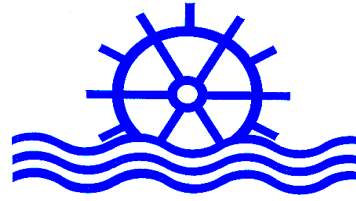


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN



Lehrstuhl für
Wasserbau und
Wasserwirtschaft

Diplomarbeit

**Anwendung des Programms Basement zur numerischen
Berechnung von Gerinneströmungen mit Geschiebetransport**

Benjamin Unsin

Diplomarbeit

zur Erlangung des Grades eines Diplomingenieurs (Univ.)
der Fachrichtung Bauingenieurwesen
an der

Technischen Universität München

Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Anwendung des Programms Basement zur numerischen Berechnung von Gerinneströmungen mit Geschiebetransport

Prüfer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. Rutschmann

Betreuer: Dipl.-Ing. Katharina Fiedler
Dipl.-Ing. Nikos Efthymiou

eingereicht am: 07.05.2008

von: Benjamin Unsin
Benzenauerweg 8
87640 Hörmanshofen

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung.....	2
1.2 Ziele.....	2
1.3 Gliederung der Arbeit.....	3
2. Verwendete Programme	4
2.1 BASEMENT.....	4
2.1.1 Entwicklung.....	4
2.1.2 Modularer Programmaufbau.....	5
2.1.3 Geometrieingabe.....	8
2.1.4 Hydraulische Berechnungen.....	10
2.1.5 Morphologische Berechnungen.....	16
2.2 HEC-RAS.....	19
3. Theoretische Grundlagen	23
3.1 Strömungsgleichungen.....	23
3.1.1 Navier-Stokes Gleichungen.....	23
3.1.2 Flachwassergleichungen.....	24
3.1.3 Saint-Venant Gleichungen.....	26
3.2 Morphologische Berechnungen.....	28
3.2.1 Gleichung von Meyer-Peter und Müller.....	29
3.2.2 Günters Zweikornmodell.....	31
3.2.3 Formel von Meyer-Peter Müller und Hunziker.....	32
3.2.4 Formeln von Parker und Rickenmann.....	33
3.2.5 Exner Differentialgleichung.....	34
3.2.6 Das Active-Layer-Konzept.....	36
3.3 Numerische Lösung.....	37
4. Dokumentation der durchgeführten Berechnungen	39
4.1 Beispiel 1: Rechteckgerinne.....	40
4.1.1 Geometrie.....	40
4.1.2 Berechnungen.....	41
4.1.3 Fazit.....	47
4.2 Beispiel 2: Trapezquerschnitt mit Vorland.....	49
4.2.1 Geometrie.....	49
4.2.2 Stationäre Berechnungen.....	50
4.2.3 Instationäre Berechnung.....	54

4.2.4 Fazit.....	56
4.3 Beispiel 3: Trapezquerschnitt mit Morphologie.....	57
4.3.1 Geometrie.....	57
4.3.2 Einkornsimulation.....	57
4.3.3 Mehrkornmodell.....	63
4.3.4 Fazit.....	68
4.4 Beispiel 4: Modellversuch zur Deckschichtbildung.....	69
4.4.1 Versuchsaufbau und Ergebnisse des Modellversuchs.....	69
4.4.2 Abbildung der Geometrie.....	70
4.4.3 Wahl der Randbedingungen.....	71
4.4.4 Abbildung der Sieblinie.....	71
4.4.5 Kalibrierung des Modells.....	73
4.4.6 Ergebnisse.....	77
4.5 Beispiel 5: Wertachhochwasser 2005.....	81
4.5.1 Beschreibung der Ausgangssituation.....	81
4.5.2 Abbildung der Geometrie.....	83
4.5.3 Randbedingungen.....	85
4.5.4 Einkorn- oder Mehrkornmodell?.....	87
4.5.5 Kalibrierung und Ergebnisse.....	90
4.5.6 Fazit.....	95
5. Ergebnisse der Diplomarbeit.....	96
5.1 Hydraulische Berechnungen.....	96
5.2 Morphologische Berechnungen.....	97
5.3 Probleme und Bugs.....	98
5.4 Ausblick.....	99
6. Literatur.....	100
Anhang.....	102
A.1: Stationäre Verhältnisse, Beispiel 1 Rechteckquerschnitt.....	102
A.2: Abflussberechnung im gegliederten Querschnitt.....	103
A.3: Basement Command File.....	105
A.4: Topographie-File im Format FLORIS.....	107
A.5: Topographieausgabe-File.....	108
A.6: Kritischer Abfluss im Beispiel Wertach.....	110
A.7: Kritische Schubspannung nach Günter.....	111
A.8: Weitere Rechenläufe zu Beispiel 5: Wertach.....	112
Selbstständigkeitserklärung und Dank.....	116

1. Einleitung

Numerische Modelle gehören heute in allen Ingenieurdisziplinen zum alltäglichen Planungswerkzeug. Unterschiedlichste technische Fragestellungen erfordern dabei eine Vielzahl an maßgeschneiderten Modellen und Lösungsstrategien. Der Anwendungsrahmen numerischer Modelle im Wasserbau reicht von der Abflusssimulation in weitverzweigten Gerinnesystemen bis hin zur dreidimensionalen Erfassung komplexer lokaler Strömungen. Im Bereich der Hydrologie werden numerische Verfahren seit vielen Jahren erfolgreich zur Hochwasserprognose und Speichersteuerung angewendet. Neben rein hydraulischen Fragestellungen gewinnt die Modellierung von Geschiebetransportvorgängen zunehmend an Bedeutung.

Morphologische Prognosen werden in der Praxis zur nachhaltigen Planung flussbaulicher Maßnahmen benötigt. Hierzu zählen Hochwasserschutzprojekte, die Renaturierung einzelner Gewässerabschnitte, Ausbauarbeiten für die Binnenschifffahrt oder zur Nutzung der Wasserkraft.

In der morphologischen Forschung sollen komplexe fraktionierte Transportvorgänge modelliert und Sortier- und Austauschprozesse an der Sohlenoberfläche quantifiziert werden. Die Beschreibung solcher Vorgänge erfordert differenziertere Ansätze, viele davon wurden erst im letzten Jahrzehnt entwickelt. Bei den zugrunde liegenden Modellvorstellungen handelt es sich um theoretische Konstruktionen, die versuchen die Realität nachzubilden. Sie wurden auf empirischem Weg, also aus Beobachtungen in der Natur bzw. Versuchsergebnissen abgeleitet. Ihr Einsatzbereich und ihre Prognosefähigkeit ist daher begrenzt.

Vielfach kann auf physikalische Modelle nicht verzichtet werden, um die Ergebnisse einer numerischen Simulation abzusichern. Zudem ist der Bezug zu realen Messwerten unverzichtbare Grundlage bei der Kalibrierung eines numerischen Modells. Beide Modelle bedingen einander. Da ein physikalischer Versuch relativ aufwendig zu realisieren ist, was Zeitbedarf und Kosten angeht, seine Ergebnisse aber ebenfalls einige Unsicherheiten auf Grund vereinfachender Annahmen (Anwendung der Modellgesetze, Maßstabeffekte, Mess-toleranzen oder Fehler) enthalten können, ist eine parallele Überprüfung durch ein numerisches Modell stets angebracht (*Strobl et al. 2006*). Diese Vorgehensweise wird als Hybridmodell bezeichnet und stellt den sichersten Weg zu aussagekräftigen Ergebnissen dar.

