



44. IWASA

Internationales Wasserbau-Symposium
Aachen 2014

**Wasserbauliches Versuchswesen –
Aus Anlass der Neuen Wasserbauhalle
des IWW**

9. und 10. Januar 2014

Möglichkeiten und Perspektiven wasserbaulicher Modellversuche

Holger Schüttrumpf

Abstract

Physical and numerical models, field measurements, theoretical and analytical solutions are applied in hydraulic engineering and water resources management for a variety of problems. Each method has its own importance, possibilities, strengths and weaknesses. It should be the objective of hydraulic engineers to apply, to combine and to couple the different methods in an optimum way to make use of synergies. Use of only one method will result in hydraulic monoculture and often a waste of money. Therefore, research and practice in hydraulic engineering and practice should apply and combine the various methods to reduce costs, to increase the reliability of hydraulic measures and to optimize the performance of these measures.

Zusammenfassung

Im Wasserbau und in der Wasserwirtschaft werden zur Lösung verschiedener Fragestellungen physikalische und numerische Modellverfahren, Messungen in der Natur sowie theoretische und analytische Verfahren eingesetzt. Jede wasserbauliche Methode hat ihre Bedeutung, Möglichkeiten, Stärken und Schwächen. Ziel muss es sein, die verschiedenen Methoden optimal einzusetzen, zu kombinieren bzw. zu koppeln, um Synergieeffekte zu nutzen. Eine ausschließliche Nutzung einer Methode führt zu wasserbaulicher Monokultur und gegebenenfalls hohen Kosten. Daher sollten Forschung und Praxis im Wasserbau und in der Wasserwirtschaft die verschiedenen Methoden möglichst optimal einsetzen und kombinieren, um auf diese Weise Kosten zu sparen, die Zuverlässigkeit wasserbaulicher Maßnahmen zu erhöhen sowie deren Funktionsfähigkeit zu optimieren.

1 Einführung

Wasserbauwerke sind sehr teure Anlagen, da es sich um Spezialbauwerke handelt, die den jeweiligen individuellen Randbedingungen anzupassen sind. Die Kosten für ein Wasserbauwerk können schnell die Größenordnung von mehreren Hundert Millionen Euro erreichen. Um diese wasserbaulichen Anlagen wirtschaftlich wie funktional optimal zu planen und zu realisieren, stehen dem Wasserbauingenieur verschiedene Werkzeuge, d. h. wasserbauliche Methoden, zur Verfügung. Zu den wasserbaulichen Methoden zählen die numerischen Verfahren, die physikalischen Modellversuche und Experimente, die Messungen und Beobachtungen in der Natur sowie die theoretischen, ana-

lytischen und empirischen Ansätze. Diese Methoden werden in Praxis und Forschung eingesetzt, um wasserbauliche Fragestellungen zu beantworten. Die Wahl einer Methode hängt von zahlreichen Faktoren ab, die von den Vor- und Nachteilen der jeweiligen Methode sowie weiteren Faktoren abhängen aber auch einem zeitlichen Wandel unterworfen sind. Der Wasserbau hat – wie viele andere Wissenschaften auch – in den vergangenen Jahrzehnten einen dramatischen Methodenwandel vollzogen. Mit der Entwicklung und dem Aufbau von jedermann zugänglichen Rechnerkapazitäten und numerischen Modellen haben sich die numerischen Modellverfahren als zusätzliche wasserbauliche Methode in Forschung und Praxis etabliert und die herkömmlichen Methoden zum Teil vollständig verdrängt. Ein Beispiel hierfür sind die großen Tidemodelle der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg oder die Hafenmodelle von Delft Hydraulics, die heutzutage sogar als Museum dienen (Abb. 1).



Abb. 1: Wasserbauliches Museum (ehemaliges Hafenmodell von Delft Hydraulics) (Foto: Schüttrumpf)

Numerische Modelle können aber auch heutzutage aufgrund ihrer inhärenten Nachteile zur Lösung vieler wasserbaulicher Fragestellungen (z. B. Fluid-Struktur-Interaktionen, Ethohydraulik, Hydrotoxikologie, Hydrochemie) nicht bzw. noch nicht eingesetzt werden. Daher werden weiterhin physikalische Modellversuche und Experimente an wasserbaulichen Instituten und Forschungseinrichtungen benötigt. Ein Beleg hierfür ist auch das von der europäischen Union geförderte HYDRALAB IV-Projekt mit 22 teilnehmenden Instituten aus 11 europäischen Ländern zur Förderung der Nutzung wasserbaulicher Großforschungseinrichtungen (Große Wellenkanäle, Strömungskanäle, Wellen- und Strömungsbecken, Kreisgerinne, etc.). Ein Ziel des HYDRALAB IV-Projektes

ist die Förderung eines Composite-Modellings zur ausgeglichenen Nutzung der verschiedenen wasserbaulichen Methoden in der Wasserbauforschung (<http://www.hydralab.eu/>) (Abb. 2).

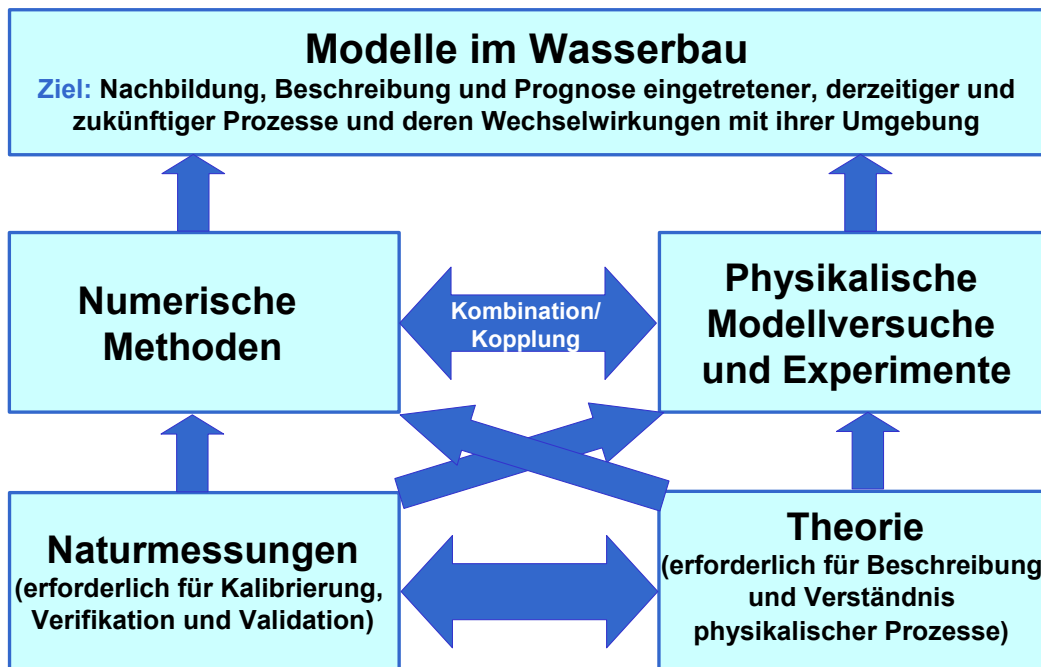


Abb. 2: Methoden für wasserbauliche Modelle

Auch eine Analyse von mehr als 400 Beiträgen in 4 ausgewählten peer-reviewed Journals (IAHR Journal of Hydraulic Research; ASCE Journal of Hydraulic Engineering; ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering; Coastal Engineering; Jahrgänge 2006 und 2007) zeigt eine nahezu gleich hohe Anzahl von Beiträgen zu numerischen und physikalischen/experimentellen Methoden. 41 % aller Beiträge wurden den numerischen Methoden, 40 % den physikalischen Modellversuchen und Experimenten und 13 % den Messungen in der Natur zugewiesen. Doppelte Zuweisungen wurden vorgenommen, wenn ein Beitrag sowohl einen experimentellen als auch einen numerischen Forschungsteil aufwies.

