive der Windkanalmodellierung ausgehend. Eine großartige Zusammenstellung derselben Materie vom Standpunkt eines Mikrometeorologen ist in dem Artikel von J-R. Garratt: „Review: The atmospheric boundary layer“ von 1994 zu finden, einfach weil er mir so gut gefallen hat, habe ich ihn auf der CD meiner Veröffentlichungen beigefügt: unter (1994 Garratt Boundary layer)

72 Das war eine sehr interessante Veranstaltungsreihe, in der wir Windkannaleute mit den damals angesehensten Meteorologen zusammenkamen, die sich mit der Mikrometeorologie befassten. So lernte ich *Joost Businger* (University of Washington) kennen, der sich vor allem mit den verschiedenen Komponenten der Turbulenzenergie im Zusammenhang mit dem Windprofil in der dichteschichteten unteren Atmosphäre auseinandersetzte, *Hans Panofsky* (Pennsylvania State University), der sich mit Turbulenzbeschreibungen befasste, wie auch *Heinz Lettau* und viele andere. *Hans Panofsky* beteiligte sich am Buch „Engineering Meteorology“ als einer der Autoren.

73 Auch ein Nebenergebnis dieser Untersuchungen war ein Versuch, die Streuung der Aufschlagposition von Raketen, die in Bodennähe abgeschossen werden und durch ein turbulentes Windfeld fliegen, aus der Turbulenz der Raketenflugbahn zu berechnen: ein nettes kleines Experiment zur Verbindung von Numerik und Experiment, wobei allerdings in den von mir betrachteten Fällen kaum ein Einfluss der Turbulenz zu erkennen war: die durch die turbulenten Geschwindigkeitsänderungen bewirkten Raketenumlenkungen sind viel zu klein und verschwinden sicherlich in der allgemeinen Unsicherheit eines solchen Vorganges. So blieb es bei einem Konferenzbeitrag, vorgetragen bei einem der Treffen in Ft. Huachuca, Arizona. Der Vortrag fand wohl Interesse, aber den US Army Leuten war das zu

kompliziert und eine weitere Vertiefung dieses Themas blieb aus. Und das war auch gut so.

- 74 Plate, E.J., 1995: Windprofile in der Gebäudeaerodynamik. In: Plate, Erich (Hrsg.), Windtechnologische Gesellschaft 1995, WTG-Berichte Nr. 3., 3. Tagung D-A C H '93., 19. Nov. 1993, Univ. Karlsruhe, S. 7 – 26 ([1995 Windprofil DAC H.pdf](#))
- 75 Plate, E.J., Hidy, G.M., 1967: Laboratory study of air flowing over a smooth surface onto small water waves. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 72, 1967, No. 18, pp. 4627 – 4641
- 76 Plate, E.J., Friedrich, R., 1989: Gestörte Grenzschichten: Der Fall des Sprunges in der Rauheit. In: Friedrich, R., Plate, E.J., Emeis, S., (Hrsg.), 1989: Gestörte atmosphärische Grenzschichten. Berichtsheft zum Kolloquium des SFB 210 am 4.Okt.1989. Sonderforschungsbereich 210, Univ. Karlsruhe, SFB 210 T/70, 1-21 ([1989 SFB Gestörte Grenzschicht.pdf](#))
- 77 Theurer, W., Bächlin, W., Plate, E.J., 1992: Model study of the development of boundary layers above urban areas. In: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 41, 1992, pp. 437 – 448
- 78 Plate, E.J., 1971: The aerodynamics of shelter belts. In: Agricultural Meteorology, Vol. 8, 1971, pp. 203 – 222
- 79 Ranga Raju, K.G., Loeser, J., Plate, E.J., 1976: Velocity profiles and fence drag for a turbulent boundary layer along smooth and rough flat plates. In: Journal of Fluid Mechanics, Vol.76,1976, Pt.2, pp. 383-399
- 80 Plate, E.J., 1966: Velocity field near reattachment downstream from a two-dimensional boundary layer obstruction. Proposed paper for AGARD Specialists meeting on separated flows ([1966 separated flows.pdf](#))
- 81 *Singh Pal Arya* war einer meiner ersten Doktoranden. Obwohl von Haus aus Bauingenieur, wurde er auf Grund der Untersuchungen in Ft. Collins

Professor für Meteorologie an der University of North Carolina. Er war einer der besten Autoren für das von mir herausgegeben Buch "Engineering Meteorology", und er erweiterte das von ihm verfasste Kapitel über ungestörte Grenzschichten später in den 80-er Jahren zu einem Buch über die atmosphärische Grenzschicht, das guten Anklang fand und mein eigenes Buch über „Atmopheric boundary layers“ ersetzte.

82 Arya, S.P.S., Plate, E.J., 1969: Modeling of the stably stratified atmospheric boundary layer. In: Journal Atmospheric Sciences Vol.26, 1969, No.4, pp.656-665

83 Plate, E.J., Arya, S.P., 1969: Turbulence spectra in a stably stratified boundary layer. In: Radio Sciences, Vol.4, No. 12, pp. 1163 -68

84 Plate, E. J., 1998: Convective boundary layer: A historical introduction. In: Plate, E.J., Fedorovich, E. E.,Viegas, D. X., Wyngaard, J. C. (eds.), Buoyant Convection in Geophysical Flows. Dordrecht: Kluwer Academic Publ. 1998, NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences Vol. 513, pp. 1 - 22 [\(1998 ASI Convection Einführung.pdf\)](#)

85 Faust, K.M. und Plate, E.J., 1982: (unveröffentlicht) A model of convective plume flow in stratified environment (30 Seiten). [\(1982 Faust Convective Plumes basic.pdf\)](#)

86 Faust, K.M., Plate, E.J., 1980: Laboratory investigation of unsteady weak convective plumes. In: Stratified Flows. 2nd Int. Symp.on Stratified Flows. Trondheim, 24-27 June, 1980. Eds.: T.Carstens, T.McClimans. Trondheim 1980. Vol. 2. pp. 845 - 859 [\(1980 Faust Convective plumes.pdf\)](#)

87 Rau, M., Bächlin, W., Plate, E.J., 1991: Detailed design features of a new wind tunnel for studying the effects of thermal stratification. In: Atmospheric Environment, Vol. 25A, 1991, No. 7, pp. 1257 - 1262

88 Rau, M., Plate, E.J., 1995: Wind tunnel modelling of convective boundary layers. In: Wind Climate in Cities, eds.: J.E.Cermak, A.G.Davenport, E.J.Plate, D.X.Viegas. Dordrecht: Kluwer 1995 (NATO ASI Series E vol.277) pp. 431 - 456 [\(1995 Urban Climate Rau.pdf\)](#)

89 Fedorovich, E., Kaiser, R., Rau, M., Plate, E., 1996: Wind tunnel study of turbulent flow structure in the convective boundary layer capped by a temperature inversion. In: Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 53, No. 9, pp. 1273 - 1289

90 Unsere Untersuchungen über dichtegeschichtete Strömungen erweckten das Interesse eines bekannten russischen Meteorologen, Prof. *Zilenti-kevich*, der nach Öffnung des Eisernen Vorhangs im Westen sein Glück suchte –zuerst als Gastwissenschaftler in Deutschland, da er aber keine feste Anstellung fand, übernahm er eine Professur in Schweden. Er empfahl mir einen jungen russischen Privatdozenten, *Evgeny Fedorovich* der bei ihm gearbeitet hatte. Da ich damals gerade einen Mitarbeiter im Rahmen des SFB 210 suchte, stellte ich *Fedorovich* ein, mit großem Erfolg. Er ging dann in die USA als Professor der Meteorologie an die University of Oklahoma und nahm seine Freundin *Petra Kastner Klein* (s.u.) gleich mit, die dort mit ihren experimentellen Kenntnissen auch Karriere machte.

91 Fedorovich, E., Thäter, J., 2002: A wind tunnel study of gaseous tracer dispersion in the convective boundary layer capped by a temperature inversion. Atmospheric Environment 36, pp. 2245 -2255

92 *Bob Meroney* war sicherlich der Gescheiteste in unserer Gruppe. Mit enormem Enthusiasmus, besten strömungsmechanischen Kenntnissen und einem immer positiven Temperament ausgestattet, entfalte er in Kürze eine rege Forschungsaktivität an vielerlei Fragestellungen, die er immer selbst, von den Versuchen bis zum Schreiben der Bericht und Veröffentlichungen durchführte – unter anderem als einer der Autoren an dem Buch „Engineering Meteorology“. Er war ein gern gesehener Gast in Karlsruhe und verbrachte einen Sabbatical leave am IHW, wo er insbesondere mit *Rau* zusammenarbeitete.