Jedes numerische Modell erfordert die Durchführung einer Kalibrierung und Validierung bevor es zur Prognose angewendet werden kann. Unter Kalibrierung versteht man die Anpassung von einzelnen Parametern des Modells, um die berechneten Ergebnisse mit Naturdaten in Einklang zu bringen. Für hydraulische Berechnungen erfolgt die Kalibrierung über die Sohlrauheiten nach Strickler. Diese werden innerhalb des realistischen Rahmens so gewählt, dass die berechneten Fließtiefen mit gemessenen Pegelwerten übereinstimmen. Eine morphologische Simulation wird je nach verwendetem Transportansatz über die Korndurchmesser und die Beschaffenheit des Sohlenmaterials, formelinterne Kalibrierungsfaktoren und numerische Modellgrößen, wie die Dicke der Austauschschicht oder den Upwind-Faktor zur Gewichtung der Sedimentflüsse an den Kanten zwischen zwei Querprofilen, kalibriert. Dabei sollten die getroffenen Annahmen möglichst nahe an der Realität liegen. Die Verwendung geeigneter Randbedingungen ist ebenfalls von großer Bedeutung für das numerische Modell. Mit dem kalibrierten Modell werden anschließend mehrere Rechenläufe z.B. unter veränderten Abflussbedingungen durchgeführt und die Ergebnisse beurteilt. Dabei muss entschieden werden, ob das Modell in der Lage ist, die gestellte Aufgabe adäquat zu lösen,

oder nicht. Diesen Vorgang nennt man Validierung. Liefert das numerische Modell auch unter veränderten Bedingungen plausible Ergebnisse, kann es zur Prognose eingesetzt werden.

1.1 Problemstellung

Numerische Simulationsprogramme spielen also im Wasserbau, wie auch in anderen Gebieten, eine wichtige Rolle. Mittlerweile sind viele unterschiedliche Programme auf dem Markt, die zur Berechnung verschiedenster hydrologischer, hydraulischer und morphologischer Fragestellungen Verwendung finden. Kommerziell vertriebene Software wie Hydro AS oder MORMO ist weit verbreitet. Dem gegenüber steht eine Reihe von Freewareprogrammen, beispielsweise HEC-RAS und HEC 6, die ebenfalls ein breites Spektrum an Funktionen und Anwendungsmöglichkeiten bieten. Stetig wachsende Rechnerleistungen ermöglichen die Bearbeitung neuer, zunehmend komplexer werdender Fragestellungen, die aber auch eine ständige Weiterentwicklung der numerischen Modelle erfordern. So gibt es auf diesem Gebiet oft neue Programme, deren Funktionalität aber nicht in dem Maße getestet und abgesichert sein kann, wie es bei Software der Fall ist, die schon seit längerer Zeit etabliert ist.

Gerade im Bereich des Geschiebetransports besteht noch einiger Forschungsbedarf. In der numerischen Simulation gilt es hier grundsätzlich zu klären, welches Modell für einzelne Fragestellungen am besten geeignet ist.

Bei BASEMENT handelt es sich um eine vielversprechende Neuentwicklung der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich, die eine Reihe unterschiedlicher implementierter Modelle zur Berechnung verschiedener morphologischer Szenarien bereitstellt. Zudem liegt eine umfangreiche Dokumentation vor, was eine nähere Auseinandersetzung mit diesem Programm durchaus lohnend erscheinen lässt.

1.2 Ziele

Ziel der Diplomarbeit ist ein Test der Leistungsfähigkeit dieser neuen Software mit einer Fokussierung auf morphologische Berechnungen mit dem 1D-Modul BASECHAIN.

Neben einer Beurteilung der mit BASEMENT erzielten Ergebnisse soll eine Eingrenzung des Anwendungsrahmens der einzelnen Transportansätze erfolgen. Außerdem sollen Unterschiede zu anderen Programmen wie HEC-RAS aufgezeigt werden.

Da es sich bei BASEMENT um ein relativ neues Programm handelt, das noch nicht intensiv getestet wurde, sollen eventuell auftretende Probleme dokumentiert und in Zusammenarbeit mit dem Entwicklerteam geklärt werden. Damit kann auch ein Beitrag zur Verbesserung zukünftiger Programmversionen geleistet werden.

1.3 Gliederung der Arbeit

Die Arbeit ist in fünf Kapitel unterteilt. In Kapitel 2 wird das Programm BASEMENT näher vorgestellt. Dabei wird auf den systematischen Aufbau der Software, die einzelnen Funktionen und die Anwendung des verwendeten 1D-Moduls BASECHAIN getrennt nach hydraulischen und morphologischen Berechnungsschritten eingegangen. Ergänzend wird das ebenfalls verwendete Programm HEC-RAS kurz beschrieben.

Das dritte Kapitel gibt einen Überblick über die theoretischen Grundlagen der in BASECHAIN implementierten Formeln. Außerdem wird der Weg zur numerischen Lösung der zugrunde liegenden Algorithmen erklärt.

Kapitel 4 beinhaltet die Dokumentation der durchgeführten Berechnungen. Hier wird anhand zweier akademischer Beispiele zunächst eine Sensitivitätsanalyse der zur Verfügung stehenden Parameter für hydraulische und morphologische Berechnungen durchgeführt. Danach sollen die gewonnenen Erkenntnisse zur Modellierung realer Berechnungsszenarien angewendet werden. Es handelt sich dabei um einen Modellversuch zur Deckschichtbildung, der an der Versuchsanstalt für Wasserbau in Oberrach durchgeföhrt wurde und ein Hochwasserereignis an der Wertach im Stadtgebiet von Augsburg.

Der Modellversuch bietet die Möglichkeit, sich mit den Themenkomplexen fraktionierte Berechnung und Deckschichtbildung auseinanderzusetzen. Die vorliegenden Messwerte erlauben eine Kalibrierung des numerischen Modells und eine Überprüfung der Qualität der berechneten Ergebnisse. Anhand dieses Beispiels soll die Leistungsfähigkeit des 1D Moduls in Bezug auf die Vorhersage der Kornzusammensetzungen der Deckschicht und des ausgetragenen Materials beurteilt werden.

Nach der Simulation dieses Modellversuchs unter Laborbedingungen, d.h. unter idealen Verhältnissen (gerade Teststrecke, konstantes Sohlgefälle und stationäre Abflussverhältnisse, homogenes Sohlmaterial) wird BASEMENT zur Nachrechnung eines Hochwasserszenarios mit großen Sohlveränderungen eingesetzt. Dabei sollen im Besonderen die Abbildung der Randbedingungen im numerischen Modell, die Wahl geeigneter Transportansätze und die damit verbundenen Unterschiede in der Kalibrierung untersucht werden. Das Wertachhochwasser vom August 2005 ist hierfür ein perfektes Referenzbeispiel, da auf umfangreiches Datenmaterial zurückgegriffen werden kann, das im Rahmen des Projektes „Wertach Vital“ von verschiedenen Stellen ermittelt und dokumentiert wurde. Anhand dieser Ausgangsdaten soll das numerische Modell so kalibriert werden, dass Prognoserechnungen stattfinden können.