Experimentelle Methoden und auch Messungen in der Natur haben somit weiterhin eine sehr hohe Bedeutung in der wasserbaulichen Forschung. Der Leitsatz von Leonardo da Vinci hat somit auch heutzutage noch Gültigkeit:

Leonardo da Vinci (1452–1519)

Bei Abhandlungen über das Wasser ist stets die experimentelle Erfahrung voranzustellen.

Doch auch zeitgenössische Autoren räumen der experimentellen Forschung eine hohe Bedeutung ein:

- „*Physical process modelling will play a pivotal role in composite modelling.*“ (Oumeraci, 1999)
- „*Wir brauchen die Betreiber, die bereit sind, zum Zweck der Weiterentwicklung 1:1 Versuche durchführen zu lassen.*“ (Köngeter, 2003)
- „*Field experiments and experimental research are nevertheless indispensable to the synergetic approach of hydraulic research.*“ (van Os et al., 2004)
- „*Die Kombination von numerischen Modellen und physikalischen Untersuchungen bietet ein großes Entwicklungspotential bei flussmorphologischen Modellen.*“ (Aufleger, 2005)
- „*Numerische und physikalische Modelle brauchen einander, um die Wirklichkeit annähernd abbilden zu können.*“ (Strobl, 2006)

Für physikalische Modellversuche und experimentelle Untersuchungen im Rahmen der angewandten Forschung und der Grundlagenforschung, aber auch für praktische Aufgabenstellungen stehen an deutschen Universitäten und an der Bundesanstalt für Wasserbau umfangreiche Versuchsflächen (incl. Freiflächen) zur Verfügung.

Dies darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass der physikalische Modellversuch auf wenige Wasserbauinstitute an Universitäten und Forschungseinrichtungen wie die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) beschränkt ist. Kein Ingenieurbüro, keine Baufirma und keine Verwaltung (ausgenommen die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes mit der BAW) leisten sich in Deutschland eine Infrastruktur für physikalische Modellversuche. In einigen Ingenieurbüros sind numerische Modelle und ggf. Messungen in der Natur im praktischen Einsatz. Sind physikalische Modellversuche und Experimente erforderlich, so wird auf die oben erwähnten Einrichtungen oder entsprechende Einrichtungen im Ausland zurückgegriffen.

Ziel der vorliegenden Arbeit soll es sein, die Bedeutung und Möglichkeiten der wasserbaulichen Methoden sowie Herausforderungen für die Zukunft darzustellen. Dazu werden zuerst die Begriffe rund um das Thema wasserbauliche Modelle definiert. Es folgt eine Darstellung der Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden mit einigen abschließenden Aussagen zur Wahl der Methode. Abschließend werden die Herausforderungen an die Methoden des Wasserbaus dargestellt.

Methode: Es werden vier wasserbauliche Untersuchungsmethoden unterschieden: (i) physikalisch, (ii) numerisch, (iii) theoretisch und (iv) Natur

Modell: Nachbildung (Duden, 2000) eines Gegenstands, Zustands oder Prozesses (Ein Modell kann dabei sowohl gedanklicher, physikalischer oder mathematisch/numerischer Natur sein.)

Modellversuch: Versuch zur Nachbildung eines Gegenstands, Zustands oder Prozesses für praxisbezogene Fragestellungen

Experiment: wissenschaftlicher Versuch (Duden, 2000) (wird auch als Laborversuch bezeichnet)

Möglichkeiten der Klassifikation von Modellen in Modellfamilien gibt es viele. Im Folgenden soll eine Klassifikation entsprechend ihres Anwendungsgebietes in Strömungsmodelle, Transportmodelle und Bauwerksmodelle verwendet werden (Abb. 3). Andere Klassifikationen (z. B. nach Anwendungsgebiet (Fluss, Grundwasser, Ästuar, etc.), nach Aufgabenstellung (Hochwasserschutz, Baggern und Verklappen, etc.)) sind ebenfalls möglich.

Ziel der Strömungsmodelle ist die klein- und großräumige Beschreibung von Strömungsprozessen in Flüssen, Seen, Talsperren, Kanälen, Rohrleitungen, Ästuaren, Meeren, Ozeanen und im Grundwasser. Unterschiedliche Modellverfahren sind für die unterschiedlichen Einsatzgebiete erforderlich. Während z. B. die Überströmung eines Wehres die Nachbildung kleinräumiger Turbulenzphänomene erfordert, ist zur Nachbildung der Tidedynamik im Ozean die Wirkung der Coriolis-Kraft zu berücksichtigen. Strömungsmodelle stellen den Kern jeder wasserbaulichen und wasserwirtschaftlichen Untersuchung dar.

Das Ziel von Transportmodellen ist die klein- und großräumige Beschreibung der verschiedenen durch die Hydrodynamik verursachten Transportprozesse von Geschiebe, Suspension, Salz, Wärme, Sauerstoff und sonstiger Wasserinhaltsstoffe. Auch Transportmodelle reflektieren die Anforderungen des jeweiligen Einsatzgebietes und stehen in direkter Kopplung mit einem Strömungsmodell.

Bauwerksmodelle haben die konstruktive und funktionale Bemessung von Bauwerken wie Deichen und Dämmen, Wehren, Stauanlagen, Deckwerken, Buhnen, etc. zum Ziel. Funktional beeinflussen die verschiedenen Wasserbauwerke die Hydrodynamik mit dem Ziel der Strömungsregulierung, Stromführung, Verbesserung der Unterhaltung, etc. Konstruktiv sind Wasserbauwerke auf extreme hydraulische Beanspruchungen aus Strömungen, Wellen, Hochwasser, etc. zu bemessen.