93 Plate, E.J., 1967: Diffusion from a ground level line source into the disturbed boundary layer far downstream from a fence. In: International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 10, 1967, pp. 181 – 194 [\(1967 Diffusion downstream of fence.pdf\)](#)

94 Wie problematisch diese Vorgehensweise der Schadstoff Beseitigung durch Verdünnung ist, kann man an vielen Stellen sehen –so ist das „Waldsterben“ darauf zurückzuführen, dass zwar die Konzentrationen von

Schadstoffen (Schwefel) lokal in der Nähe des Schornsteines herabgesetzt werden, aber doch irgendwo wieder zu Boden, nämlich an den bewaldeten Berghängen, gelangen: „The solution of pollution by diffusion is an illusion“

95 Plate, E.J., Bächlin, W., (1988): Wind tunnel test as part of a warning system for accidental gaseous spills. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aero dynamics*, Vol. 29, pp.165-174

96 Bächlin, W., Theurer, W., Plate, E.J., 1991: Wind field and dispersion in a built-up area - a comparison between field measurements and wind tunnel data. In: *Atmos-pheric Environment*, Vol. 25A, 1991, No. 7, pp. 1135 - 1142

97 Bächlin, W., Theurer, W., Plate, E.J., 1992: Dispersion of gases released near the ground in built up areas: Experimental results compared to simple numerical modelling. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* Vol. 44, 1992, pp.2721-2732

98 Theurer, W., Plate, E.J., Hoeschele, K., 1996: Semi-empirical models as a combination of wind tunnel and numerical dispersion modelling. In: *Atmospheric Environment* Vol. 30, 1996, No. 21, pp. 3583 - 3597

99 Plate, E.J., 1982: Windkanalmodellierung von Ausbreitungsvorgängen in Stadtgebieten. In: *Abgasbelastungen durch den Kraftfahrzeugverkehr im Nahbereich verkehrsreicher Straßen. Kolloquiumsbericht. Köln: TÜV Rheinland 1982, pp. 61 - 83 (1982 Verkehrsmodellierung Köln.pdf)*

100 Mit ihrem Kollegen *Evgeny Fedorovich*, dem sie nach seinem Wechsel an die University of Oklahoma folgte, entwickelte sie diese Art Untersuchungen in den USA weiter. Nach dem berüchtigten Anschlag im September 2001 auf das World Trade Center in New York am 11. September 2001 war man in den USA besorgt, dass Giftgas oder biologische Kampfmittel durch Terroristen eingesetzt werden könnten, und ein dringender Bedarf an Forschung über Ausbreitungsvorgänge in Stadtgebieten wurde erkannt und finanziert. Da zu der Zeit nur noch geringe Windkanalkapazitäten in den USA bestanden, konnte *Petra Klein* fast konkurrenzlos ein großartiges, von der National Science Foundation gefördertes Programm zur Untersuchung

stadtklimatischer Fragen initiieren. Ich konnte wenigstens indirekt an ihrem Erfolg teilnehmen, indem sie die American Meteorological Society dazu veranlasste, aus Anlass meines 75. Geburtstags bei der Meteorologentagung in Vancouver 2004 eine Sondersitzung für mich zu veranstalten, bei der ich zusammenfassend über unsere Untersuchungen zum Thema „Stadtklima“ berichten konnte.

101 Nach deutscher damaliger Tradition hatte ich das weiter oben erwähnte Thema ausgewählt: „Geschiebeerrosion durch einen senkrechten Strahl“ und baute hierfür einen kleinen Versuchsstand – ein sehr hübsches Gerät, das sehr gute und präzise Messungen der Erosion durch einen vertikalen Strahl bei verschiedener Wassertiefe ermöglichte. Nach einem halben Jahr war dieser Versuchsstand mit den bescheidenen Mitteln von \$400 gebaut und erste Versuche an *Röhnisch* geschickt worden. Der aber wollte, dass ich mich um ein ihn interessierendes Thema bemühen sollte, zweifellos wohl in der Meinung, mir die Promotion einfacher zu machen, und schlug im Januar 1962 das Thema „Bauliche und biologische Maßnahmen zur Verbesserung des Kleinklimas und ihre quantitative Bewertung“ vor, mit einem Aufgabenkatalog, der mehr eine Lebensaufgabe für einige Forschergenerationen umfasste (ein interessanter Aufgabenkatalog übrigens, der mich sehr interessiert hätte und an dessen Teilaspekten ich auch später viel gearbeitet habe – aber mehr von der Hydrologie herkommend, als von der Strömungsmechanik). Am Ende nahm ich aus dem ganzen Komplex die bewältigbare Aufgabe heraus, auf Grund von Versuchen im Windkanal (noch in der provisorisch zusammengebauten Versuchsstrecke des zu erstellenden Windkanals) die Thematik der Auswirkung einer senkrechten Wand auf eine turbulenten Grenzschicht und die Ausbreitung von bodennah eingeleiteten Schadgasen in dieser Grenzschicht zu untersuchen, wobei mir ein oder zwei chinesische Graduate Students bei der Durchführung der Experimente halfen. Die Dissertation wurdenach mehreren Jahren erst 1967 mit schlechter Note abgeschlossen, obgleich es mir gelang, ein Modell aufzustellen, das meine Ergebnisse gut nachbilden konnte.

102 Plate, E.J., 1964: The Drag on a smooth flat plate with a fence immersed in its turbulent boundary layer. ASME Paper 64-FE-17, 1964
(1964 Fence drag ASME)

103 Ich konnte den schönen Vortrag dann doch nicht veröffentlichen: er wurde aus mir nicht nachvollziehbaren Gründen von dem sehr selbstherrlich auftretenden Stanford Professor *Steve Kline* abgelehnt – auch später,

bei einer Konferenz über abgelöste Strömungen wurde mein Beitrag zwar sehr beachtet und viel besprochen, aber nicht in die Proceedings aufgenommen.

104 Die Untersuchung zeigte allerdings, dass nicht die Turbulenz direkt zu Schwingungen führte, sondern die Wechselwirkung zwischen den Türmen. Die sich an den Kanten des einen Turms ablösenden Wirbel erzeugten periodische Kräfte auf den dahinter liegenden Turm, deren Wirkung durch geeignete Dämpfungsmaßnahmen minimiert werden mussten.

105 Da diese Untersuchungen recht einträglich waren (*Cermak* sagte einmal: „Diffusion investigations always cost money for the client, but pressure or force determinations usually saves him money“) – und davon bleibt natürlich auch etwas am Untersucher hängen! - gründete er noch vor seiner Emeritierung zusammen mit *John Peterka* ein unabhängiges, von ihm privat finanziertes Institut mit eigenen Windkanälen, in das in der Folgezeit alle solche an das FDDL herangetragenen Aufträge ausgelagert wurden – sehr zum Leidwesen von *Bob Meroney*, dem die Aufgabe der Leitung des FDDL als Nachfolger von *Cermak* zukam, und dem die Zusatzeinnahmen aus dieser lukrativen Nebentätigkeit für die Wartungsarbeiten im FDDL fehlten. Das kam aber erst später, in den 70-er und 80-er Jahren.

106 Mit seiner Frau *Sheila* besuchte er uns in Deutschland, und wir fuhren an den Bodensee – besonders in Erinnerung ist mir das überwältigte Stauen *Alans* als er in die großartige Barockkirche in Zwiefalten eintrat! Und ich konnte etwa im Jahr 2005 einige schöne Tage mit ihnen in ihrem Sommerhaus am Michigan See erleben, oder ein anderes Mal mit den *Davenport*s in das nahegelegene Stratford/Canada zu einer Shakespeare Aufführung gehen.

107 Meroney, R.N., Plate, E.J.,1972: Wind tunnel investigation of shapes for balloon shelters. In: Journal of Applied Meteorology, Vol. 11, 1972, No. 5, pp. 849 – 857

108 Schnabel, W., 1981: Field and wind-tunnel measurements of wind pressures acting on a tower. In: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.8, 1981, pp.73-91

-
- 109 Plate, E.J., Schnabel, W., 1981: Modellgesetze für die Untersuchung von winderzeugten Bauwerksschwingungen im Windkanal. In: VDI-Tagung Wind- und erdbebenerregte Schwingungen von Bauwerken, Hannover, 1./2. 10. 1981, VDI-Berichte Nr. 419, pp. 53 – 61 [\(1981 Schnabel VDI.pdf\)](#)
- 110 Schnabel, W., Plate, E.J., 1979: Experimental study of wind forces and wind-induced vibrations at a steel lighthouse tower. In: Environmental Forces on Engineering Structures. Preprint. Proc. of the Intern. Conf., held at Imperial College, London, July 1979. Ed. by C. A. Brebbia et al. London: PENTECH, pp. 137 – 149
- 111 Schnabel, W., Plate, E.J., 1980: Prototype and model experiments on wind-induced vibrations of a steel tower. In: Wind Engineering. Proc. of the 5th Internat. Conf., Fort Collins, Col., July 1979. Ed.: J. E. Cermak. Pergamon Press. 1980. Vol. 2. pp. 757 – 767 [\(1980 Ft. Collins Schnabel.pdf\)](#)
- 112 Maier-Erbacher, J., Plate, E.J., 1991: Measurement of velocity near and pressure on a cylindrical tower located on irregular terrain. In: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 38, 1991, pp. 167 - 184
- 113 Plate, E.J., 1982: Wind tunnel modelling of wind effects in engineering. In: Engineering Meteorology, Plate, E.J. ed.: Amsterdam: Elsevier 1982, Studies in Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1, pp.573-639
- 114 *Wolfgang Bächlin* überzeugte mich nicht nur durch seine Diplomarbeit und seine Dissertation als besonders begabter und engagierter Versuchingenieur, den ich unbedingt für das Institut erhalten wollte. Daher bot ich ihm in Nachfolge von *Achim Lohmeyer* die Stelle eines Abteilungsleiters für die Abteilung Gebäude Aerodynamik an, die er dann bis 1992 innehatte. Ich habe dann die Abteilungsleitung Gebäudeaerodynamik provisorisch für ein paar Jahre an *Matthias Rau* auf seinen eigenen Wunsch vergeben, um ihm auch die Möglichkeit zum Promovieren zu geben, die er zuvor als Konstrukteur des Schichtenwindkanals (siehe Abschnitt 5.4.3) nicht hatte. Leider aber war die Stelle für diesen Zweck nicht sehr geeignet, und Ende 1994 gab *Rau* sie auf, um mit *Jürgen Wacker* zusammen ein Ingenieurbüro