Im fünften Kapitel werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengestellt und beurteilt. Es soll deutlich gemacht werden, welche Fragestellungen im Modell gut erfasst werden konnten und wo es zu Problemen kam. Abschließend wird ein Ausblick auf weitere Entwicklungen und Programmversionen gegeben.

2. Verwendete Programme

Für die Bearbeitung dieser Diplomarbeit kamen die Programme BASEMENT und HEC-RAS zum Einsatz, deren Aufbau und Funktionsweise an dieser Stelle näher vorgestellt werden soll.

2.1 BASEMENT

Im Mittelpunkt dieser Diplomarbeit steht das numerische Softwaresystem BASEMENT, eine Neuentwicklung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich. Der Quellcode von BASEMENT basiert auf früheren Entwicklungen der VAW, wie FLORIS, und wurde so erweitert, dass dem Anwender zusätzlich auch ein 2D Berechnungs-Modul, sowie die Möglichkeit morphologischer Berechnungen mit verschiedenen Transportansätzen, zur Verfügung steht.

Die vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten vor allem im morphologischen Bereich, die Möglichkeit auch 2D Berechnungen durchzuführen, die geplante Erweiterung der Programmfunktionen und nicht zuletzt die kostenlose Nutzung lassen BASEMENT zu einer interessanten Alternative zu anderen Freeware – aber auch zu kommerziellen Programmen werden.

2.1.1 Entwicklung

Die VAW arbeitet bereits seit 30 Jahren an Computerprogrammen, die sich mit hydraulischen und hydrologischen Fragestellungen auseinandersetzen. So wurden beispielsweise die Programme FLORIS und MORMO entwickelt.

Im Jahr 2002 bekam die VAW einen Auftrag zur Mitarbeit am Rhone-Thur Projekt, einem Hochwasserschutzprojekt in der Schweiz. Dies stellte sich als Chance zur Entwicklung eines neuen Softwaresystems heraus, da für das Projektgebiet umfangreiches Datenmaterial ermittelt worden war, welches zur Kalibrierung und Validierung eines numerischen Modells benötigt wird. Für den Fluss Thur lagen neben Pegelwerten auch Vermessungsdaten zu Sohle und Vorländern vor und nach einem größeren Hochwasserereignis vor, womit eine Grundlage zur Verifizierung morphologischer Berechnungen gelegt wurde.

Ende 2002 begann die Arbeit des Entwicklerteams am neuen Programmcode mit dem Titel „BASic EnvironMENT for simulation of environmental flow and natural hazard simulation – BASEMENT“. Das Programm soll zur Strömungssimulation und Prognose von Naturgefahren wie Hochwasser und Murgängen verwendet werden können. Bei der Entwicklung der neuen Software konnte auf bestehende Codes, wie FLORIS und 2dm, zurückgegriffen werden, auf deren Grundlage die neuen Module aufgebaut wurden. Die Motivation zur Neuentwicklung war, ein leistungsfähiges, numerisches Freewaretool zu schaffen, das neben 1D- auch 2D-Berechnungen ausführen kann und den Entwicklungsstand genau zu dokumentieren, da hier noch Lücken bestanden. Um eine gute Grundlage für zukünftige Software-Projekte zu schaffen, wurde ein modularer Aufbau des Programms gewählt. Das heißt, es gibt mehrere voneinander unabhängige Funktionsebenen, die vom Anwender problembezogen ausgewählt werden können. Eine Verknüpfung dieser Funktionsebenen ist

vorgesehen (Abb. 1). So können beispielsweise unterschiedliche Bereiche eines verzweigten Gerinnesystems entweder 1D oder – wo erforderlich – 2D gerechnet werden. Ein weiterer Vorteil des modularen Aufbaus liegt in der Erweiterbarkeit des Codes, z.B. für ein geplantes 3D Modul.

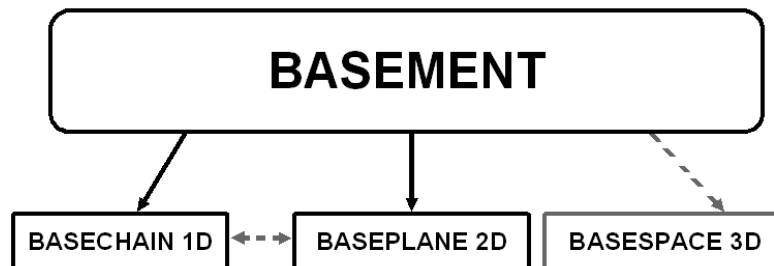


Abb. 1: Bestehende (schwarz) und geplante (grau) Rechenmodule und Verknüpfungen in BASEMENT.

Die erste Version BASEMENT V. 1.1 wurde im November 2006 veröffentlicht, dem folgte wenig später die Version 1.2. Die aktuelle Version BASEMENT V. 1.3, die zur Bearbeitung dieser Diplomarbeit verwendet wurde, wurde im April 2007 bereitgestellt und kann auf der Internetseite der VAW, unter www.basement.ethz.ch, bezogen werden. Dort stehen auch das Benutzerhandbuch sowie einige Beispielrechnungen zum Download bereit. Die nächste Version wird voraussichtlich 2008 veröffentlicht werden.

2.1.2 Modularer Programmaufbau

Das Programm BASEMENT ist, wie bereits erwähnt, ein modular aufgebautes, objekt-orientiertes Softwaresystem (VAW 2007). Dies ermöglicht dem Anwender problembezogene Strömungssimulationen anhand verschiedener Modelle durchzuführen. Er kann zweidimensional rechnen, wo dies erforderlich ist, aber auch eindimensional bei Szenarien, in denen dieser Ansatz ausreicht. Dies kann dann der Fall sein, wenn die zur Verfügung stehenden Eingangsinformationen begrenzt sind oder die höheren Anforderungen an die Rechnerleistung wegen des überwiegend eindimensionalen Charakters einer Untersuchungsstrecke nicht zu vertreten sind. Beide Module arbeiten mit unterschiedlichen Modellvorstellungen und erfordern deshalb auch verschiedene Eingabeformate der Geometriedaten.

BASEPLANE 2D

Grundlage für zweidimensionale Berechnungen mit BASEMENT sind die Flachwassergleichungen, die durch verschiedene Vereinfachungen aus den dreidimensionalen Navier-Stokes-Gleichungen abgeleitet werden (siehe Kap. 3.1.2). Das zweidimensionale numerische Modell weist daher einige Besonderheiten auf, die unbedingt berücksichtigt werden müssen. Diese sind:

- Die Topographie wird über ein dreidimensionales Gitternetz beschrieben.
- Die Geometrie der Querprofile ist veränderlich in y- und z-Richtung (vgl. Abb. 2).
- Die Strömung besitzt zwei Geschwindigkeitskomponenten in x- und y-Richtung.