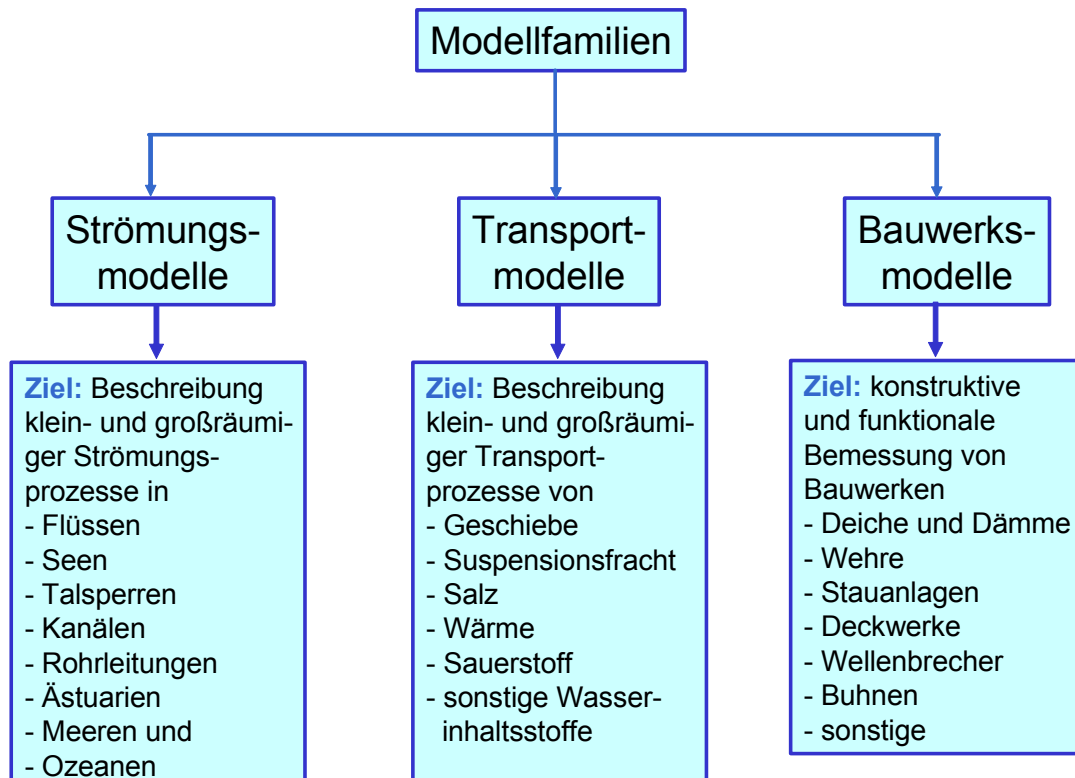


Abb. 3: Modellfamilien

Für jede Modellfamilie (Strömungsmodelle, Transportmodelle, Bauwerksmodelle) existieren Anwendungen der verschiedenen wasserbaulichen Methoden.

Zusätzlich sind in den letzten Jahren vermehrt interdisziplinäre Modelle in Zusammenarbeit mit der Biologie entstanden. Diese ethohydraulischen oder hydrotoxikologischen Modelle arbeiten mit Fischen oder Kleinstlebewesen und erfordern vom Versuchingenieur neben der Nachbildung der strömungsdynamischen Prozesse auch ein umfangreiches Verständnis des Verhaltens der eingesetzten Organismen.

2 Vor- und Nachteile

2.1 Einführung

Im Folgenden sollen die Vor- und Nachteile der vier grundlegenden wasserbaulichen Methoden beschrieben werden (Abb. 4). Eine Allgemeingültigkeit der Aussagen ist nur bedingt gegeben, da Vor- und Nachteile im Einzelfall kritisch zu hinterfragen und zu diskutieren sind. Daher sind Ausnahmen von den folgenden Aussagen möglich und werden teilweise auch dargestellt, wenn dies für erforderlich gehalten wird. Die Entscheidung, welche Methode(n) im konkreten Fall gewählt wird, hängt somit von der kritischen Diskussion und Abwägung der jeweiligen Vor- und Nachteile ab. Daher stellt

in vielen Fällen die Kombination mehrerer wasserbaulicher Methoden im Sinne eines Composite Modelling oder einer hybriden Modellierung eine ideale Lösung dar.



Abb. 4: Modellversuche mit amerikanischen Flusskrebsen

2.2 Analytische und theoretische Verfahren

Vorteile: Analytische und theoretische Verfahren nutzen die fundamentalen physikalischen Grundgleichungen (Massenerhaltung, Impulserhaltung, Energieerhaltung). Daher können analytische Lösungen u. U. sehr einfach sein und sind somit für den Einsatz z. B. in Tabellenkalkulationen oder für den Taschenrechner geeignet. Einfache analytische Lösungen und theoretische Verfahren eignen sich auch zu einer Verifikation numerischer Modellergebnisse oder zur Plausibilitätsprüfung von Messungen in der Natur oder im Labor. Beispiele für theoretische Verfahren sind z. B. die Kontinuitätsgleichung, die Gleichung nach Lagrange für Schwall und Sunk sowie die verschiedenen theoretischen Wellenmodelle (Airy-Laplace, Stokes, etc.).

Eine Untergruppe der theoretischen Verfahren stellen die empirischen bzw. semi-empirischen Ansätze dar.

Bei den semi-empirischen Verfahren werden Lösungen der physikalischen Grundgleichungen theoretisch hergeleitet. Unberücksichtigte Prozesse sowie variable geometrische, hydrodynamische, morphodynamische oder sonstige Einflussfaktoren auf die theoretische Lösung werden dann auf der Grundlage von physikalischen Modellversuchen oder Messungen in der Natur mit Hilfe von empirischen Koeffizienten berücksichtigt. Beispiele hierfür sind z. B. die Poleni-Gleichung zur Ermittlung eines Wehrüber-

falls oder die Gaukler-Manning-Strickler(GMS)-Gleichung zur Ermittlung des Freispiegelabflusses.

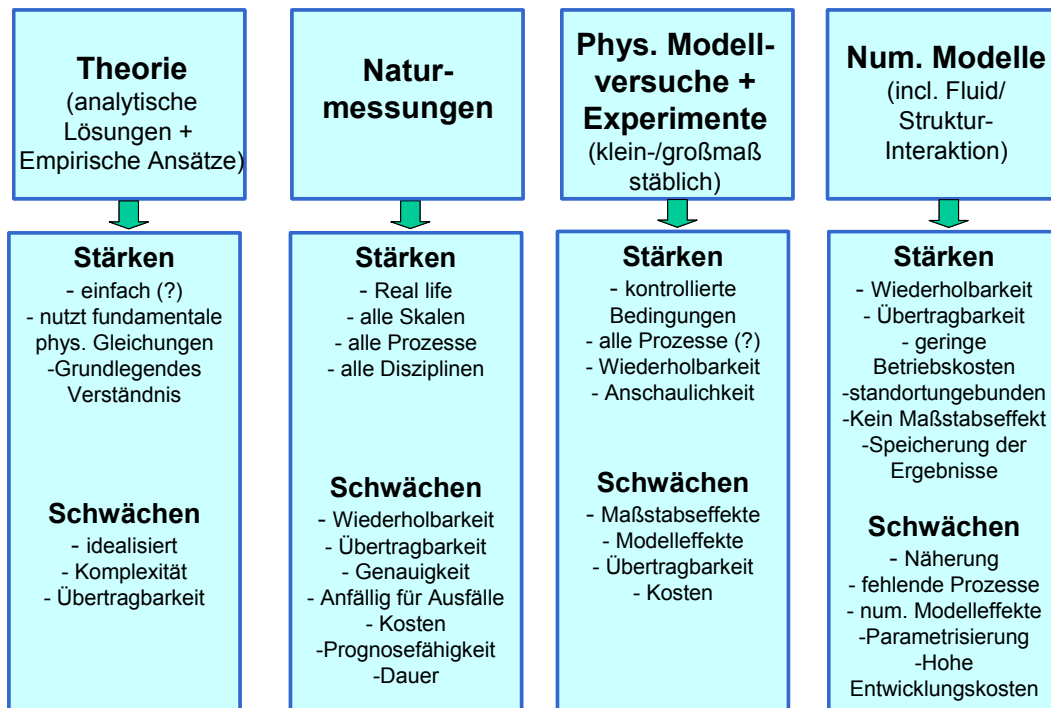


Abb. 5: Stärken und Schwächen wasserbaulicher Untersuchungsmethoden

Empirische Ansätze werden auf der Grundlage dimensionsanalytischer Betrachtungen ermittelt, wenn eine rein theoretische Beschreibung sehr komplexer Prozesse nicht möglich und eine Parametrisierung erforderlich ist. Beispiele hierfür sind z. B. die Beschreibung des Erosionsbeginns von Sedimenten oder der Wellenaufbauhöhe an Deichen.

Empirische und semi-empirische Ansätze sind insbesondere dann erforderlich, wenn sehr komplexe Prozesse parametrisiert werden müssen.

Nachteile: Analytische und theoretische Verfahren idealisieren die realen Bedingungen sehr stark. Die natürliche Variabilität der hydraulischen Randbedingungen, die Komplexität der Sohltopographie und der Bauwerksgeometrie sowie deren Wechselwirkungen werden nicht oder häufig unzureichend berücksichtigt. Somit sind sie für komplexe Situationen ungeeignet und nicht übertragbar. Vielfach sind gerade analytische Lösungen mathematisch hochkompliziert und für den Praxiseinsatz untauglich. Daher erfordern analytische Ansätze wie Kontinuitäts- und Bewegungsgleichungen zu ihrer Lösung den Einsatz numerischer Methoden.