zu gründen. Die Gebäudeaerodynamik blieb dann ohne Spitze: der Techniker *Harald Deutsch* war inzwischen in der Lage, die Gutachten und die Betreuung der Windkanalarbeiten zu übernehmen, und *Harald Kiefer* und *Petra Kastner - Klein* konnten sehr selbständig unser Forschungsprogramm zu einem Ende führen, während *Evgeny Fedorovich* zusammen mit *R. Kaiser* (Promotion 1996) die Untersuchungen der Schichtenströmung, für die *Rau* den Schichten Windkanal entwickelt hatte, zu einem vorläufigen Abschluss brachte. Das ging schon über meine Dienstzeit hinaus und machte mir zuletzt keine große Freude, weil seit 1994 der Anspruch der Hydromechanik (Prof. *Jirka*) erhoben wurde für die Gebäudeaerodynamik bereits noch während meiner Amtszeit zuständig zu sein. Und so endete die Abteilung, die über die Jahre viel Interessantes geboten hatte, die einen wesentlichen Beitrag zur Reputation des Instituts beigetragen hat, und die mir eigentlich viel näher lag als die Hydrologie, mit meinem Ausscheiden.

- 115 Bächlin, W., Plate, E.J., 1986: Mean internal pressure inside buildings induced by wind - a wind tunnel study. Proc. of the Specialty Conference Advancements in Aerodynamics, Fluid Mechanics and Hydraulics, ASCE/Minneapolis, MN, June 1986. pp. 791 - 798 (1986 Indoor pressure Bächlin Minneapolis.pdf)
- 116 Bächlin, W., Plate, E.J., Kamarga, A., 1983: Influence of the ratio of building height to boundary layer thickness and of the approach flow velocity profile on the roof pressure distribution of cubical buildings. In: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 11, 1983, pp. 63 - 74
- 117 Wacker, J., Friedrich, R., Plate, E.J., Dorsch, F. 1990: Drag and lift on rectangular bluff bodies immersed in deep boundary layer flow over rough surfaces. In: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 33, 1990, No. 1/2, pp. 113 - 122
- 118 Wacker, J., Plate, E.J., 1992: Correlation structure of wind pressure buffeting on cuboidal buildings and corresponding effective area wind loads. In: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 43, 1992, pp.1865-1876

-
- 119 Plate, E.J., 1965: A research facility with concurrent air and water flows. In: *La Houille Blanche*, 1965, No. 6, pp. 595 – 598
- 120 Plate, E.J., Goodwin, C.R., 1966: The Influence of wind on open channel flow. In: ASCE Specialty Conference on Coastal Engineering, Santa Barbara, Cal., Oct. 1965, Ed.: Thorndike Saville, ASCE 1966, Chapter 17, pp. 391 – 423 ([1966 ASCE St. Barbara Wind.pdf](#))
- 121 Leider erschien mein Aufsatz auf *Cermaks* Empfehlung hin in dem ASCE Journal of Engineering Sciences (*Cermak* war Mitherausgeber der Zeitschrift), d.h. in einer Zeitschrift, die zwar eine gute Reputation hatte, aber mit Sicherheit nicht von Ozeanographen gelesen wurde.
- 122 Plate, E.J., 1970: Water surface velocities induced by wind shear. In: *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 96, 1970, No. 3, pp. 295 – 312
- 123 Plate, E.J., Trawle, M., 1970: A Note on the celerity of wind waves on a water current. In: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, 1970, No. 18, pp. 3537 – 3544
- 124 Friedrich, R., Plate, E.J., 1973: The effect of bends on longitudinal dispersion of floating particles. In: *Proc. XV. IAHR Congress*, Istanbul 1973, Vol. 2, pp. 61 - 69 ([1973 IAHR Bend effects.pdf](#))
- 125 Die Vorlesung verwendete ich auch als Einstieg in die Tätigkeit als Gastdozent im Indian Institute of Technology (IIT Madras) in Indien im Jahr 1972. Das IIT war in den 60-er Jahren von der Deutschen Entwicklungshilfe gegründet worden – im Rahmen eines internationalen Aufbauprogramms für die Forschung im gerade unabhängig gewordenen Indien (Engländer gründeten das IIT New Delhi – wo ich in den 1990-er Jahren während der Präsidentschaft von Prof. *Raju*, einem Professor vom IIT Madras, der in Karlsruhe im Grundbau promoviert hat, einen mehrwöchigen Aufenthalt erlebte - die Amerikaner gründeten das IIT Kanpur, wo zur Zeit unseres Besuches *Ramesh Malhotra*, sonst Professor am IIT New Delhi, Präsident war. *Ramesh* war ein Mitstudent in Ft. Collins gewesen. Mit dem von den Russen unterstützten IIT Bombay hatte ich aber außer einem kurzen Besuch während unseres Aufenthalts in Poona keinen Kontakt)

-
- 126 Drake, R.L., Plate, E.J., 1968: The generation of wind-waves on open channel flows. In: 10th Midwestern Mechanics Conference, Fort Collins, Col., Aug. 1967. *Developments in Mechanics*, Vol. 4, 1968. Eds.: J. E. Cermak and J. P. Goodman. pp. 1425 – 1448 [\(1968 Drake Wellenentstehung\)](#)
- 127 Jansen, P. 2004: *The interaction of ocean waves and wind* Cambridge University Press, Cambridge, UK, 300 pages
- 128 Hidy, G.M., Plate, E.J., 1965: Laboratory studies of wind action on water standing in a channel. *Proceedings, Sea-Air Interaction Conference, Tallahassee, Florida. Sea -Air Interaction Laboratory, Report No.1, Washington, D.C. August 20, 1965.* pp.285-325 [\(1965-1 Hidy Plate.pdf\)](#)
- 129 Hidy, G.M., Plate, E.J., 1965: Frequency spectrum of wind-generated waves. In: *Physics of Fluids*, Vol. 8, 1965, No. 7, pp. 1387 – 1389
- 130 Hess, G.D., Hidy, G.M., Plate, E.J., 1969: Comparison between wind waves at sea and in the laboratory. In: *J. Marine Research* Vol. 27, 1969, No. 2, pp. 216- 225
- 131 Hidy, G.M., Plate, E.J., 1966: Wind action on water standing in a laboratory channel. In: *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 26, 1966, Pt. 4, pp. 651 – 687
- 132 Plate, E.J., 1971: Limitations of spectral analysis in the study of wind-generated water surface waves. In: *Stochastic Hydraulics. Proc. of the 1st Int. Symp. on Stochastic Hydraulics, Univ. of Pittsburgh, 1971.* Ed.: C.L. Chiu. Univ. of Pittsburgh 1971. pp. 522-539 [\(1971-Pittsburg-Limitations.pdf\)](#)
- 133 Plate, E.J., 1972: The role of the dominant wave in the spectrum of wind-generated water surface waves. In: *9th Symposium Naval Hydrodynamics, Aug. 20- 25, 1972, Paris.* Eds.: R. Brard, A. Castera. Arlington, Va.: Office of Naval Res. Vol. 2: Frontier problems. pp. 1371 – 1396 [\(1972 Dominant Wave Paris.pdf\)](#)

-
- 134 Chang, P.C., Gorove, A., Atchley, R.L., Plate, E.J., 1970: A Self-adjusting probe positioner for measuring flow fields in the vicinity of wind generated water surface waves. In: Review of Scientific Instruments Vol.41,1970, No.11, pp.1544-1549
- 135 Chang, P.C.; Plate, E.J.; Hidy, G.M., 1971: Turbulent air flow over the dominant component of wind-generated waves. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 47, 1971, Pt. 1, pp. 183 - 208
- 136 Plate, E.J., 1972: The role of the dominant wave in the spectrum of wind-generated water surface waves. In: 9th Symposium Naval Hydrodynamics, Aug. 20- 25,1972, Paris. Eds.: R. Brard, A. Castera. Arlington, Va.: Office of Naval Res. Vol. 2: Frontier problems. pp. 1371 - 1396 [\(1972 Dominant Wave Paris.pdf\)](#)
- 137 Plate, E.J., 1978: Wind-generated water surface waves: the laboratory evidence. In: Turbulent Fluxes Through the Sea Surface, Wave Dynamics, and Prediction. Eds.; A. Favre & K. Hasselmann. Plenum Pr. 1978, pp. 385 - 401 [\(1978 Waves- Laboratory evidence.pdf\)](#)
- 138 Plate, E.J., Nath, J.H., 1969: Modeling of structures subjected to wind waves (ext. vers.). In: J.Waterways and Harbors Div., ASCE, Vol. 95, No. 4, pp. 491 - 511
- 139 Plate, E.J., Eiden, H., 1980: Forces on cylinders caused by wind generated dominant waves. In: Proc. of the 3rd International Symposium on Stochastic Hydraulics, Aug.5-7,1980, Tokyo, pp. 689 - 701 [\(1980 IAHR Stoch Hydr Wave forces.pdf\)](#)
- 140 Interessanter Weise wäre mir beinahe die Plattform als Forschungsgerät geschenkt worden - mit 1 Mio DM für Betriebskosten! Im Jahr 1980 erhielt ich auf Grund meiner Bewerbung den Ruf auf den Lehrstuhl für Wasserbau an der neugegründeten TU Hamburg - Harburg, und da machte mir das BMBF das besagte Angebot, das aber natürlich hinfällig wurde, als ich den Ruf nach Hamburg doch nicht annahm -die Bedingungen dort waren nicht akzeptabel, und Vorteile gegenüber Karlsruhe erwiesen sich als zu ungewiss. Es war sicherlich ein Glück, dass ich das Angebot ausschlug - aber damit war auch mein Ausflug in Meeresforschung am Ende.