- Die Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung wird vernachlässigt (das bedeutet, die vertikale Beschleunigung ist gleich null).
- Die hydraulischen Größen variieren in Längs-(x) und Querrichtung (y).
- Die Wasserspiegelquerneigung in Kurven kann erfasst werden.
- Die Sedimentverteilung ist variabel über die Querprofilbreite (z.B. Eintiefung in einer Kurvenaußenseite, Anlandung auf der Kurveninnenseite).

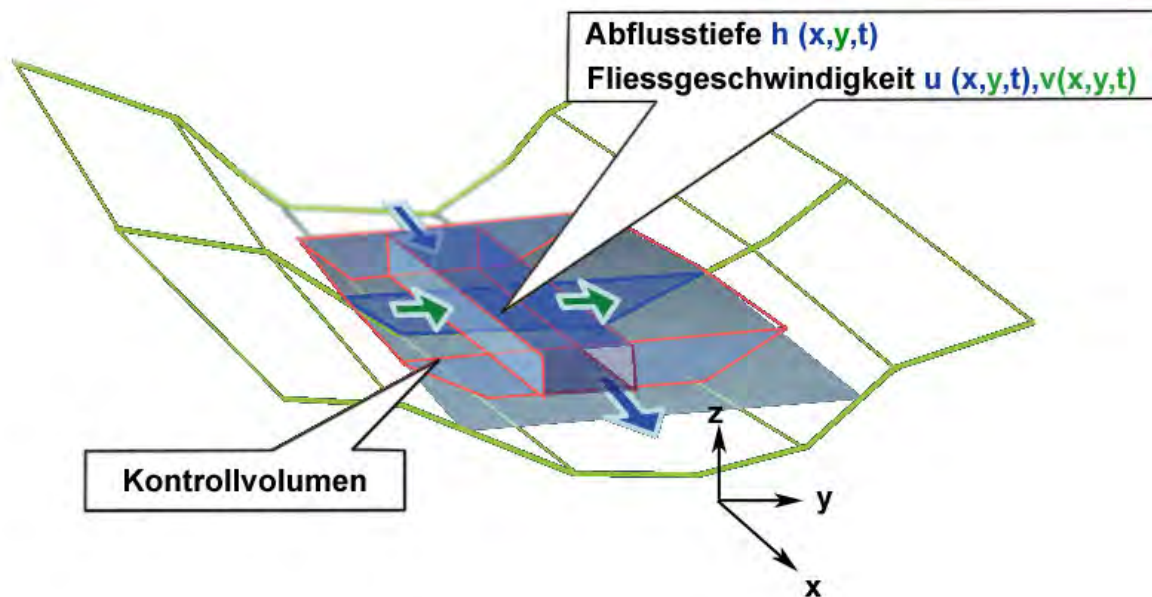


Abb. 2: Hydraulische Komponenten des **zweidimensionalen** bzw. **eindimensionalen** Modells (Quelle: BASEMENT-Workshop vom 06.10.2006, „Einführung in die numerische Modellierung“, Roland Fähr).

Das numerische Rechenmodul basiert auf der Methode der finiten Volumen (siehe Kap. 3.3). Die Geometrieingabe erfordert Datennetze im Format 2dm, die beispielsweise mit dem Programm SMS (Surface Modelling System) erstellt werden können. Die Zellstruktur des generierten Gitters kann dabei triangular, quadrilär oder hybrid sein. Konservative Variablen sind die Fließtiefe h und die Geschwindigkeiten in x- bzw. in y-Richtung (u bzw. v). Die Sohlreibung wird über den Ansatz von Manning berücksichtigt. Für Berechnungen mit Sedimenttransport sind im 2D-Modul bislang die Formeln von Meyer-Peter und Müller, Parker und Hunziker implementiert. Die Ergebnisausgabe erfolgt im 2dm-Format und über ASCII-Tabellen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden ausschließlich eindimensionale Berechnungen mit dem Modul BASECHAIN durchgeführt.

BASECHAIN 1D

Die eindimensionale Strömungsberechnung erfolgt mittels der Saint-Venant-Gleichungen (siehe Kap. 3.1.3). Hierbei wird im Vergleich zu den Flachwassergleichungen nur noch die Fließgeschwindigkeit in Längsrichtung (x-Richtung) betrachtet. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Unterschiede zwischen der 1D und 2D Berechnung. Auf Grund der vereinfachenden Annahmen sind eindimensionale Modelle nicht für alle Fragestellungen geeignet. Für hydraulische Fragestellungen sind sie jedoch ein nützliches Planungswerkzeug

und auch zur Abschätzung von Transportvorgängen können sie herangezogen werden, solange sich der Anwender darüber bewusst ist, dass er es hier mit einem Modell zu tun hat, das auf folgenden vereinfachten Annahmen basiert und auch nur dort eingesetzt werden sollte, wo diese Annahmen gerechtfertigt sind:

- Die Topographieabbildung geschieht durch Querprofile, dies entspricht der Modellvorstellung eines geradlinigen Kanals ohne Kurven.
- Eine Wasserspiegelquerneigung kann nicht berücksichtigt werden.
- Im gesamten durchflossenen Querschnitt herrscht die gleiche Geschwindigkeit.
- Die Strömung hat eindimensionalen Charakter, die hydraulischen Größen variieren nur in Längsrichtung (x-Richtung, vgl. Abb. 2).
- Erosions- und Anlandungsprozesse verlaufen gleichmäßig über die Querprofilbreite.

Sind diese Annahmen nicht zutreffend, weil das zu simulierende Problem zwei-dimensionalen Charakter aufweist, sollte die Bearbeitung mittels des 2D-Moduls erfolgen.

Die räumliche Diskretisierung der Untersuchungsstrecke erfolgt auch im 1D-Modul mittels der Finiten Volumen Methode. Die Geometrie wird über Querprofile erfasst, in denen Bereiche unterschiedlicher Rauigkeiten und Überflutungsflächen ohne Fließgeschwindigkeit definiert werden können. Die Eingabe der Koordinaten kann in den Formaten FLORIS und HEC-RAS erfolgen (vgl. Kap. 2.1.3).

Für die hydraulische Berechnung sind die durchströmte Querschnittsfläche A und der zugehörige Abfluss Q konservative Variablen, die aus der Kontinuitätsgleichung bzw. dem Impulssatz berechnet werden. Die Sohlreibung wird wahlweise über die Ansätze nach Strickler, Chezy oder Darcy-Weisbach berücksichtigt. Die Berechnung der durchströmten Querschnittsfläche in Abhängigkeit vom Wasserspiegel $A(z)$ kann iterativ oder durch Interpolation aus einer Tabelle erfolgen. Um die Gleichungssysteme zu schließen, sind verschiedene Rand- und Initialbedingungen wählbar.

Für morphologische Berechnungen stehen die Transportformeln von Meyer-Peter und Müller, der Ansatz von Günter sowie die Formeln von Parker, Rickenmann und Hunziker zur Verfügung (siehe Kap. 3.2). Die Ergebnisausgabe erfolgt in Tabellenform im Format von Textdateien. Hier sind verschiedene Optionen zur Verfolgung eines speziellen Wertes über die Simulationsdauer oder die Integration über die Zeit einstellbar.