Empirische und semi-empirische Ansätze sind strenggenommen nur unter den Randbedingungen einsetzbar, für die sie ermittelt wurden. Komplexe Situationen werden nicht berücksichtigt und die natürlichen Verhältnisse und Prozesse werden stark idealisiert. Daher ist eine Übertragbarkeit auf „ähnliche Verhältnisse“ nur mit äußerster Vorsicht möglich.

Analytische Lösungen, empirische und semi-empirische Ansätze idealisieren die natürlichen Prozesse. Analytische Gleichungen können vielfach nur durch den Einsatz numerischer Methoden gelöst werden.

2.3 Messungen in der Natur

Vorteile: Messungen und Untersuchungen in der Natur stellen eine „real-life“-Betrachtung dar, d. h. alle Prozesse, alle Skalen, alle Disziplinen werden auch mit ihren Inhomogenitäten, Turbulenzen, Streuungen, etc. vollständig berücksichtigt. Damit sind Messungen in der Natur unabhängig von den Maßstabs- und Modelleffekten der physikalischen Modellversuche und Experimente sowie den numerischen Effekten, Parametrisierungen, empirischen Gleichungen und Koeffizienten der numerischen Modellverfahren. Naturmessungen sind auch dann von Vorteil, wenn es z. B. um die Ermittlung von Anfangs- und Randbedingungen für physikalische Modellversuche und numerische Modelle, um die Glaubwürdigkeit der Beschreibung von Prozessen oder im Rahmen von Beweissicherungsmessungen um die Überprüfung prognostizierter Wirkungen von Maßnahmen am und im Gewässer geht.

Bestimmte Untersuchungen sind **nur** in der Natur möglich, da die entsprechenden Anfangs- und Randbedingungen weder im numerischen Modell noch im Modellversuch herstellbar sind. Ein Beispiel hierfür sind Wellenüberlaufversuche an Deichen mit Grasbewuchs (Abb. 6). Physikalische und numerische Experimente scheitern aufgrund der Schwierigkeit, den Wuchs des Grases sowie die Verwitterung (Alterung) des anstehenden Bodens im Modell zu berücksichtigen. In diesem Fall empfehlen sich Messungen in der Natur (van der Meer et al., 2006).

Messungen in der Natur stellen eine **real-life** Betrachtung dar und berücksichtigen alle Skalen, Prozesse, Disziplinen sowie deren Wechselwirkungen.

Nachteile: Messungen in der Natur haben insbesondere bei Prognosen Schwächen, d. h. bei der Beschreibung der Wirkung von Maßnahmen am Gewässer, da die Wirkung einer

Maßnahme natürlich erst nach deren Realisierung wirkt. Auch der Vorteil der real-life Betrachtung stellt hinsichtlich der Übertragbarkeit und Wiederholbarkeit erzielter Ergebnisse vielfach einen großen Nachteil dar. Inhomogenitäten, natürliche Streuungen und die Variabilität der Prozesse, Materialeigenschaften und Randbedingungen lassen es häufig nicht zu, klare Ursache-Wirkung-Beziehungen zu identifizieren und zu beschreiben. Dieser Aspekt ist insbesondere bei Beweissicherungsmessungen von Bedeutung, wenn das maßnahmenbedingte Signal durch die natürliche Veränderung eines Systems überlagert und gegebenenfalls überprägt wird. Messungen in der Natur lassen sich selten exakt wiederholen und vollständig übertragen.



Abb. 6: Beispiel für eine Messung in der Natur – Wellenüberlauf an Kleideich mit Grasbewuchs (Foto: Schüttrumpf)

Die **real-life** Betrachtung der Messung in der Natur lässt vielfach eine klare Identifikation von Prozessen, Zusammenhängen und Wechselwirkungen nicht zu.

Beispielsweise ist die Untersuchung eines Deich- oder Dammbbruchvorgangs als Wirkung eines extremen Ereignisses (infolge von Orkanen, Hurrikanen, Tsunamis, Sturmfluten, Hochwasser, etc.) aufgrund der Seltenheit und Unvorhersehbarkeit des Ereignisses in der Natur nicht möglich. Messungen in der Natur sind auf die natürlichen Belastungen, d. h. gegebenenfalls extreme Wetterverhältnisse mit Eis, Sturm und Regen, eine häufig fehlende Infrastruktur (z. B. fehlender Stromanschluss) sowie unerwünschte menschliche Einflüsse (Vandalismus, Diebstahl, etc.) auszulegen. Daraus ergeben sich ein erhöhter Wartungs- und Unterhaltungsaufwand bei steigenden Kosten, teure Mess-

geräte, eine Anfälligkeit für Ausfälle sowie unerwünschte Störsignale. Auch die Bequemlichkeit mancher Ingenieure, die sich gerne am Schreibtisch oder in einer klimatisierten Halle aufhalten, wirkt sich als Nachteil aus.

2.4 Physikalische Modellversuche und Experimente

Vorteile: In einem geeigneten Modellmaßstab bilden physikalische Modellversuche und Experimente die maßgebenden physikalischen Prozesse inkl. ihrer nichtlinearen Wechselwirkungen nach. Dadurch können auch Interaktionen zwischen hydrodynamischen Prozessen, Bauwerk und Sohle sowie weitere interdisziplinäre Fragestellungen (z. B. Wechselwirkungen mit Flora und Fauna; Interaktion Schiff/Wasserstraße (Abb. 7) untersucht werden. Auch Mehrphasenuntersuchungen (Wasser, Luft, Sediment, etc.) können ideal im physikalischen Modellversuch und Experiment durchgeführt werden. Insbesondere wenn die zu untersuchenden Prozesse noch unbekannt bzw. nicht ausreichend beschrieben sind, ist bei geeignetem Modellaufbau ein naturähnliches Ergebnis zu erwarten. Dies ist ein Vorteil im Rahmen wasserbaulicher Grundlagenforschung. Daher können physikalische Modellversuche und Experimente beschreibend, diagnostisch und prognostisch eingesetzt werden.

Im Gegensatz zu den Messungen in der Natur können physikalische Modellversuche und Experimente jederzeit unter gleichen Rand- und Anfangsbedingungen wiederholt werden. Chaotische Einflüsse aufgrund variabler Umweltbedingungen können weitgehend ausgeschlossen werden. Innovative Messsysteme (z. B. PIV; LDA) erlauben zeitlich und räumlich hochaufgelöste Messungen hydrodynamischer, morphodynamischer und sonstiger Parameter.

Physikalische Modellversuche haben eine hohe Anschaulichkeit und werden daher in vielen Verfahren und Projekten zur Kommunikation von Projektergebnissen auch an Nichtfachleute eingesetzt. Aufgrund ihrer Anschaulichkeit sind physikalische Modellversuche und Experimente ein wichtiges Instrument der universitären Lehre auf den Gebieten des Wasserbaus und der Wasserwirtschaft (Lehrlabor und Versuchshalle) (Naudascher, 1979).

Grundlegende physikalische Prozesse (z. B. Transportformeln) werden in der Regel aus physikalischen Modellversuchen und Experimenten hergeleitet (DVWK, 2003). Hieraus folgt die Notwendigkeit physikalischer Modellversuche und Experimente als **unverzichtbareres Werkzeug** wasserbaulicher Grundlagenforschung.

Physikalische Modellversuche und Experimente sind weiterhin aufgrund ihrer Anschaulichkeit ein wichtiges Instrument der **universitären Lehre**.