-
- 141 Plate, E.J., 1981: Variance analysis for water wave forces on circular cylinder under field conditions. In: INCOE 81, 1st Indian Conference in Ocean Engineering, Madras, Febr.18-20,1981. Proc.,Vol.2, pp.89-102 [\(1981 Madras Wave Forces.pdf\)](#)
- 142 Eiden, H., Plate, E.J., 1983: Random wave loading on a vertical circular cylinder at the research platform "NORDSEE". In: Proc 2nd Indian Conf. in Ocean Engineering, 14-16 Dec.1983, Pune, India, Vol..1 pp. 416 – 431 [\(1983 Madras Wave forces.pdf\)](#)
- 143 Piroth, K. und Plate, E.J. 1993: The wave climate, an important factor in lakeshore deterioration – concept and measurements at Lake Constance. Limnologie aktuell –Bd.5: Seeuferzerstörung und Seeuferrenaturierung in Mitteleuropa. Ostendorp/ Krumscheid-Plankert (Hrg.) G.Fischer Verlag, Stuttgart. – Jena –New York, pp.77-92
- 144 Eloubaidy, A.F., Plate, E.J.,1972: Wind shear-turbulence and reaeration coefficient. In: Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 98, No. 1, pp. 153 - 170
- 145 Friedrich, R., Plate, E.J., 1983: Die Wirkung der oberflächennahen Turbulenz auf den Sauerstoffeintrag. In: International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 26, 1983, No. 4, pp. 521 – 530
- 146 Plate, E.J., Friedrich, R., 1984: Reaeration of open channel flow. In: Gas Transfer at Water Surfaces. Ed. by W.Brutsaert, G.H. Jirka. Dordrecht: Reidel. pp. 333 – 346 [\(1984 Reaeration Cornell.pdf\)](#)
- 147 Wengefeld, P., Plate, E.J., 1977: Evaporation from a water current under the influence of wind-induced waves. In: Hydraulic Engineering for Improved Water Management. Proc. 17th IAHR Congress, 15-19 Aug.1977, Baden-Baden. Vol. 2, pp. 85-94 [\(1977 Verdunstung von Wellen IAHR\)](#)
- 148 Plate, E.J., Wengefeld, P., 1979: Exchange processes at the water surface. In: Hydrodynamics of Lakes. Proc. of a Symp. 12-13 Oct.,1978, Lausanne. Eds.: W.H. Graf & C.H. Mortimer. Elsevier 1979, pp. 277-301 [\(1979 Lausanne Windwellen.pdf\)](#)

149 Jähne, B., Libner, P., Fischer, R., Billen, T., Plate, E.J., 1989: Investigating the transfer processes across the free aqueous viscous boundary layer by the controlled flux method. In: Tellus, Vol. 41 B, 1989, No. 2, pp. 177 - 195

150 Plate, E., 1998: Socio-economic factors in headwater land management. In: Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters. Eds.: K. Kovar et al. Wallingford: IAHS Publ. No. 248, pp. 523 - 533(1998 Headlands IAHS.pdf)

151 Prof. *Röhnisch* war erfolgreicher Leiter des Neubauamtes für den Mittellandkanal der Bundeswasserstraßenverwaltung gewesen und hatte sich dort große Verdienste erworben. Mit der Übernahme des Ordinariates für Wasserbau war er ein guter Vermittler der Bedürfnisse des Staates, allerdings wenig zu wissenschaftlicher Arbeit vorgebildet.

152 Meine Beziehungen zu Japan haben mich und meine Familie sehr bereichert. Erste Kontakte entstanden durch meine Tätigkeit im Council der IAHR, dessen Präsident zur Zeit des Beginns meines Engagements für diese Gesellschaft der Japaner *Hayashi* war. Mein Kontakt war aber vor allem Prof. *Yoshiaki Iwasa*, den ich weiter oben vorgestellt habe und dem ich die ersten Reisen nach Japan zu verdanken habe. Später war ich mehrmals in Japan aus anderen Anlässen: so z. B. zur Bewertung des Hydraulischen Forschungsprogramms des Disaster Prevention Research Institutes in Kyoto, oder anlässlich der Yokohama Conference for the IDNDR, oder - besonders angenehm in der Erinnerung, - im Rahmen der Entstehung des UN University Research and Training Centers (in Bonn) - in Kobe und Tokyo mit dem Direktor der UNU *van Ginkel* (einem jovialen aber sehr gescheiterten und zielstrebigen Holländer) (die UNU hat ihren Sitz in Tokyo).

153 Mein Beitrag zu diesem Thema beschränkte sich auf eine Beteiligung an der Diskussion um die geeignetste Verteilungsfunktion. Die deutschen Wasserwirtschaftler waren der Empfehlung der US Amerikaner gefolgt und hatten eine Verteilungsfunktion für das Bemessungshochwasser vorgeschlagen (die dreiparametrische log-Pearson Verteilung), die überall im Lande gültig sein soll. Aber im Gegensatz zu den Amerikanern haben sie den dritten Parameter dieser Verteilung nicht regional festgelegt, und damit eine ziemliche Willkür ermöglicht, gegen die ich mich gewandt habe. Auch hielt ich die drei parametrische log Normal Verteilung als Einheitsverteilung für besser geeignet.

154 *Jim Dooge* war Professor an der University of Galway in Irland und berühmt durch seine Rückführung der Theorie der Einheitsganglinie auf die allgemeinere Theorie linearer Systeme, die von Elektroingenieuren bereits im 19. Jahrhundert eingeführt worden war, und die (manchen – beileibe nicht allen!) Bauingenieuren durch die Schwingungstheorie bekannt war. Dies tat er jedoch auf hohem Niveau, und er gilt wie *Yevjewich* als einer der Stammväter der modernen Hydrologie. Ich habe mehrfach mit ihm zu tun gehabt. Er war 1984 einer der enthusiastischen Partner für das Projekt „History of Hydraulics“ (Siehe Endnote 167), um das 50. Jubiläum des Bestehens der IAHR im Jahr 1985 zu feiern. Später waren wir beide Mitglieder der Commission for Water Research des International Councils of Scientific Unions (COWAR of ICSU), die er zunächst leitete, dann aber an mich weitergab. Sein wichtigstes Amt war das des Außenministers der Republik Irland. Wir hatten ihn für einige Tage in Karlsruhe als Berater, und durch seine Zusammenarbeit mit polnischen Forschern entstand ein weiterer Kontakt. Aus dem Kreis dieser Forscher stammte *Z.Kundzewicz*, der bei uns mehrere Jahre arbeitete, und später am Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung der Leiter der Fachgruppe Hydrologie wurde – mit einem Parallelehrstuhl an der Universität Posen, die ihm ermöglichte, zusammen mit seinem Sohn ein altes Herrenhaus in der Nähe Posens zu erwerben und als Gästehaus einzurichten.

155 Plate, E.J., Ihringer, J., Lutz, W., 1988: Operational models for flood calculations. In: *Journal of Hydrology*, Bd. 100, 1988, S. 489-506

156 *Jürgen Garbrecht* war Mitarbeiter des USGS (US Geological Survey), und Sohn von Professor *Günter Garbrecht*, Braunschweig, mit dem zusammen ich 1985 als IAHR Präsident den Workshop zum Thema „History of Hydraulics“ durchgeführt hatte. *G. Garbrecht* war bekannt als unermüdlicher Erforscher historischer Wasserbauten, und als solcher war er prädestiniert, diesen Workshop zum Thema „History of Hydraulics“ zu organisieren, durch den wir den 50. Jahrestag der Gründung der IAHR gebührend feierten. Ein schöner Band entstand hieraus, von *Garbrecht* (mit meinem Vorwort) herausgegeben, zu dem viele bedeutende und angesehene Hydrologiker aus der ganzen Welt beitrugen.

157 Wald, J., Kron, W., Buck, W., Plate, E.J., 1986: Generation of storm runoff in an area with a high groundwater table. In: *Conjunctive Water Use. Understanding and managing surfacewater-groundwater in-*

teractions. Ed. by S. M. Gorelick. Proc. Budapest Symp., July 1986. IAHS Publication. No. 156, 1986. S. 97 - 109 [\(1986 Wald groundwater IAHS\)](#)

158 Bronstert, A., Schmitt, P., Plate, E.J., Wald, J., 1991: A physically based distributed watershed model to simulate floods and flood protection measures in a flat area with shallow ground water table. In: 24 IAHR Congress, Madrid; 9-13 Sept. 1991, Vol. A: Study of Streams and Watersheds of High Hydraulic Irregularity, pp. A41 - A50 [\(1991 Application Wald Model.pdf\)](#)

160 Plate, E.J., Schuler, A., 1981: The effect of the geostrophic wind on storm tides. In: XIX. IAHR Congress, New Delhi, India, 1-7 Feb.1981, Proc., Subject B, Vol.3,pp.27-46 [\(1981 IAHR Schuler geostrophic wind.pdf\)](#)

161 Bardossy, A. und H.J. Caspary, 1990: Detection of climate change in Europe by analyzing European atmospheric circulation patterns from 1861 -1989. Theoretical and Applied Climatology, Bd. 42, S.155-167

162 Immerhin entstand aus dem Workshop im Februar 2001 in Phnom Penh, wo auch die Anrainerländer ihre Hochwassermanagementstrategien vorstellten, der Vorschlag, ein eigenes Zentrum der Hochwasservorsorge im Rahmen der MRC in PhnomPenh zu schaffen, was auch erfolgte.