Das Programm BASEMENT bietet keine graphische Benutzeroberfläche wie beispielsweise HEC-RAS an, die Eingabe aller erforderlichen Daten für eine numerische Simulation geschieht über textbasierte Dateien. Diese Dateien sind nach ihrer Funktion getrennt in Hilfsdateien, die die geometrischen Daten der Strecke, die Abflussganglinie oder Informationen zu den Randbedingungen enthalten, und eine Kommandodatei (*Basement Command File*, Bezeichnung: „*Projektname.bmc*“), die alle übrigen Simulations-Parameter beinhaltet und auf die einzelnen Hilfsdateien verweist.

Für jedes neue BASEMENT Projekt ist ein eigener Ordner anzulegen, in dem sich alle zugehörigen Dateien befinden. Die Aufteilung in verschiedene Informationsblöcke dient der Übersichtlichkeit und ermöglicht die getrennte Bearbeitung einzelner Dateien. Wurden alle benötigten Projektdateien erstellt, wird die Simulation durch Ausführen des *Command Files* gestartet. Wenn der Rechenlauf beendet ist, werden die Ergebnisse in den entsprechenden Ausgabedateien im gleichen Ordner abgelegt.

Abbildung 3 gibt einen Überblick über die einzelnen Dateien, die zu einem BASEMENT-1D-Projekt gehören. Grau dargestellte Dateien sind optional, die anderen zwingend erforderlich. In Klammern ist das Dateiformat angegeben.

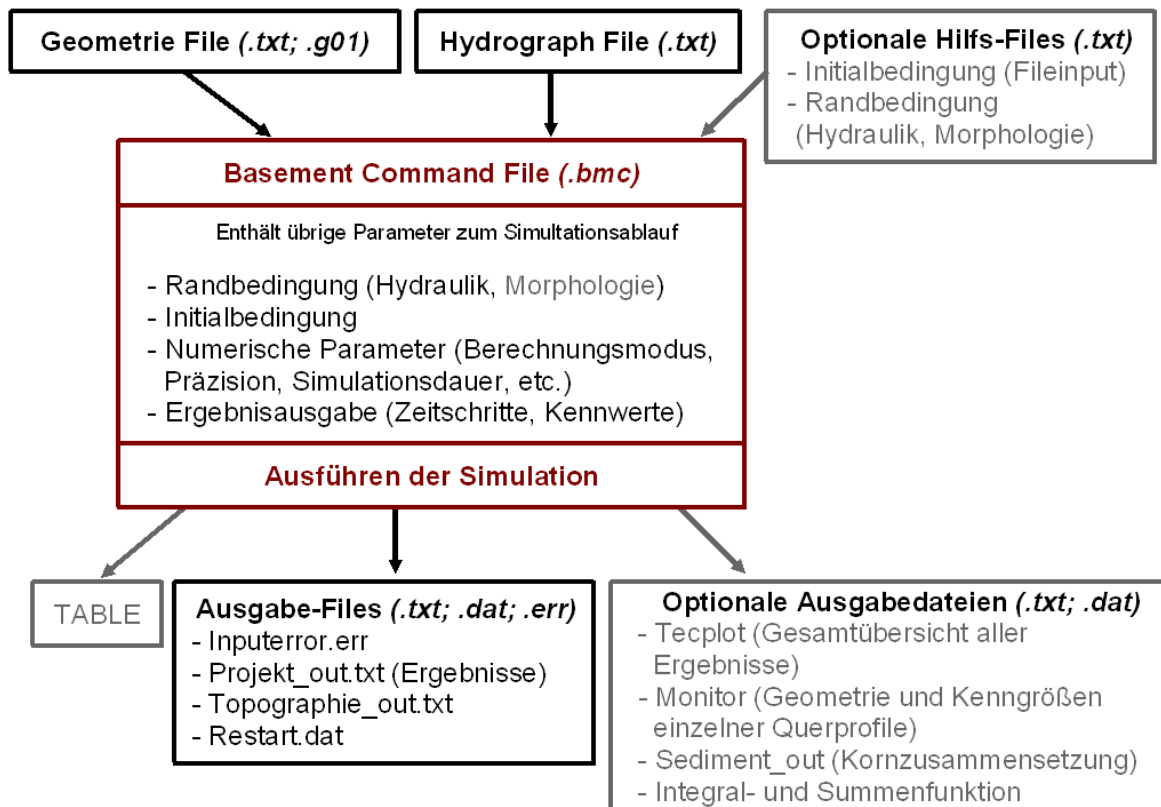


Abb. 3: Erforderliche und optionale (grau) Dateien eines BASEMENT-1D-Projekts.

2.1.3 Geometrieingabe

Die Eingabe der geometrischen Daten ist für eindimensionale Berechnungen in zwei verschiedenen Formaten möglich. So können entweder Datensätze, die mit dem Programm HEC-RAS erstellt wurden, importiert werden, oder es kann eine Topographiedatei im Format FLORIS erstellt werden. Das Format FLORIS wurde ebenfalls an der VAW entwickelt und kam bereits in anderen Programmen wie MORMO zum Einsatz. Die FLORIS Datei enthält zusätzlich zu den Koordinaten der Untersuchungsstrecke und den Rauigkeiten noch weitere Informationen zum Projekt, wie beispielsweise die Lage der bewegliche Sohle oder die Auswahl des Berechnungsmodus, was dieses Format zum Standardeingabeformat speziell für BASEMENT macht. Bei HEC-RAS Geometrien müssen diese Informationen im *Command File* bzw. in einer weiteren Hilfsdatei ergänzt werden.

Geometrieingabe im Format FLORIS

Die Geometriedatei im Format FLORIS ist eine Textdatei (Beispiel im Anhang A.4). Sie enthält neben den Koordinaten der einzelnen Querprofile auch Informationen über den Projekttitel, den gewählten Berechnungsmodus (Interpolation aus Tabelle oder Iteration, siehe Kap. 2.1.4) und den verwendeten Reibungsansatz (Strickler, Chezy oder Darcy-Weisbach, vgl.

Kap. 3.1.3). Danach werden je nach Rechenmodus die gewünschten Genauigkeitsparameter und die Reibungsbeiwerte für Hauptkanal, Vorländer und die Gerinnesohle angegeben. Dann folgt die Definition der Querprofile. Die Deklaration charakteristischer Punkte erfolgt in FLORIS mittels eines speziellen Zahlencodes (siehe Tab. 1). So wird nach der Codezahl 20 ein neues Querprofil definiert. Hierfür sind eine Bezeichnung (z.B. *CS1*) und die Entfernung zum Anfangsprofil der Strecke in Kilometer anzugeben. Des Weiteren können in dieser Zeile noch die Sohlneigung im Querprofil und die Zusammensetzung der Sohle (wieder über Codezahlen) festgelegt werden. Jeder Wert muss an einer bestimmten Position eingegeben werden (z.B. die Sohlneigung an siebter Stelle). Die exakte Positionierung aller Parameter ist dem BASEMENT Benutzerhandbuch (Kap. U IV Tutorials) zu entnehmen. Die Eingaben sind dabei stets durch ein Leerzeichen und – im Fall einer ausgelassenen Eingabe – durch zwei Kommas voneinander zu trennen. Jede Eingabezeile wird durch einen Schrägstrich abgeschlossen. Zwei Schrägstriche kennzeichnen einen Kommentar, der beim Lesen der Datei von BASEMENT ignoriert wird.