Abb. 7: Innovativer wasserbaulicher Modellversuch zur Wechselwirkung Schiff-/Wasserstraße (Foto: BAW, 2014)

Nachteile: Die Ergebnisse physikalischer Modellversuche und Experimente reflektieren das Know-how des Modellierers hinsichtlich Vorbereitung, Durchführung, Analyse und Interpretation der modellierten, beobachteten und gemessenen Prozesse. Nur wenige physikalische Modellversuche und Experimente können im Naturmaßstab (Maßstab 1:1) durchgeführt werden und sind daher nicht durch Maßstabeffekte beeinflusst, die sich im verkleinerten Maßstab aufgrund der Unmöglichkeit der Nachbildung aller Kraftvektoren zur Erfüllung dynamischer Ähnlichkeit in einem Modell ergeben, das gleichzeitig auch geometrisch und kinematisch ähnlich sein soll. Die Unmöglichkeit der Erfüllung voller dynamischer Ähnlichkeit besteht in der Erfordernis der Anpassung der physikalischen Eigenschaften des Wassers (Viskosität, Oberflächenspannung, Elastizität, etc.), die nur unter besonderen Schwierigkeiten möglich ist (Miller, 1972). Bei morphodynamischen Modellen ist neben der Ähnlichkeit der Hydrodynamik zusätzlich die Ähnlichkeit des Feststofftransports zu gewährleisten (DVWK, 2003).

Maßstabeffekte entstehen aufgrund der Verletzung bzw. mangelhaften Erfüllung der maßgeblichen Ähnlichkeitsgesetze im verkleinerten Modell.

Modelleffekte entstehen durch die nur annähernd naturgetreue Nachbildung des Modells und der maßgebenden Kräfte sowie aufgrund der Datenerfassung und Datenanalyse.

Neben Maßstabeffekten beeinflussen auch Modelleffekte das Ergebnis physikalischer Modellversuche und Experimente. Modelleffekte entstehen durch die nur annähernd naturgetreue Nachbildung des Modells und der maßgebenden Kräfte sowie aufgrund der Datenerfassung und Datenanalyse. Quellen von Modelleffekten sind z. B. die Vermessung eines Wasserbauwerks im Gewässer in der Natur, die Konstruktion eines Wasserbauwerks im Modell (z. B. Oberflächenrauheit), die Randsteuerung, die Messung (Position und Anzahl der Messpositionen, Art des Messgeräts), die Datenerfassung (z. B. Abtastrate), die Datenanalyse (z. B. Analyse- und Simulationszeitraum) sowie vernachlässigte Prozesse (z. B. Wind). Auch biogene Prozesse (Bodenverfestigung, Vegetation) können im Modell nicht nachgebildet werden. Aufgrund der zahlreichen Möglichkeiten für Modell- und Maßstabeffekte ist ein hohes Maß an Erfahrung beim planenden, ausführenden, analysierenden und interpretierenden Versuchingenieur erforderlich. Nachteilig für physikalische Modellversuche wirken sich auch die relativ hohen Kosten aus, da eine Übertragbarkeit des Modells auf ähnliche Projekte und Anwendungen nur selten gegeben ist.

2.5 Numerische Modellverfahren

Vorteile: Der wesentliche Vorteil numerischer Modellverfahren ist ihr flexibler, standort-unabhängiger Einsatz unter Berücksichtigung aller maßgebenden zwei- und gegebenenfalls dreidimensionalen Prozesse für beschreibende, diagnostische und prognostische Untersuchungen unter Berücksichtigung ihrer nichtlinearen Wechselwirkungen. Numerische Modelle eignen sich auch insbesondere für großräumige und langfristige Untersuchungen, die aufgrund von Maßstabeffekten (bzw. nicht vorhandener Versuchseinrichtungen) und fehlender Zeit nicht im physikalischen Modell bzw. in der Natur durchführbar sind. Daher können bei heutigen Anforderungen die großen Flussgebietsmodelle, Ästuarmodelle und Ozeanmodelle nur im Rechner untersucht werden. Kleinräumige turbulente Prozesse werden parametrisiert und spielen für die Aussagefähigkeit und Genauigkeit eine untergeordnete Rolle. Aufgrund ihrer Flexibilität können mit demselben numerischen Modellverfahren unterschiedliche Modelle aufgebaut und verschiedene Fragestellungen gelöst werden. Aufgrund dieser Flexibilität können Erweiterungen und Ergänzungen im Modellverfahren selber (d. h. im Programmcode) zeitgleich von mehreren Modellen genutzt werden. Auch die Wiederholbarkeit von Untersuchungen im numerischen Modell ist gegeben. Dadurch können auch sehr einfach gleiche Analyse- und Differenzberechnungen unterschiedlicher Szenarien auf allen Rechenpunkten durchgeführt werden. Eine nachträgliche Analyse anderer Parameter ist ebenfalls möglich. Numerische Modellverfahren können, soweit sie auf handelsüblichen PCs oder Workstations laufen, standortunabhängig ohne besondere Infrastruktur eingesetzt werden. Ausnahmen stellen hier z. B. die großen Ästuarmodelle der Bundesanstalt für Wasserbau dar, die für die zeitnahe Ermittlung von Berechnungsergebnissen ein High-Performance-Computing erfordern. Im numerischen Modell können beliebige Anfangs- und Randbedingungen sowie eine Vielzahl von Varianten untersucht werden.

Dies macht numerische Modellsysteme zu einer sehr kostengünstigen und flexiblen wasserbaulichen Methode – insbesondere für den praktischen Einsatz. Grafische Möglichkeiten der Präsentation von Simulationsergebnissen sind ebenfalls als Vorteil für numerische Modelle zu sehen (gegebenenfalls kann aber auch ein Zuviel an animierter Grafik Zweifel an der Seriosität von Modellergebnissen erzeugen!).

Großskalige und langfristige Untersuchungen stellen ein klassisches Anwendungsgebiet numerischer Modelle dar. Auf diesem Gebiet stellt das numerische Modell die dominante wasserbauliche Methode dar.

Nachteile: Numerische Modellverfahren und Modelle reflektieren das Know-how und die Kenntnisse des Systementwicklers und des Modellierers. Es können aber nur die Prozesse beschrieben werden, die im Modellverfahren (d. h. im Programmcode) auch berücksichtigt wurden, es kann auch das beste Modellverfahren – angewandt von einem unerfahrenen Anwender – zu falschen Ergebnissen führen, wenn Einstellungen wie Gitterabstand, Simulationsschritt, Sohlrauheit, etc. (unbemerkt) falsch gewählt wurden. Moderne Systeme versuchen hier dem Anwender möglichst wenig Entscheidungsspielraum zu geben. Eine Gefahr besteht auch in der zu schnellen und unüberlegten Anwendung eines numerischen Modellverfahrens, da der Rechner auch bei falschen Einstellungen scheinbar richtige Ergebnisse liefern kann. Die „Interpretation“ und die Verantwortung für die Richtigkeit der Modellergebnisse werden oft nur zu gerne dem Rechner übertragen. Beispiele hierfür sind Projekte, bei denen der Modellierer aufgrund seiner Simulationsergebnisse nicht mal zwischen schießender und strömender Fließbewegung unterscheiden konnte und so zu vollkommen falschen Interpretationen kam.