163 Mekong River Commission (2002): Proceedings of the international expert meeting on early warning for the Mekong River held in Phnom Penh, Cambodia, 27th Febr to 1 March 2002 , MRC Conference Series No.3, Dec. 2002

164 Plate, E.J. & T.Insisiengmay (2005): Early warning systems for the Lower Mekong River. Water International, Vol.30, pp.99-107 [\(2005 Plate Insisiengmay.pdf\)](#)

165 Die Geberländer stimmten diesen beiden Vorschlägen zu, dem ersten insbesondere, weil sich dadurch die Möglichkeit bot, dem Gebäude der Mekong River Commission in Phnom Penh einen neuen Sinn zu geben. Denn die Statuten der MRC sahen ursprünglich vor, dass das MRC Sekretariat alle x Jahre das Land wechseln soll, und dass die aufnehmenden Länder

dafür die notwendigen Räumlichkeiten zur Verfügung stellen müssen. Entsprechend hatte Kambodscha ein sehr stattliches Gebäude erstellt, dann aber zog das Sekretariat um nach Vientiane in Laos, und das Gebäude in Phnom Penh stand leer. Daher beschloss MRC, die Statuten zu ändern, das MRC fest in Laos zu belassen, und in Phnom Penh permanent das RCFMM anzusiedeln.

166 *Eric Laurensen* war ein australischer Kollege, der dies numerische Modell entwickelt hatte und als Vater der modernen Australischen Hydrologie gilt. Im Zuge unseres Austausches mit Australien verbrachte er ein paar Wochen am IHW und zeigte uns seine numerischen Module, die aber *J.Ihringer* nicht übernahm. Ich besuchte ihn bei meinem Aufenthalt in Australien im Jahre 1997 und konnte zu der Zeit auch miterleben, wie die Australischen Kollegen ihn anlässlich seines 70. Geburtstags sehr großartig mit einem Festkolloquium feierten.

167 Plate, E.J. (2007): Early warning and flood forecasting for large rivers. (Asian Pacific Division of IAHR), Hongkong, 18-20.Januar 2007)
Journal of Hydro-Environment Research 1 (2007) pp.80-94
(2009 Hongkong Mekong.pdf)

168 K.M. Shahzad & E.J. Plate (2014): Flood forecasting for the Mekong with data based models. Water Resources Research, 50, (2014 Early Warning WRR.pdf) (doi:10.1002/2013WR015072)

169 *Roman Krzysztofowicz* war einer der begabtesten Graduate Students von *Lucien Duckstein*, und kam ganz groß heraus mit seinem Vortrag anlässlich der Risikotagung, die Lucien und ich 1987 in Tucson, Ariz., veranstalteten. Er war bekannt dafür, sehr theoretische Veröffentlichungen, vor allem zum Thema Hochwasservorhersage mit Hilfe der Bayes Formel zu veröffentlichen, und hatte als Professor in West Virginia eine Reihe von guten Studenten, die seine Ideen mit entwickelt haben.

179 *Ezio Todini* ist ein italienischer Hydrologe und Mathematiker, der über die Systemtheorie zur analytischen Hydrologie kam. Seine guten und klaren theoretischen Arbeiten haben mich immer sehr beeindruckt, sodass ich ihn für den Stockholm Water Prize nominierte, allerdings ohne Erfolg. *Ezio* und ich waren wir einmal zusammen als auswärtige Dozenten bei einer nationalen kroatischen Konferenz in Dubrovnik (?), und auf seine Veranlassung hin nahm ich teil an einer Tagung der italienischen Umweltschüt-

zer zur „Rettung des Tagliamento“, des letzten noch unbeeinflussten italienischen Alpenflusses. Die guten Kontakte zu ihm veranlassten mich, ihn im Juli 1997 um seine Unterstützung für die Abschiedsexkursion des Instituts nach Bologna und Florenz zu bitten, die er bereitwillig zusagte und uns u. A. den Besuch bei der Wasserbehörde in Florenz zur Diskussion der Maßnahmen nach dem Katastrophalen Hochwasser von 1977 möglich machte. Als meine letzte Veranstaltung mit ihm wurde ich eingeladen, am Festkolloquium anlässlich seines 70. Geburtstags 2013 in Bologna teilzunehmen.

171 Plate, E.J. & K. M. Shahzad (2015): Uncertainty analysis of multi-model flood forecasts, In: P.Reggiani und E. Todini (eds.): Special issue on Uncertainty Analysis and Modeling in Hydrological Forecasting. Water, Bd. 7 (12), S.6788-6809; (doi:[10.3390/w7126654](https://doi.org/10.3390/w7126654)) (2015 [Mekong Uncertainty.pdf](#))

172 *Andras Bardossy* war eine große Bereicherung für das Institut. Ursprünglich in Ungarn zum Mathematiker ausgebildet, kam er 1988 auf Empfehlung von *Lucien Duckstein* zu uns, wechselte 1995 auf einen Lehrstuhl an der Universität Stuttgart. Er hatte mehrere Jahre Forschungserfahrung als Teil von *Ducksteins* informeller ungarische Forschergruppe (mit *Istvan Bogardi*) aufzuweisen, die sich hauptsächlich mit der Anwendung von Methoden des Operations Research auf praktische Fragen befasste. *Bardossys* Spezialitäten waren Methoden der Geostatistik, sowie Fuzzy Sets, mit denen er, teils allein und teils mit anderen Mitgliedern von *Luciens* Gruppe, zahlreiche Veröffentlichungen verfasste.

173 Allerdings, die Zerlegung der Kette in auf einander abgestimmte Einzelaufgaben, die jeweils in einer Dissertation gelöst werden können, erwies sich, als das Projekt dann bewilligt war, als sehr schwierig. Ich vermute, dass dies bei solchen Projekten an einer Universität immer eine der Herausforderungen an das Management sein wird, weil Interessenlage und Ziele der einzelnen beteiligten Institute oft nur marginal mit den Zielen des Gemeinschaftsprojektes übereinstimmen.

174 Bronstert, A., Glüsing, B., Plate, E., 1998: Physically-based hydrological modelling on the hillslope and micro-catchment scale: examples of capabilities and limitations. In: Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters. IAHS Publ. No. 248, 1998, pp. 207 – 215

-
- 175 Zehe, E., 1999: Stofftransport in der ungesättigten Bodenzone auf verschiedenen Skalen. Mitteilungen IHW, Heft 64
- 176 Zehe, E. und Flühler, H. , 2001: Slope scale variation of flow pattern in soil profiles. J. Hydrology, Vol.247, pp. 116 -132
- 177 Zehe, E., T.Maurer, J.Ihringer, Plate, E.J.,2001: Modelling water flow and mass transport in a loess catchment. Physics & Chemistry of the Earth, Part B, Bd. 26 (7-8): 487-507.
- 178 Plate, E.J., Zehe, E., (eds.) (2008): Hydrologie und Stoffdynamik kleiner Einzugsgebiete: Prozesse und Modelle. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 366 Seiten
- 179 Plate, E.J.(2009): Classification of hydrological models for flood management. Journal of Hydrology and Earth Systems Sciences, Vol. 13, pp.1-13 (www.hydrol-earth-syst.sci.net/13/1/2009/) (2009 HESS Classification.pdf)

180 *Laudatio*: The 2000 Henry Darcy Medal is awarded to Erich Plate in recognition of his fundamental contributions in water resources research and applied hydrology. Professor Erich Plate is a renowned scientist who made exceptional contributions to the progress of water resources research and applied hydrology during the last 30 years. In these fields he was the leading scientist in Germany for the last decades. He opened the eyes of many water scientists and engineers on the need for a sustainable development and use of water resources. He was one of the first to urge the scientific community for a multi-disciplinary approach, to cope with the future challenges in water resources management.

Internationally he has been very active. As the chairman of COWAR (ICSU) in 1993 he initiated a study on the need for sustainable water resources: "Water in our common future; A research agenda for sustainable development of water resources". He has been guest lecturer at many universities and institutes and supervised more than 60 PhDs. He has an excellent reputation as a researcher (he published over 300 articles in scientific journals) who is respected worldwide, not only for his excellence but also for his stimulating, gentle and honest character.