FLORIS-Code	Bedeutung
20	Definition eines neuen Querprofils
21	Neuer Punkt eine Querprofils
12	Beginn des Hauptkanals
13	Ende des Hauptkanals
15	Beginn der Gerinnesohle
16	Ende der Gerinnesohle (Geschiebetransport nur in diesem Bereich)
1	Überflutungsbereich ohne Fließgeschwindigkeit ($v = 0$)
2	Berechnungsbeginn eines Querprofils
32	Linksseitiges Querprofilende für die Berechnung
1	Feste Sohle (Indexdefinition im Command File)
2, 3, etc.	Bewegliche Sohle, Zusammensetzung 2, 3, etc.
99	Abschluss eines Querprofils
end	Ende der Geometrieingabe

Tab. 1: FLORIS-Zahlencode zur Geometrieingabe.

Geometrieingabe in HEC-RAS

Wurden die Geometriedaten des Untersuchungsgebietes in HEC-RAS eingegeben (vgl. Kap. 2.2 und BASEMENT Benutzerhandbuch U IV), kann diese Geometriedatei (Format *hec_ras*, Bezeichnung: „*Projektname.g01*“) in BASEMENT importiert werden. Dafür sind jedoch einige Veränderungen vorzunehmen bzw. Zusatzinformationen anzugeben.

Im Gegensatz zu FLORIS enthält die HEC-RAS Geometriedatei keine Informationen zum Berechnungsmodus, zur Art des verwendeten Reibungsbeiwerts und zur Lage der beweglichen Sohle. Diese Informationen müssen im BASEMENT *Command File* ergänzt werden. Für den Import der HEC-RAS Geometriedatei in BASEMENT müssen folgende Vorgaben berücksichtigt werden:

- Für jedes Querprofil muss eine Beschreibung (*Description*) angegeben werden. Wie die Querprofile beschrieben werden, spielt allerdings keine Rolle (z.B. *CS 1*).
- Anstatt des Manningwertes müssen die Stricklerwerte eingegeben werden, da BASEMENT die Einheiten nicht automatisch konvertiert.

- Die Bezeichnung der Stationierung (*River Stations*) in HEC-RAS muss nach dem Abstand zum oberstromigen Anfangsquerprofil in Metern erfolgen, da BASEMENT diese Abstandswerte verwendet. Da die Bezeichnung der Querprofile in HEC-RAS entgegen der Fließrichtung definiert ist (Stationierung stromaufwärts), muss dies bei der Eingabe für BASEMENT ebenfalls geändert werden. Deshalb ist diese Geometriedatei nur für den Import in BASEMENT zu verwenden, aber nicht mehr in HEC-RAS. Falls die Berechnung mit beiden Programmen erfolgen soll, müssen zwei separate Geometriefiles erstellt werden.
- Für morphologische Berechnungen müssen die entsprechenden Codezahlen für die Beschaffenheit der Sohle vergeben werden. Dies geschieht im Geometrieingabemenue von HEC-RAS für jedes Querprofil unter „*Options/Obstructions/Multiple Blocks*“. Dort wird die y-Koordinate des Anfangs- und Endpunktes der beweglichen Sohle angegeben und in der Spalte „*Elevation*“ der zugehörige Sohlindeix festgelegt.
- Zusätzlich muss eine Textdatei („*Bottom.txt*“) zur Definition der Lage der Gerinnesohle erstellt werden, in der der Beginn und Endpunkt der Sohle für jedes Querprofil vermerkt wird. Diese Information wird von BASEMENT benötigt, da die HEC-RAS Geometriedatei nur eine Unterscheidung in Hauptkanal und Vorland kennt, diese Übergangspunkte aber nicht mit der Gerinnesohle identisch sein müssen. So weist der Hauptkanal meist seitliche Böschungen auf, denen auf diese Weise wie im Format FLORIS eine andere Rauigkeit zugeordnet werden kann.
- Das BASEMENT *Command File* muss angepasst werden. Die Bezeichnung der Querprofile entspricht jetzt deren Stationierung (z.B. 0, 100, 200 [m]). Das Geometrieformat *hecra5*, ein Verweis auf die *Bottom*-Datei, die Angabe des Berechnungsmodus sowie der zugehörigen Parameter und der gewählte Reibungsansatz (z.B. Strickler), werden dort ergänzt.

Die zahlreichen erforderlichen Änderungen erschweren den Geometrieimport in BASEMENT, sodass – je nach Format der vorhandenen Ausgangsdaten – das Erstellen einer FLORIS Topographiedatei der einfachere Weg sein kann.

2.1.4 Hydraulische Berechnungen

Wurde die Geometriedatei erstellt, werden für eine einfache hydraulische Berechnung noch eine Abflussdatei und ein *Command File* benötigt.

Eingabe einer Abflussganglinie

Die sog. *Hydrograph*-Datei stellt die oberstromige hydraulische Randbedingung dar. Sie gibt das Abflussgeschehen vor. Dies kann ein konstanter oder ein veränderlicher Abfluss, also eine Ganglinie, sein. Die Eingabe erfolgt durch die zeitliche Zuordnung einzelner Abflusswerte, Zwischenwerte werden linear interpoliert. Für einen konstanten Abfluss muss die Datei zwei Wertepaare $Q(T)$ enthalten, diese werden dann von BASEMENT für die gesamte Simulationsdauer beibehalten. Zum Beispiel:

```
// T      Q
0        5
3600    5
```

Der erste Wert gibt den Zeitpunkt T in Sekunden an, der zweite den Abfluss Q in m^3/s . Die beiden Schrägstriche in der Kopfzeile bedeuten, dass es sich hier um einen Kommentar handelt und diese Zeile von BASEMENT ignoriert wird. Im Beispiel wurde also ein konstanter Abfluss von $5 \text{ m}^3/\text{s}$ für jede beliebig lange Berechnungsdauer vorgegeben.

Wurden die Hilfsdateien für die Ganglinie und die Topographie der Untersuchungsstrecke erstellt, erfolgt die Bearbeitung des *Command Files*. Dieses kann ebenfalls mit einem Editorprogramm geöffnet und geändert werden. Alle für die Simulation erforderlichen Parameter, die noch nicht anderweitig deklariert wurden, sind in dieser Datei enthalten. Der Aufbau besteht aus über- und untergeordneten Blöcken für die hydraulische und morphologische Berechnung, welche in Randbedingungen, Initialbedingungen und numerische Parameter unterteilt sind (Beispiel im Anhang A.3).

Initialbedingungen

Im Hydraulikblock muss für jede Berechnung eine Anfangsbedingung vorgegeben werden, mit der die Simulation initialisiert wird. Hier sind drei verschiedene Ausgangssituationen wählbar: „Dry“, „Fileinput“ und „Backwater Calculation“ (siehe Tabelle 2).