Ähnlich wie bei den physikalischen Modellversuchen treten bei den numerischen Modellverfahren und Modellen numerische Modelleffekte auf, die sich aus der Identifikation und Selektion der maßgebenden physikalischen Prozesse (so können z. B. Vegetation und biogene Effekte höchstens vereinfacht nachgebildet werden), der mathematischen Formulierung dieser Prozesse und ihrer numerischen Umsetzung ergeben (Lösung der nichtlinearen Terme in den Differentialgleichungen und der daraus folgenden numerischen Dissipation, Beschreibung der Wirbelstrukturen (DNS-Simulation, LES-Simulation, RANSE-Simulation), Wahl des Turbulenzmodells (z. B. $k-\varepsilon$ oder $k-\omega$ -Modell)). Weitere numerische Modelleffekte entstehen bei der horizontalen, vertikalen und zeitlichen Diskretisierung des Modells und der zu betrachtenden Prozesse sowie bei der Anfangs- und Randwertsteuerung des Modells. Auch eine Vielzahl empirischer Gleichungen und Konstanten führt genauso zu numerischen Effekten wie die anschließende Datenspeicherung und Datenanalyse. Verschiedene numerische Effekte können für verschiedene (kalibrierte und verifizierte) numerische Modelle zu unterschiedlichen Ergebnissen (Abb. 8) führen. Daher ist ein Multi-model-approach, d. h. der Aufbau

ähnlicher numerischer Modelle mit verschiedenen Modellverfahren zur Lösung der gleichen Aufgabenstellung, wichtig für die Beurteilung der Güte und Aussagefähigkeit eines Simulationsergebnisses (Plüss und Schüttrumpf, 2004).

Numerische Modelleffekte entstehen aufgrund der (a) Identifikation und Selektion der physikalischen Prozesse, (b) der mathematischen Formulierung der maßgebenden physikalischen Prozesse, (c) der numerischen Umsetzung der mathematischen Gleichungen und Modellverfahren, (d) der räumlichen und zeitlichen Diskretisierung, (e) der Anfangs- und Randsteuerung des Modells und (f) der Datenanalyse und -auswertung.

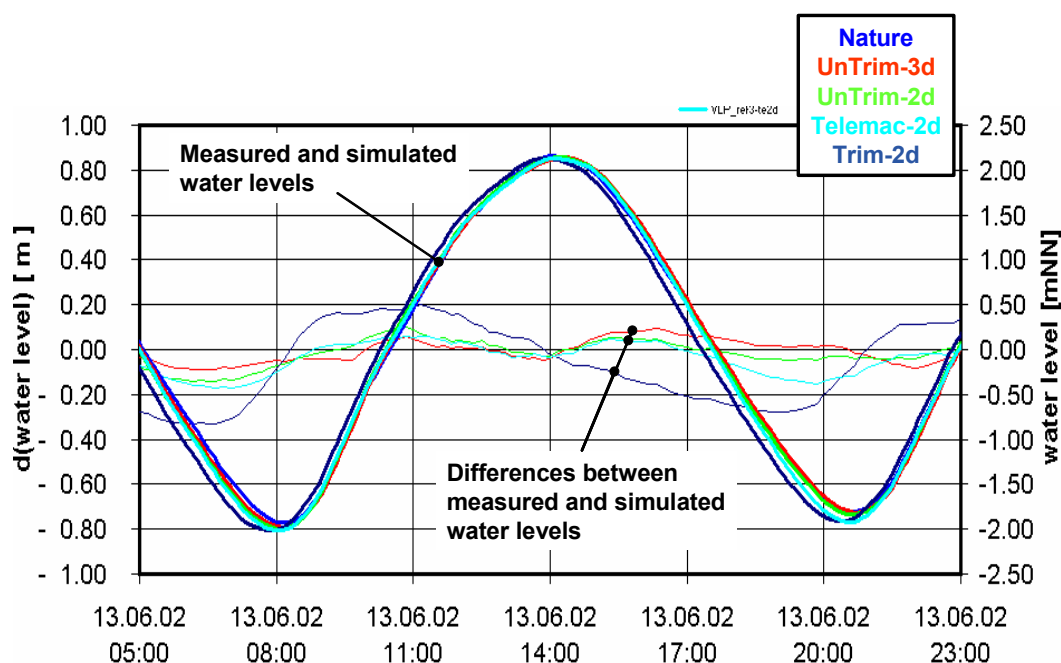


Abb. 8: Gemessene und berechnete Tidekurve am Pegel Voslapp (Innenjade) (Plüss u. Schüttrumpf, 2004)

Häufig werden numerische Modelle auch als kostengünstige Alternative zum physikalischen Modell gesehen. Dies ist sicherlich vor dem Hintergrund praktischer Anwendungen vielfach gegeben. In der angewandten Forschung sowie erst recht in der Grundlagenforschung, wenn der Aufbau eines numerischen Modellverfahrens erforderlich ist, können die Entwicklungskosten eines numerischen Modellverfahrens die Kosten für den Aufbau und den Betrieb eines physikalischen Modells u. U. um ein Vielfaches übersteigen. Auch der Aufbau des Berechnungsgitters darf insbesondere bei großen und aufwändigen Modellen nicht unterschätzt werden.

Die Beantwortung interdisziplinärer Fragestellungen kann u. U. im numerischen Modell aufgrund einer fehlenden Kopplung nicht möglich sein. Ein Beispiel hierfür stellen Untersuchungen zum Versagen von Deckwerken infolge Wellenbelastung dar.

2.6 Wahl einer wasserbaulichen Methode

Die Wahl einer wasserbaulichen Methode hängt im Einzelfall von einer Vielzahl von Faktoren ab. Einen Einfluss auf die Wahl haben die Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden. Weiterhin entscheiden Grad der Komplexität bzw. der Nichtlinearität der zu untersuchenden Prozesse, die Skalen (Zeit, Raum, Disziplinen), die Größe und Wichtigkeit eines Projekts, das Anwendungsgebiet (Forschung, Praxis), die Untersuchungsebene (Pre-Feasibility, Design, Research) genauso über die Wahl der wasserbaulichen Methode wie die Ausstattung der Einrichtung (Forschungsinstitut, Ingenieurbüro, Behörde) und die Präferenz des Auftraggebers bzw. Auftragnehmers. So ist insbesondere die Vergabe von physikalischen Modellversuchen und Experimenten auf wenige Institute an Universitäten und sonstigen Forschungseinrichtungen beschränkt, während einfache numerische Modellverfahren auch von Ingenieurbüros, Baufirmen und Behörden beschafft, aufgebaut und betrieben werden.

Aufgrund der diversen Vor- und Nachteile der verschiedenen wasserbaulichen Methoden ist vielfach eine Kombination von Methoden im Sinne eines Composite-Modellings bzw. einer hybriden Modellierung anzustreben, um Synergieeffekte zu nutzen (Oumeraci, 1999; Schäffer, 1999) (Abb. 9). Hybride Modelle nutzen methodisch unterschiedliche Modelle zur Lösung einer wasserbaulichen Aufgabenstellung durch Kompensation der jeweiligen Schwächen einer Methode mit den Stärken einer anderen Methode. In Abhängigkeit des Grads der Kopplung werden (a) ungekoppelte, (b) lose gekoppelte und (c) voll gekoppelte hybride Modelle unterschieden (Rutschmann, 2005). Insbesondere aufgrund der Unsicherheiten in den Modellen, der natürlichen Variabilität sowie menschlicher Einflussfaktoren ist diese Vorgehensweise sinnvoll. So zeigt bereits die Modellvalidation Abweichungen zwischen Modell (numerisch bzw. physikalisch) und Naturmessung. Diese Abweichungen können sowohl auf die Modellunsicherheiten (z. B. numerische Effekte und physikalische Modelleffekte) als auch auf die Messung der Vergleichsparameter in der Natur sowie ihre natürliche Variabilität zurückgeführt werden (Abb. 10).