-
- 181 Merz, B., Bardossy, A., Plate, E.J., 1999: Transition from the point scale to the small catchment scale: exemplified on the Weiherbach catchment. In: Regionalization in Hydrology, eds.: B. Diekkrüger et al., Wallingford: IAHS Pr. 1999, IAHS Publication no. 254, pp. 23 – 31
- 182 Merz, B., Plate, E.J., (1997): An analysis of the effects of spatial variability of soil and soil moisture on runoff. *Water Resources Research* vol. 33, 1997, No. 12, pp. 2909 – 2922
- 183 Hrissanthou, V., 1986: Computation of sediment yield from a large watershed in middle Europe. Proceedings, 3rd International Symposium on River Sedimentation, Jackson, Miss. USA VA
- 184 Plate, E.J., Gerlinger, K., 1995: Erosion von Landflächen. In: *Geographische Rundschau* Jg. 47, H. 12, 1995, S. 692 – 699

185 Neben der Beteiligung an der Konferenz wurden die ausländischen Wissenschaftler auch aufgefordert, einstündige Vorträge vor einem riesigen chinesischen Publikum zu halten. Die Chinesen luden uns danach noch ein zu einer spektakulären Rundreise durch China, mit Nachdruck auf den Geschiebeproblemen, aber auch touristisch sehr lehrreich. Ich wurde dann eingeladen, Mitglied des Advisory Board für das geplante International Center for Erosion and Sedimentation Research (IRTCES) in Beijing anzugehören. Ich denke, ich konnte diese Aufgabe zur Zufriedenheit der chinesischen Kollegen erfüllen. Später, als Präsident von IAHR (1985 -1989) konnte ich den chinesischen Kollegen einen wichtigen Dienst leisten, indem wir im IAHR China den Zugang zu unseren internationalen Konferenzen ermöglichten (es gab damals einen Streit: offiziell war die Bezeichnung „China“ die Bezeichnung für Taiwan, und die USA vor allem wollten dies erhalten, während die Chinesen des Kontinents aus naheliegenden Gründen ablehnten, neben einem solchen China zu fungieren). Wir akzeptierten die sogenannte Olympische Formulierung: Volksrepublik China, und China-Taiwan und alle waren zufrieden.

Aber wie hat China sich zwischen diesem ersten Besuch und heute geändert! Die chinesischen Wissenschaftler bringen gerade auf dem Gebiet des Geschiebetransports ihre praktische Erfahrung und ihre großen theoretischen Kenntnisse ein, und die Spitzenforscher auf diesem Gebiet spielen international wichtige Rollen, allen voran unser *Zhao Yin Wang* (siehe

nächste Endnote), der sich dafür einsetzte, dass eine internationale Gesellschaft für Geschiebeforschung (WASER =World Association for Sedimentation and Erosion Research) gegründet wurde (deren Ehrenmitglied ich wurde, obgleich ich mich sehr dafür eingesetzt hatte, die Geschiebeforschung als Teil der Hydraulik im IAHR zu belassen und dort stärker zu fördern).

186 *Zhao Yin Wang* war der jüngste in dieser Gruppe und *Lins* besonders begabter Zögling, der eine bewundernswerte Karriere noch vor sich hatte: er wurde der führende chinesische Geschiebeforscher, und er trug ganz wesentlich dazu bei, dass die vielen Arbeiten chinesischer Forscher auch westlichen Geschiebeexperten zugänglich gemacht wurden; teils über zahllose, von ihm organisierte Workshops und Konferenzen, teils durch seine weitumfassenden Artikel in allen bedeutenden flussbaulichen Zeitschriften. Wie einstmal *Kitta Ranga Raju* aus Roorkee wurde auch *Zhao Yin Wang* später durch die IAHR als „outstanding young scientist“ geehrt. Damals empfahl *Bing Nan Lin* ihm, ein Jahr an meinem Institut zuzubringen. Daraus wurden drei Jahre. Später war er wahrscheinlich maßgeblich daran beteiligt, dass ich zahlreiche Ehrungen in China erhielt.

187 Casper, M., C., Volkmann, H.N., Waldenmeyer, G. (2003): The separation of flow pathways in a sandstone catchment of the Northern Black Forest using DOC and a nested Approach, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol 28/ 6-7:269-275

188 Plate, E.J., Treiber, B., 1979: A simulation model for determining the optimum area to be irrigated from a reservoir in arid countries. In: 3rd World Congress on Water Resources, Mexico 1979, Papers, Vol. 1: Water for Food Production, pp. 1 – 15 (1979 Mexico Irrigation Speicher .pdf)

189 Treiber, B., Plate, E.J., 1977: A stochastic model for the simulation of daily flows. In: *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol.22, 1977, No.1, pp. 175 – 183

190 Kron, W., Plate, E.J., Ihringer, J., 1990: A model for the generation of simultaneous daily discharges of two rivers at their point of confluence. In: *Stochastic Hydrology and Hydraulics* Vol. 4, 1990, No. 4, pp. 255 - 276

-
- 191 Plate, E.J., Ihringer, J., 1991: Die Auswirkung von Klimaänderungen auf Sturmfluten. In: HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, Jg.128, 1991, Nr.19/20, S.1174-1181 dass. in: Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, Bd. 46, 1991, S. 214 - 224 [\(1991 Sturmflut Hamburg.pdf\)](#)
- 192 Plate, E.J., 1994: The effect of climate change on storm surges. in: L. Duckstein et al. (Eds.): Engineering Risk in Natural Resources Management. With Special References to Hydrosystems under Changes of Physical or Climatic Environment. Dordrecht: Kluwer 1994. (NATO ASI Series E: Applied Sciences Vol. 275), pp. 395 - 415 [\(1994 Stormsurge Deauville.pdf\)](#)
- 193 Plate, E.J., 1995: Risk management of coastal structures. In: 4th Int. Conf. on Coastal & Port Engineering in Developing Countries (COPEDECIV), Rio, 25.- 29.9.1995 [\(1995 COPEDEC Rio.pdf\)](#)
- 194 *Wolfgang Kron* ist einer der getreuesten meiner Mitarbeiter, der schon als Student Hilfsassistentenarbeiten übernahm. Als brillanter Schüler und Student bekam er in den 70-er Jahren ein Stipendium der Studienstiftung des Deutschen Volkes für einen Aufenthalt in den USA. Ich riet ihm damals, nach Davis, California zu gehen, wo *Jaime Amorocho* Hydrologie und Hydraulik lehrte.
- 195 Kron, W., Plate, E., 1992: Bed-load transport at the confluence of two rivers under hydrologic uncertainty. In: Stochastic Hydraulics '92, Proc. of the 6th IAHR Intern. Symp. on Stochastic Hydraulics, Taipei, May 1992, Eds.: J.-T.Kuo, G.-F.Lin, pp.205-212 [\(1992 Sediment two rivers.pdf\)](#)
- 196 Kron, W., Ihringer, J., Plate, E.J., 1991: Generierung von gleichzeitigen Abflussganglinien für Donau und Isar. In: 15. Konferenz der Donauländer über Hydrologische Vorhersagen, 8-13 Okt. 1990, Varna, Bulgarien, Int. Hydrol. Programm UNESCO, Sofia 1991, pp. 69 - 75 [\(1991 Donau Isar Modell.pdf\)](#)

-
- 197 Plate, E.J., 1994: The need to consider non-stationary sediment transport. In: International Journal of Sediment Research Vol. 9, 1994, Spec. Issue, pp. 117-123
- 198 Bardossy, A., Plate, E.J., 1991: Modeling daily rainfall using a semi-Markov representation of circulation pattern occurrence. In: Journal of Hydrology, Vol.122, 1991, pp.33-47
- 199 Bardossy, A. und H.J. Caspary, 1990: Detection of climate change in Europe by analyzing European atmospheric circulation patterns from 1861 -1989. Theoretical and Applied Climatology, Bd. 42, S.155-167
- 200 Schultz, G.A., Plate, E.J., 1973: Developing optimal operating rules for flood protection reservoirs. IFAC Symposium on Control of Water Resources Systems, Haifa 1973. In: Journal of Hydrology, Vol. 28, 1976, No. 2/4, pp. 245 - 264 [\(1973 Optimum reservoir operation Haifa.pdf\)](#)
- 201 Plate, E.J., Schultz, G.A., 1973: Flood control policies developed by simulation. In: Floods and Droughts. Proc. of the 2nd Int. Symp. in Hydrology, Sept.11-13,1972, Ft. Collins. Ed. By E.F.Schulz et al. Ft.Collins, Col.: Water Res. Publ. 1973, pp. 246-258 [\(1973 Simulation reservoirs.pdf\)](#)
- 202 Schultz, G.A., Plate, E.J., 1976: Developing optimal operating rules for flood protecting reservoirs. In: Journal of Hydrology, Vol. 28, 1976, No. 2/4, pp. 245 - 264 [\(1976 Optimum Reservoirs JHydr.pdf\)](#)
- 203 Schmidt, O., Plate, E.J., 1983: Optimaler wasserwirtschaftlicher Speicherbetrieb. In: Zeitschrift für Operations Research, Bd. 27, 1983, pp. B 1 - B 19
- 204 Schmidt, O., Plate, E.J., 1985: Optimization of reservoir operation for irrigation and determination of the optimum size of the irrigation area. In: Proc. of the Hamburg Symposium., Aug.1983, IAHS Publ.no.147,1985. Eds.: E. Plate, N. Buras. pp. 451-461 [\(1985 Opt reservoir Hamburg.pdf\)](#)