Die Initialbedingung „Dry“ geht von einem trockenen Gerinnequerschnitt zu Beginn der Simulation aus, welcher dann sukzessive gefüllt wird. Es sind keine weiteren Parameter erforderlich. Als Ergebnis eines Rechenlaufs mit dieser Initialbedingung wird eine Startdatei ausgegeben, die Anfangswerte für die durchströmte Querschnittsfläche A und den zugehörigen Abfluss Q für jedes Querprofil enthält. Mit dieser Datei kann dann ein neuer Rechenlauf gestartet werden, diese Initialbedingung heißt „Fileinput“.

Als dritte Möglichkeit einen Initialzustand für die Simulation vorzugeben, bietet BASEMENT die Option „Backwater Calculation“ an. Dabei wird für das letzte Querprofil ein bestimmter Abfluss Q_{out} und eine Höhenkote für den Wasserspiegel WSE_{out} vorgegeben. Somit sind die primären Variablen A und Q bekannt bzw. können vom Programm errechnet und die Simulation begonnen werden. Der vorgegebene Abfluss Q_{out} bleibt hier über die gesamte Simulationsdauer konstant, während der Wasserspiegel nur als Startwert dient und sich dann rasch der tatsächlichen Fließtiefe nähert. Deshalb eignet sich diese Initialbedingung nur für die Berechnung stationärer Fließzustände.

Initialbedingung	Bedeutung	Benötigte Angaben	Abflusssituation
Dry	Trockenes Gerinne	-	stationär / instationär
Fileinput	Anfangswerte in externer Initialdatei	A (Q) in jedem Querprofil	stationär / instationär
Backwater Calculation	Staukurvenberechnung	Q_{out} , WSE_{out}	stationär

Tab. 2: Übersicht der wählbaren Initialbedingungen.

Randbedingungen

Sowohl für hydraulische als auch morphologische Berechnungen ist die Vorgabe geeigneter Randbedingungen von großer Bedeutung. Dabei wird jeweils eine Oberstrom- und eine Unterstrom-Randbedingung benötigt, die die Verhältnisse zu Beginn und am Ende der Simulationsstrecke treffend beschreibt. Für hydraulische Berechnungen stehen in BASEMENT die im Folgenden beschriebenen Randbedingungen zur Auswahl.

Die Oberstrom-Randbedingung für hydraulische Berechnungen ist „*Hydrograph*“, also die Vorgabe einer Abflussganglinie in Form einer entsprechenden Hilfsdatei. Zur Beschreibung der Unterstrom-Abflussverhältnisse stehen mehrere Randbedingungen (Tab. 3) zur Verfügung, die eine möglichst genaue Beschreibung aller denkbaren hydraulischen Szenarien ermöglichen sollen.

Am häufigsten passt die Randbedingung „*H-Q Relation*“. Mit ihr können entweder Normalwasserverhältnisse für eine vorgegebene Sohlneigung (z.B. in der FLORIS-Geometriedatei) im letzten Querprofil angenommen werden, oder es kann eine beliebige Wasserstands-Abfluss-Beziehung in einer Hilfsdatei deklariert und verwendet werden.

Die Randbedingung „*Wall*“ schließt das letzte Querprofil wie eine Mauer ab, es findet kein Abfluss über diesen Rand statt. Sie kann z.B. einen Staudamm darstellen und für die Berechnung der Befüllungszeit eines Speichers und der Aufstauhöhe benutzt werden.

Mit den Randbedingungen „*Weir*“ und „*Gate*“ kann der Abfluss über ein Wehr oder unter einem Schütz simuliert werden. Der Abfluss über ein Wehr wird nach der Formel von Poleni berechnet. Sie lautet:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{2/3}$$

$$b = b_{Krone} + \frac{h}{\tan w} \quad (\text{bei Trapezquerschnitten})$$

mit:	μ	=	Polenifaktor	[-]
	b_{Krone}	=	Wehrkronenbreite	[m]
	g	=	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
	H	=	Höhendifferenz zwischen Energiehöhe und Wehrkrone	[m]
	h	=	Fließtiefe auf der Wehrkrone	[m]
	$\tan w$	=	Böschungsneigung des Trapezquerschnitts	[-]

Deshalb ist es erforderlich die entsprechenden Parameter wie den Polenifaktor μ , die Breite der Wehrkrone und deren Höhe anzugeben. Die Wehrhöhe kann dabei entweder konstant (als fester Überfall) oder über die Zeit veränderlich (Klappe) gewählt werden. Im zweiten Fall ist die zeitliche Änderung der Wehrhöhe wieder in einer Hilfsdatei zu beschreiben.

Mit der Randbedingung „*Gate*“ kann beispielsweise der Grundablass einer Talsperre simuliert werden, indem die Abmessungen der Öffnung, ein Kontraktions- bzw. Verlustfaktor und die Höhenlage des Auslasses angegeben werden. Auch hier kann eine zeitliche Steuerung durch eine entsprechende Hilfsdatei berücksichtigt werden. Dabei wird der Abfluss nach folgender Formel berechnet:

$$Q = b \cdot \mu \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H - \mu \cdot a)}$$

mit:	b	=	Breite der Öffnung	[m]
	μ	=	Kontraktionsverlustfaktor	[-]
	a	=	Höhe der Öffnung	[m]
	H	=	Energiehöhe auf der Oberstromseite	[m]

Liegen bezüglich der Unterstrom-Abflussverhältnisse keine genaueren Informationen vor, kann die Randbedingung „Zero Gradient“ benutzt werden. Dabei werden die hydraulischen Variablen in der letzten Berechnungszelle als konstant angenommen. Die Abflussbedingungen auf der Kante zwischen den letzten beiden Querprofilen entsprechen denen im letzten Querprofil. Damit wird ein gewisser Fehler in Kauf genommen, der sich je nach Szenario durch einen ungenauen Abfluss im letzten Querprofil bemerkbar macht (vgl. Kap. 4.1.2). Zur exakten numerischen Modellierung eignet sich diese Randbedingung deshalb nicht.

Schließlich gibt es noch die Möglichkeit, eine bestimmte Wasserspiegelhöhe am Ende der Untersuchungsstrecke vorzugeben. Dies geschieht mit der Randbedingung „Z-Hydrograph“. Der Wasserspiegel kann konstant oder über die Zeit veränderlich sein. Die Information darüber wird in einer Hilfsdatei bereitgestellt. Als Resultat erhält man entweder einen Aufstau oder eine Absenkkurve. Der Einsatz dieser Randbedingung ist dann sinnvoll, wenn Gerinneabschnitte nachgerechnet werden sollen, zu denen ein gemessener Wasserstand vorliegt, der von der Normalwassertiefe abweicht.

Tabelle 3 fasst die zur Verfügung stehenden Unterstrom-Randbedingungen noch einmal zusammen.

Randbedingung	Bedeutung	Benötigte Angaben	Einsatz
H-Q Relation	Wasserstands-Abfluss Beziehung	Sohlgefälle (für NWT) oder Datei	Normalwassertiefe (NWT), kritische Fließtiefe, H (Q)
Wall	Wand, kein Abfluss über den Rand	-	Damm, Speicher
Weir	Abfluss über Wehr	Wehrabmessungen und Poleni-Beiwert	Wehr
Gate	Abfluss unter Schütz	Schützabmessungen und Kontraktionsfaktor	Schütz
Zero Gradient	Keine Änderung der Abflussverhältnisse im letzten Berechnungsabschnitt	-	Wenn keine Informationen vorliegen
Z Hydrograph	Zeitabhängiger Wasserspiegel	Datei Wsp Z(T)	z.B. Pegelwerte Z (T)

Tab. 3: Übersicht der wählbaren Unterstrom-Randbedingungen.