Die Notwendigkeit der gemeinsamen Nutzung der verschiedenen wasserbaulichen Werkzeuge im Rahmen der angewandten Forschung sowie der Grundlagenforschung wird daher von zahlreichen Autoren als absolut notwendig erachtet (z. B. Vollmers, 1998; Aufleger, 1998; Oumeraci, 1999; DVWK, 2003; Plate u. Köngeter, 2003; van Os et al., 2004).

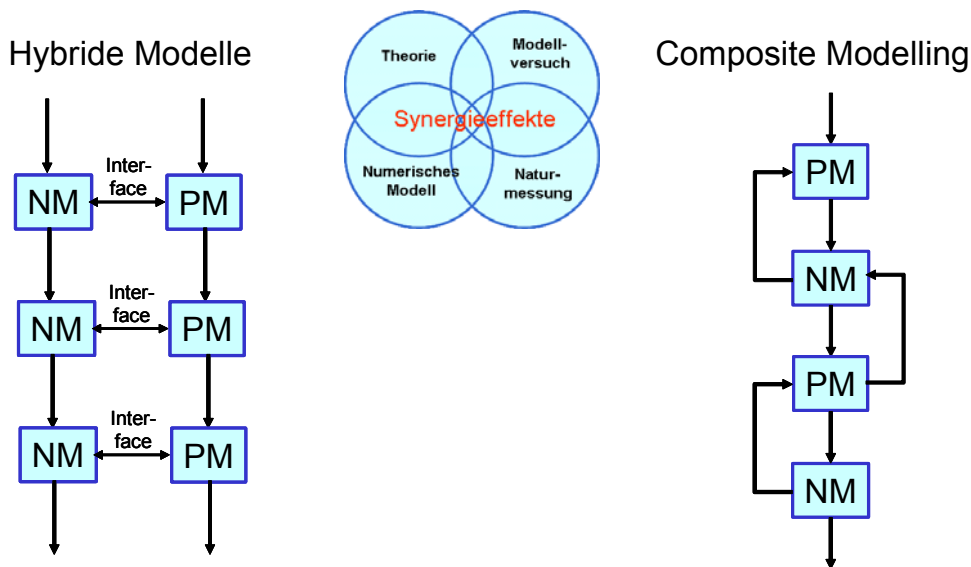


Abb. 9: Hybride Modelle versus Composite Modelling (PM = Physikalisches Modell, NM = numerisches Modell)

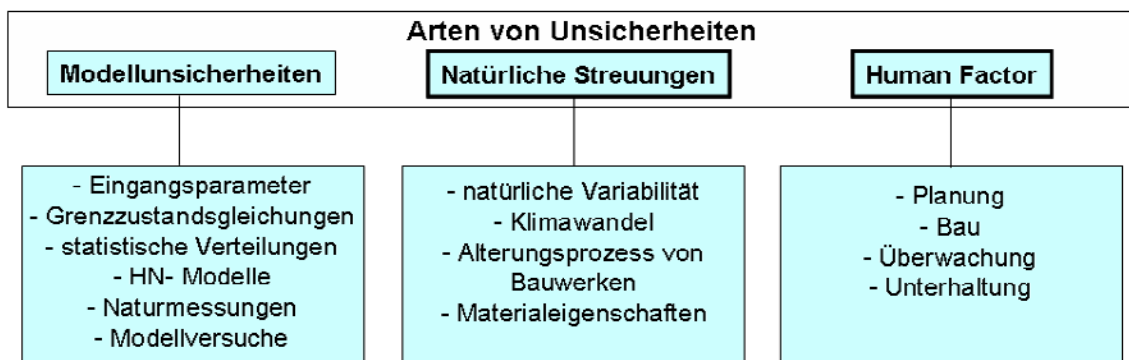


Abb. 10: Unsicherheiten (nach Kortenhaus, 2003)

Die Anwendung physikalischer Modellversuche und Experimente ist auf wenige Wasserbaulabore an Universitäten und Forschungseinrichtungen im Rahmen der Grundlagenforschung und der angewandten Forschung beschränkt. Daher darf die breite Anwendung numerischer Modellverfahren in der Praxis nicht als Beleg für die fehlende Akzeptanz sowie Notwendigkeit wasserbaulicher Modellversuche gesehen werden. Eine Beschränkung der wasserbaulichen Forschung auf eine wasserbauliche Methode führt zu wissenschaftlicher Monokultur und behindert und verhindert die Nutzung von Forschungs- und Entwicklungspotenzialen.

3 Zusammenfassung

Jede wasserbauliche Methode hat ihre Bedeutung, Möglichkeiten, Stärken und Schwächen. Ziel muss es sein, die verschiedenen Methoden optimal einzusetzen, zu kombinieren bzw. zu koppeln, um Synergieeffekte zu nutzen. Eine ausschließliche Nutzung einer Methode führt zu wasserbaulicher Monokultur. Die Weiterentwicklung z. B. numerischer Modelle beschränkt sich dann auf die numerischen Aspekte, während das Verständnis der physikalischen Prozesse sich u. U. nicht weiterentwickelt. Daher sind wasserbauliche Modellversuche und Experimente ein unverzichtbares Werkzeug der Forschung, um Transportformeln, Bemessungsansätze von Bauwerken, Versagensmodelle, etc. weiterzuentwickeln.

Viele aktuelle Fragestellungen, wie z. B. die Durchgängigkeit von Gewässern, die Dauerhaftigkeit und Funktionsfähigkeit von Wasserbauwerken oder die Wechselwirkung zwischen Stoffen im Wasser und aquatischen Organismen, können derzeit nicht bzw. nicht mit ausreichender Genauigkeit durch numerische Modellverfahren beschrieben werden. Entsprechende Fragestellungen können vielfach aufgrund der fehlenden mathematischen Beschreibung der relevanten hydraulischen, biologischen und chemischen Prozesse sowie deren Wechselwirkungen nicht numerisch abgebildet werden. Dies hat in jüngster Vergangenheit zur Entwicklung hydromorphologischer, ökohydraulischer, hydrotoxikologischer, hydrochemischer oder ethohydraulischer Methoden geführt, die eine experimentelle Herangehensweise erfordern (Schüttrumpf, 2013).

Andererseits sind experimentell entwickelte Ansätze in numerische Modellverfahren zu implementieren, um den Weg in die wasserbauliche Praxis zu finden. Messungen und Beobachtungen in der Natur liefern wichtige Randbedingungen für numerische und hydraulische Modelle. Ergänzt werden müssen diese Methoden um die Methoden der 2. Stufe, um insbesondere die Unsicherheiten in den Modellen und Eingangsparametern selber, die natürlichen Variabilitäten und Streuungen zu erfassen. Zu den Methoden der 2. Stufe gehören die Unsicherheitsanalyse, die Probabilistik, die Risikoanalyse, neuronale Netzwerke, Datenbanken, Hybride Modelle und Composite Modelling (Abb. 11).

Konsequenz: Jede wasserbauliche Methode hat ihre Bedeutung, Möglichkeiten, Vor- und Nachteile. Ziel muss es sein, die verschiedenen Methoden optimal einzusetzen, zu kombinieren bzw. zu koppeln, um wasserbauliche Synergieeffekte in Praxis, Forschung und Lehre zu nutzen.