-
- 205 Plate, E.J., 1992: Stochastic design in hydraulics: Concepts for a broader application. In: Stochastic Hydraulics '92, Proc. of the 6th IAHR Intern. Symp. on Stochastic Hydraulics, Taipei, May 1992, Eds.: Jan-Tai Kuo and Gwo-Fong Lin, pp. 1 - 15 ([1992 Stochastic design Taipeh.pdf](#))
- 206 Duckstein, L., Plate, E., Benedini, M., 1987: Water engineering reliability and risk: A system framework. In: Engineering Reliability and Risk in Water Resources. Eds.: L.Duckstein, E.J. Plate. Nijhoff 1987. NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences No. 124, pp. 1-20 ([1987Tucson Duckstein.pdf](#))
- 207 Plate, E.J., Duckstein, L., 1987: Reliability in hydraulic design. In: Engineering Reliability and Risk in Water Resources. Eds.: L. Duckstein, E.J. Plate. Nijhoff 1987. NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences No. 124, pp. 27 - 60.
- 208 Plate, E.J., Duckstein, L., 1988: Reliability-based design concepts in hydraulic engineering. Water Resources Bulletin, Vol. 24, 1988, No. 2, pp. 235 - 245 ([1987 Reliability Tucson.pdf](#))
- 209 Plate, E.J. 1993: Forschung im Dienst weltweiter Katastrophenvorbeugung. Vortrag anlässlich der Ehrenpromotion, TU Hannover, 24.2.1993) ([1993 Vortrag Ehrenpromotion.pdf](#))
- 210 Plate, E.J., 1986: Trends in stochastic hydraulics: Stochastic design for water quality of a river. In: Megatrends in Hydraulic Engineering. A Commemorative Vol. Honoring Hunter Rouse. Eds.: M.L. Albertson and C.N.Papadakis. Fort Collins, Col.: Colorado State Univ. 1986, pp.155-175
- 211 Plate, E.J., 1986: Reliability analysis in hydraulic design. In B.C.Yen Ed.: Stochastic and Risk Analysis in Hydraulic Engineering. Littleton, Col.: Water Res.Publ. 1986. pp.37-47 ([1986 Risk Urbana.pdf](#))
- 212 Plate, E.J. (1987): Möglichkeiten der Anwendung von Zuverlässigkeitsanalysen im Wasserbau. In: Buck, W., Plate, E.J.(eds.), 1987: Zuverlässigkeitstheorie bei wasserwirtschaftlichen Aufgaben. Ergebnisse

eines Rundgesprächs. Weinheim: VCH Verl. 1987. (DFG, Senatskomm. f. Wasserforschung, Mitteilung 9). pp.5-2

- 213 Plate, E. J. 2000: Stochastic design – has its time come? In: Z.-Y. Wang, S.-X. Hu, Eds.: Stochastic Hydraulics (2000), Proc. 8th Int. Symposium on Stochastic Hydraulics, Beijing, China, July (2000), Rotterdam: Balkema (2000), S. 3 – 14 [\(2000 Stoch Hydraulics.pdf\)](#)
- 214 Plate, E.J., Davenport, A.G., 1995: The risk of wind effects in cities. In: J.E.Cermak, A.G.Davenport, E.J.Plate, D.X.Viegas. Eds.: Wind Climate in Cities, Dordrecht: Kluwer 1995 (NATO ASI Series E Vol.277) pp. 1 – 20 [\(1995 ASI Urban 1.pdf\)](#)
- 215 Wacker, J., Plate, E.J., 1994: Reliability-based local design wind pressures for simple rectangularly-shaped buildings. In: Schueller et al. Eds.: Structural Safety and Reliability, Rotterdam: Balkema 1994, pp. 1689 – 1696)
- 216 Plate, E.J., 1982: Bemessungshochwasser und hydrologisches Versagensrisiko für Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken. In: Wasserwirtschaft Jg. 72, 1982, H.3, pp.91-97 [\(1982 Staudammsicherheit Wawi.pdf\)](#)
- 217 Plate, E.J., 1984: Reliability analysis of dam safety. In: Frontiers in Hydrology. (Ven Te Chow-Memorial Volume). Eds.: W.H.C. Maxwell, L.R. Beard. Littleton, Col.: Water Res. Publ. 1984, pp. 288 - 304 [\(1984 Dam reliability Ft. Collins.pdf\)](#)
- 218 Plate, E.J., Buck, W., Meier, J., 1985: A simulation model for determining the probability of overtopping of dams. In: 15eme Congres des Grands Barrages, Lausanne, 1985, vol. 4, pp. 191 – 202 [\(1985 ICOLD Dam overtopping.pdf\)](#)
- 219 Meon, G., Plate, E.J., 1989: Zuverlässigkeit einer Talsperre bei Hochwasser. In: Wasserwirtschaft, Vol. 79, 1989, No. 7/8, pp. 344-348
- 220 Plate, E.J., Meon, G., 1988: Stochastic aspects of dam safety analysis. In: Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers; Hydraulic and Sanitary Engineering, No. 393/II-9, 1988, May, pp. 1 – 8

-
- 221 Plate, E.J., 1989: Reliability concepts in reservoir design. In: Nordic Hydrology, Vol. 20, 1989, pp. 231 – 248 (reprinted as Plate, E.J., 1992: Reliability concepts in reservoir design. In: Water, Development and the Environment. Eds.:W.James J.Niemczynowicz. Boca Raton: Lewis Publ. 1992, pp. 226 - 249 [\(1992 Reliability Chapter 14 Book James.pdf\)](#))
- 222 Ihringer, J., Plate, E., 1993: Sedimentation of reservoirs and its effects on the hydrologic risk of dam failure. IV World Congress on Water Resources, IWRA, 1982, Buenos Aires, auch In: W. Kron, Ed.: Contributions to Non -Stationary Sediment Transport, Univ. Karlsruhe, Inst. f. Hydrologie u. Wasserwirtschaft, H.42, 1993, pp.C-1-C-12
- 223 *Antonio de Almeida*, Professor an der Universität von Lissabon, hatte mit der Talsperrenverwaltung Portugals ein Konzept aufgestellt zur Überprüfung der Sicherheit aller Portugiesischen Talsperren und hierzu ein Dambruchmodel entwickelt, das er gerne in die Praxis umsetzen wollte. Es gelang ihm, hierfür die finanzielle Unterstützung der Forschungsabteilung der NATO zu gewinnen, die mich als Gutachter einsetzte. Seine Mitarbeiter erweiterten das Konzept zu einer Risikostudie, die mit großem Erfolg umgesetzt wurde. Das ganze Projekt wurde später in einem Buch beschrieben, das zwar in englischer Sprache erschien, aber leider nur bei einem Portugiesischen Verlag veröffentlicht wurde.
- 224 Plate, E.J., 1994: The effect of climate change on storm surges. In: L. Duckstein et al. Eds.: Engineering Risk in Natural Resources Management. With Special References to Hydrosystems under Changes of Physical or Climatic Environment. Dordrecht: Kluwer 1994. (NATO ASI Series E: Applied Sciences Vol. 275) pp. 395 - 415 [\(1994 Stormsurge Deauville.pdf\)](#)
- 225 Plate, E.J. 2005: Risk design and Sea Level rise. In: G.Augusti, G.I.Schueller, M.Ciampoli, Eds.: Safety and Reliability of Engineering Systems and Structures. Proceedings, Ninth International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR '05, Rome), June 2005 Millpress, Rotterdam, Abstract p.479, paper on CD ROM [\(2005 ICOSSAR Dyke height.pdf\)](#)

-
- 226 Plate, E.J., 1986: Trends in stochastic hydraulics: Stochastic design for water quality of a river. In: M.L. Albertson and C.N. Papadakis, Eds.: Megatrends in Hydraulic Engineering. A Commemorative Vol. Honoring Hunter Rouse. Fort Collins,Col.: Colorado State Univ. 1986, pp.155-175 [\(1986 Stochastic Water Quality Ft-Collins.pdf\)](#)
- 227 Plate, E.J., Duckstein, L., 1990: Stochastic aspects of water quality modeling for nonpoint sources. In: Proceedings of the International Symposium on Water Quality Modeling of Agricultural Non-Point Sources, Logan, Utah, June 19-23, 1988, US Dept.of Agr., Agricultural Research Service ARS-81, June 1990, Pt.2, pp.631-654 [\(1990 Logan.pdf\)](#)
- 228 Plate, E.J., 1991: Probabilistic modelling of water quality in rivers. In: Water Resources Engineering Risk Assessment. Ed.: J. Ganoulis, Berlin: Springer-Verl. 1991, (NATO ASI Ser. G 29), pp. 137 – 166 [\(1991 ASI Ganoulis Water Quality\)](#)
- 229 Plate, E.J., Duckstein, L., 1991: Risk analysis for water supply from a river polluted by nitrate runoff. In: I. Bogardi and R. D. Kuzelka Eds.: Nitrate Contamination, Berlin: Springer Verl. 1991, NATO ASI Ser., Vol. G 30, pp. 67 - 79 [\(1991 Nitrate pollution.pdf\)](#)
- 230 Schmitt-Heiderich, P., Plate, E., 1998: River pollution from urban stormwater runoff. In: Statistical and Bayesian Methods in Hydrological Sciences. Eds.: E. Parent et al. (IHP-V/Technical Documents in Hydrology No. 20) Paris: Unesco 1998, pp. 251 – 262 [\(1998 Quality Risk Bernier.pdf\)](#)
- 231 Duckstein, L. und E.J. Plate 1983: A system framework for hydrological reliability with application to the design of structures. In: Scientific procedures applied to the planning, design and management of Water Resources Systems. Proceedings, Hamburg IAHS symposium, pp.213 -223 [\(1985 IAHS Hamburg Systems Duckstein\)](#)
- 232 Plate, E.J., Davenport, A.G., 1995: The risk of wind effects in cities. In: Wind Climate in Cities, eds.: J.E.Cermak, A.G.Davenport, E.J.Plate, D.X.Viegas. Dordrecht: Kluwer 1995 (NATO ASI Series E Vol.277) pp. 1 – 20 [\(1995 ASI Urban 1.pdf\)](#)