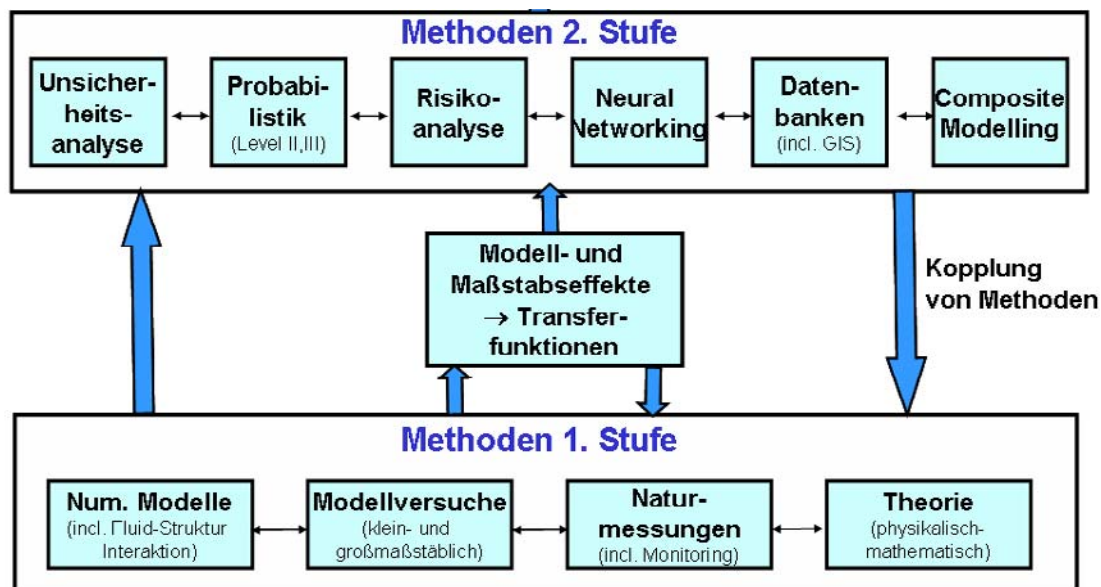


Abb. 11: Methoden des Wasserbaus

4 Schrifttum

Aufleger, M. (1998) Flussmorphologische Modelle – Grundlagen und Anwendungsgrenzen. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Technische Universität München. Nr. 104. S. 198-207

De Vriend, H. (1999) On the role of laboratory experiments in morphological predictions. Proceedings of the Hydralab-workshop in Hannover. Germany. S. 39-48

DVWK (1999) Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern. DVWK Schriften Nr. 127

DVWK (2003) Feststofftransportmodelle für Fließgewässer. ATV-DVWK Arbeitsbericht. ATV-DVWK-Arbeitsgruppe WW2.4 „Feststofftransportmodelle“

Duden (2000) Die deutsche Rechtschreibung. Dudenverlag. 22. Auflage

Engelund, F. u. Hansen, E. (1967) A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Vorlag. Copenhagen.

Forkel, C. (2003) Numerische Modelle für die Wasserbaupraxis: Grundlagen, Anwendungen und Qualitätsaspekte. Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen. H. 130.

Helmig, R. (1999) Einführung in die numerischen Methoden der Umweltströmungsmechanik. Technische Universität Braunschweig. Institut für Computer Anwendungen im Bauingenieurwesen (CAB)

Hughes, S.A. (1993) Physical models and laboratory techniques in Coastal Engineering. Advances Series on Ocean Engineering. Vol. 7. World Scientific

- Köngeter, J. (2003) Wasserbau im Wandel. Internationales Wasserbau-Symposium. IWASA Aachen. Mitteilungen des Lehrstuhls und des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Nr. 131. S. 227-237
- Kortenhaus, A. (2003) Probabilistische Methoden für Nordseedeiche. Dissertation. Technical University of Braunschweig.
- Lang, G. (1999) Zur Schwebstoffdynamik von Trübungszonen in Ästuarien. Dissertation, Institut für Strömungsmechanik, Universität Hannover, Bericht Nr. 26/1990
- Le Méhauté, B. (1976) Similitude in Coastal Engineering. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering. Vol. 102. No. WW3. S. 317-335
- Meyer-Peter, E. und Müller, R. (1948) Formulas for bed-load transport. 2nd Int. IAHR Congress. Stockholm. Sweden
- Miller, R.L. (1972) The role of surface tension in breaking waves. Proceedings of the 13th Coastal Eng. Conference. Vancouver. S. 433-449
- Möller, J.; Weissmann, R.; Schüttrumpf, H.; Kudella, M.; Oumeraci, H.; Richwien, W.; Grüne, J. (2002) Interaction of Wave Overtopping and Clay Properties for Seadikes. Proceedings. 28th Int. Conference on Coastal Engineering. Cardiff
- Naudascher, E. (1979) Einsatz des Hydrauliklabors in der Ausbildung von Bauingenieuren. Bauingenieur 54. S. 121-124
- Oumeraci, H. (1999) Strengths and limitations of physical modelling in Coastal Engineering – Synergy effects with numerical modelling and field measurements. Proceedings of the Hydralab-workshop in Hannover. Germany. S. 7-38
- Plate, E. u. Köngeter, J. (2003) Leitthema 5 „Wasser und Naturkatastrophen“ in Wasserforschung im Spannungsfeld zwischen Gegenwartsbewältigung und Zukunftssicherung. Deutsche Forschungsgemeinschaft. Denkschrift. Wiley-VCH
- Pluß, A.; Schüttrumpf, H. (2004) Comparison of numerical tidal models for practical applications. 29th Int. Conference on Coastal Engineering. Lissabon.
- Schäffer, H.A. (1999) On hybrid modelling in coastal and ocean engineering. Proceedings of the Hydralab-workshop in Hannover. Germany. S. 189-197
- Rutschmann, P. (2005) Hybride Modelle im Wasserbau. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft. H. 104. S. 87-96
- Schüttrumpf, H. (2001) Wellenüberlaufströmung an Seedeichen – Experimentelle und theoretische Untersuchungen. Dissertation. <http://www.biblio.tu-bs.de/ediss/data/20010703a/20010703a.html>
- Schüttrumpf, H.; Oumeraci, H. (2005) Scale and Model Effects in Crest Level Design. 2nd International Coastal Symposium on Iceland. Höfn, the Town of Hornafjörður, Iceland.

Schüttrumpf, H.; Rahlf, H. (2006) Ausbreitung einer Kühlwasserfahne unter Tideeinfluss. Wasserbaukolloquium Dresden 2006 “Strömungssimulation im Wasserbau”. 9. und 10.3.2006

Schüttrumpf, Holger: Brauchen wir wasserbauliche Versuchshallen? = Do we need water engineering Test facilities? - In: Wasserwirtschaft : Hydrologie, Wasserbau, Hydromechanik, Gewässer, Ökologie, Boden. -Wiesbaden: Vieweg + Teubner, GWV-Fachverl. [u.a.] - ISSN: 0043-0978, 2192-8762. -103 (2013) , 4, S./Art.: 3-3

Strobl, T.; Zunic, F. (2006) Wasserbau. Aktuelle Grundlagen – Neue Entwicklungen. Springer Verlag Berlin, Heidelberg.

Strobl, T. (2006) Vorwort zum Workshop über Anwendung und Grenzen von Modellen im Wasserbau. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft. H. 104. S. 87-96

Van der Meer, J.W.; Bernardini, P.; Snijders, W.; Regling, E. (2006) The wave overtopping simulator. Proc. 30th Int. Conf. on Coastal Engineering. San Diego. California (in print)

Van Rijn, L.C. (1993) Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications. Amsterdam.

Van Os, A.; Soulsby, R.; Kirkegaard, J. (2004) The future role of experimental methods in european hydraulic research. PIANC Bulletin AIPCN No. 117. S. 41-46

Vollmers, H.-J. (1998) Experimente und Modellversuche mit beweglicher Sohle. Dresdner wasserbauliche Mitteilungen. Heft 13. S. 29-37.

Anschrift des Verfassers

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe-Str. 17
52065 Aachen
Tel.: +49-(0)241-80-25262
Fax.: +49-(0)241-80-22348