233 Plate, E.J., 2002: Flood risk and flood management, *Journal of Hydrology*, Vol. 267, pp. 2-11, siehe auch: Plate, E.J. (2004): Risk And Decision in Flood Management. (lecture) International Symposium on Approaches for Global Water Hazards and Risk Management in the 21st Century. Tsukuba, Japan (2004 Risk and decision for floods Tsukuba)

234 *Hsieh Wen Shen* (siehe Endnote 43) schrieb mir hierzu: „The US Congress appointed an official committee at the end of the 20 Century to study flood problems. I was one of the 12 members of that committee, and we declared that floods should be analysed by risk analysis and all hydraulic structures should be analysed from the risk point of view. We came out and stated that no hydraulic structure is absolutely safe but is designed at a certain risk. This has been adopted by the US Army Corps of Engineers and the public”

235 Plate, E.J., Kron, W., Seiert, S., 1993: Beitrag der deutschen Wissenschaft zur "International Decade for Natural Disaster Reduction (IDNDR)" – Zusammenfassende Übersicht. In: E. Plate et al., Eds.: *Naturkatastrophen und Katastrophenvorbeugung*. Weinheim: VCH 1993, pp. 1 - 71

236 Plate, E.J., Kron, W., 1994: The International Decade for for Natural Disaster Reduction (IDNDR): A challenge to science. In: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* Vol. 13, 1994, pp. 45 – 48

237 Ich habe sie seinerzeit mit schlechtem Gewissen zu dem zunächst wenig versprechenden Job überredet, doch beide starteten aus dieser Tätigkeit in eine glänzende Karriere: *Wolfgang Kron* als wichtiger Mitarbeiter bei der Münchener Rückversicherung, und *Bruno Merz* als Professor am Geoforschungszentrum Potsdam, wo nach dem Ende der Dekade für ihn eine eigene Abteilung zur Risikoforschung gegründet wurde.

238 Der Kanadier *Jim Bruce*, ein früherer Präsident der World Meteorological Organisation (WMO) wurde Chairman des STC – IDNDR, gefolgt nach mehreren Jahren durch einen anderen alten Vizepräsidenten der WMO, *Roman Kintnar*. Vorsitzende des Deutschen Nationalkomitees waren nacheinander Botschafter a.D. *van Well*, die früheren Bundesminister

Wischnewski und *Blühm*, dann der ehem. Bürgermeister von Bremen *Koschnik* und die ehemalige Bundesministerin *Irmgard Schweitzer*. Nachhaltigste Unterstützung fand jedoch der Wissenschaftliche Beirat durch den Direktor des Geoforschungszentrums (GFZ) Potsdam, *Rolf Emmermann*.

239 Plate, E.J., Merz, B., Eds.: 2001: Naturkatastrophen: Ursachen, Auswirkungen, Vorsorge. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart

240 Seit ca. dem Jahr 2000 planten Land Nordrhein- Westfalen und das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) ein UNU Institut, das sich mit Umwelt und Menschlicher Sicherheit befassen sollte (Research and Training Center = RTC on Environment and Human Security of the United Nations University (UNU/EHS)). Ich wurde Mitglied, dann Vorsitzender der Planungsgruppe für dieses Institut. Gemeinsam planten wir einen vom BMFT großzügig geförderten Workshop, dessen Ziel es war, die wichtigsten anstehenden Fragen zur Katastrophenforschung zur Bewältigung von Naturkatastrophen zu identifizieren. (Herr *Müller-Solger*, im Ministerium stellte sofort die Summe bereit, die ich für die Vorbereitung - u. A. Reisen nach Genf und Washington - und Durchführung des Workshops benötigte). Daraus entstand ein vorläufiges Programm:

„The UNU-EHS is supposed to connect European Research Centers with the programs of the United Nations Organisations, and help to foster research and training activities on disaster mitigation in developing countries. It is to create an environment in which researches and managers in the field of disaster management of developed and developing countries can interact and work together. An additional focus is on the effect of environmental degradation, which leads to slow onset disasters, and on the interaction of gradual changes of the environment with rapid onset events. A special emphasis is to be laid on the development of the vulnerability of megacities“.

Die Mitglieder der Planungsgruppe wurden beauftragt, den Leiter für diese UNU/RTC zu finden. Die Wahl fiel auf *Janos Bogardi* (siehe Endnote 241) der mit großem Geschick und unter Einsatz seiner weitläufigen Verbindungen zu UN Organisationen in kurzer Zeit ein sehr schnell angesehenes Institut aufbaute, das in Bonn im Internationalen Zentrum angesiedelt ist und eng mit der Uni Bonn kooperiert.

241 *Janos Bogardi*, ist der Sohn des Professors für Hydraulik *Janos Bogardi* an der Technischen Universität Budapest, mit dem ich gemeinsam in den Leitungsgremien der IAHR tätig war, und den ich mehrmals in Budapest, vor allem während meiner Zeit als IAHR Präsident besuchen konnte. Der jüngere *Janos* promovierte bei mir und arbeitete nach der Promotion (im Jahre 1979) am IHW einige Jahre in einem Ingenieurbureau, wechselte aber dann als Dozent an das Asian Institute of Technology in Bangkok (wo ich mehrfach in seiner Abteilung Vorträge hielt und wir uns befreundeten), nach einem Umweg als Professor an die Landwirtschaftliche Hochschule in Wageningen (Niederlande) übernahm er eine Sachbearbeiter Funktion bei der UNESCO.

242 Plate, E.J. (2006): A human security index. In J.Birkmann Ed.: Measuring Vulnerability to Natural Hazards. United Nations University Press, United Nations University, Tokyo, Japan, pp.246 -268 (2007 [Human security Birkmann.pdf](#))

243 Plate, E.J., 1992: Scientific and technological challenges. In: International Conference on Water and the Environment: Development Issues for the 21st century, 26-31 Jan. 1992, Dublin, Ireland, Key-note Papers, pp. 10.01 - 10.21

244 Ähnliche Erfahrungen konnte ich öfters machen – zuletzt in Teheran, im Jahre 2006. Ich wurde eingeladen, um bei einer Konferenz über allgemeine Katastrophenvorbeugung in Teheran im Januar 2006 einen „key note“ Vortrag zu halten. Ich nahm die Einladung gerne an und bereitete sorgfältig zwei Vorträge vor. Dann kam die Zeit meines Vortrags – und da wurde ich praktisch ausgeladen, weil ein Minister der Regierung in letzter Minute eine Rede ankündigte, wodurch meine Vortragszeit auf 10 min gekürzt wurde.

245 Plate, E.J., 1992: Sustainable development of water resources: a challenge to science and engineering. In: 4th Symposium on Water Resources, 3./4.Aug.1992, Tokyo, pp.1-16

246 Das Konzept für eine Graduate School in Bangkok ist unter maßgeblicher Mitwirkung meines früheren Lehrers und Kollegen *Maurice Albertson* aus Ft. Collins entstanden. Sie wurde von den Amerikanern im Rahmen der South East Asien Treaty Organization (SEATO) finanziert. Die Amerikaner

wollten damit einen Beitrag zur Entwicklung der SEATO Länder leisten, mit dem erklärten Ziel, durch Unterstützung der Entwicklung der Länder der SEATO (= South East Asian Treaty Organisation) diese gegen den Kommunismus zu stärken. *Albertsons* Motivation war seinerzeit allerdings weniger antikommunistisch und machtpolitisch: er wollte asiatischen Studierenden eine am USA-Modell orientierte Ausbildung in den für die Entwicklung der Infrastruktur ihrer Volkswirtschaft wichtigsten Fächern bieten, einerseits weil es günstiger war, Professoren aus den USA nach Asien zu schicken als Studenten in die USA zu holen (wo die Chancen sehr groß waren, dass sie dort blieben anstatt ihrer Heimat zu dienen), und andererseits, um qualifizierte Fachleute für den Neuaufbau Südost Asiens nach dem Vietnam Krieg auszubilden, der damals gerade begonnen hatte. Der politischen Linie folgend, haben die Amerikaner nach Ende des Vietnam Kriegs ihre Unterstützung des AIT ziemlich rasch aufgegeben, die SEATO Graduate School wurde zum Asian Institute of Technology (AIT), und das AIT musste nach neuen Quellen der Unterstützung suchen. Der erste Präsident des von Amerika unabhängigen AIT war *Milton Bender*, ein zunächst wenig bedeutender Kollege an der CSU in Ft.Collins, der aber als Präsident ungeahnte Fähigkeiten zur Organisation und Einwerbung von Mitteln entwickelte. Ihm gelang es, das zunächst ganz von den SEATO Staaten und vor allem durch die Amerikaner finanzierte Institut auf tragfähige internationale Geberländer umzuschichten, z.B. auch auf die Bundesrepublik. Dadurch kamen auch deutsche junge Ingenieure - Assistenten an deutschen Universitäten - zu Professuren auf Zeit an das AIT, so auch eine Reihe junger Karlsruher Kollegen (z.B. mein ehemaliger Doktorand *Janos Bogardi* und andere Karlsruher Bauingenieure). Der Präsident wechselte nach *Benders* Ausscheiden mehrmals - auch ich wurde zu einer Zeit, da ich noch kein Interesse an einem Wechsel hatte, aufgefordert, mich für diese Position zu bewerben. Ich habe aber mehrmals am AIT vorgetragen, teils mit einer ganzen Vorlesung (über Risikomanagement), teils auch zu anderen Themen.