Berechnungsmodus

BASEMENT verfügt über zwei unterschiedliche Berechnungsmodi, „*Table*“ und „*Iteration*“, die vom Anwender je nach Anforderung an die Ergebnisgenauigkeit und die Berechnungsgeschwindigkeit wählbar sind. Die Angabe des Berechnungsmodus erfolgt entweder in der FLORIS-Geometriedatei, oder im BASEMENT *Command File*, falls die Geometrie mit HEC-RAS erstellt wurde.

Table-Modus

Im Modus „*Table*“ erstellt BASEMENT zu Beginn der Berechnung für jedes Querprofil eine Tabelle, in der für eine Reihe von Wasserspiegellagen der zugehörige Abfluss und einige andere relevante hydraulische Kenngrößen berechnet werden. Aus dieser Tabelle werden dann alle benötigten Werte interpoliert. Dies ist die schnellere Berechnungsart und für die meisten Anwendungen ausreichend genau, sofern der Benutzer die Intervalle zwischen den Tabellenwerten sinnvoll eingrenzt. Dies geschieht durch Angabe der minimal und maximal zulässigen Wasserspiegeldifferenz in Metern zwischen zwei benachbarten Tabellenwerten. Für die Nachrechnung eines Modellversuchs mit einer Abflusstiefe von wenigen Zentimetern sind diese Intervalle folglich kleiner zu wählen, als für ein Hochwasserereignis an einem realen Flussquerschnitt.

Iterationsmodus

Der Iterationsmodus berechnet die Wasserspiegellage und die zugehörigen hydraulischen Parameter für jeden Berechnungszeitschritt neu. Dabei sind die maximal erlaubte Anzahl der Iterationsschritte und die zulässige Abweichung der berechneten durchströmten Querschnittsfläche A (in m^2) vom Anwender festzulegen.

Die Verwendung des Iterationsmodus liefert bei entsprechender Wahl der Präzisionsgrenzen exakte Ergebnisse, gleichzeitig steigt jedoch der Rechenaufwand, sodass bei komplexeren Szenarien die Interpolation aus einer Tabelle vorzuziehen ist.

Parameter

In dem gleichnamigen Unterblock des BASEMENT *Command Files* werden die Parameter definiert, die den numerischen Ablauf der Berechnung bestimmen. Dazu zählen die CFL-Zahl (siehe Kap. 3.3) und der Initialzeitschritt. Daneben werden in diesem Block noch die minimale Wassertiefe in einer Berechnungszelle und die Gesamtdauer der Simulation festgelegt.

Der Berechnungszeitschritt ist in BASEMENT während der Simulation variabel und passt sich an die Situation an. Ändert sich der Abfluss, beispielsweise beim Ablauf einer Hochwasserwelle, stark, ergeben sich kleinere Zeitschritte als während einer Periode mit geringen Abflussschwankungen. Bei stationären Verhältnissen stellt sich ein konstanter Zeitschritt ein. Ebenso beeinflusst der stattfindende Geschiebetransport die Größe des Berechnungszeitschritts. Der Initialzeitschritt zu Beginn einer Simulation ist vom Anwender vorzugeben. Dieser sollte größer sein als der größte sich einstellende Berechnungszeitschritt, da sich andere Annahmen ungünstig auf die Rechenzeit auswirken. Der Berechnungszeitschritt kann nämlich maximal so groß wie der Initialzeitschritt werden, was im numerischen Verfahren begründet ist (vgl. Kap. 4.1.2). Ein Initialzeitschritt von 30 Sekunden liegt hier auf der sicheren Seite, zumal dieser Parameter keinen Einfluss auf die berechneten Ergebnisse,

sondern lediglich auf die Rechenzeit zeigte. Gleiches gilt für die CFL-Zahl. Sie darf in einem Bereich zwischen 0,5 und 1 liegen, wobei „1“ den größten Berechnungszeitschritt zulässt.

Ergebnisausgabe

Im Block „*Output*“ sind schließlich die Einstellungen zur Ergebnisausgabe vorzunehmen. Hier kann der Zeitschritt gewählt werden, in dem die gewünschten Ergebnisse ausgegeben werden (z.B. alle 1000 Sekunden). Benötigt der Anwender nicht nur Zwischenergebnisse, sondern will er die zeitliche Entwicklung einer hydraulischen Kenngröße exakt verfolgen, ist dieser Zeitschritt entsprechend zu verringern.

Der „*Console Time Step*“ regelt die Ausgabe von Berechnungszeitschritten im Programmfenster, während eine Simulation ausgeführt wird. Im Unterblock „*Special Output*“ können zusätzlich zur Standardergebnisausgabe (Tab. 4) noch weitere Ausgabedateien gewählt werden. Es ist beispielsweise möglich, einen speziellen Wert an einer bestimmten Stelle der Untersuchungsstrecke über kleinere Ausgabezeitschritte genauer zu beobachten. Das Resultat wird in einer eigenen Datei ausgegeben, was für mehr Übersichtlichkeit sorgt und allzu große Datenmengen in der Standardausgabedatei vermeidet. Außerdem können Summen, Minimal- und Maximalwerte der berechneten hydraulischen und morphologischen Kenngrößen explizit ausgegeben werden. Alle Ergebnisdateien sind Textdateien, die mit Tabellenkalkulationsprogrammen weiterbearbeitet werden können.

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
Time	Simulationszeitpunkt	s
Timestep	Berechnungszeitschritt	s
u	Fließgeschwindigkeit im letzten Querprofil (Element Nr.)	m/s
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Störung	m/s
Edge number	Kante (zwischen zwei Querprofilen) Nr.	-
Flux H	Kontinuitätsfluss (entspricht Q)	m ³ /s
Flux U	Impulsfluss	kg m/s
Sediment Flux	Sedimentfluss	m ³ /s
0.02 Qb (z.B.)	Sedimentfluss je Kornklasse (z.B. Fraktion 20 mm)	m ³ /s
section	Bezeichnung der Querprofile	-
distance	Stationierung der Querprofile (Entfernung von Oberstrom)	m
zbed	Talweg	m
left/rightdam	Dammhöhe (links-/rechtsseitig)	m
bottomlevel	Mittleres Sohlniveau	m
z	Wasserspiegelhöhenlage	m
eline	Energiehöhe	m
A	Durchströmte Querschnittsfläche	m ²
Q	Abfluss	m ³ /s
Qnum	Numerisch ermittelter Abfluss	m ³ /s
u	Fließgeschwindigkeit	m/s
Fr	Froude-Zahl	-
tau	Sohlschubspannung	N/m ²
transpCap	Geschiebetransportkapazität	m ³ /s

Tab. 4: Liste der Ergebnisse in der Standardausgabedatei von BASEMENT (*Projekt+out.txt*).

2.1.5 Morphologische Berechnungen

Für morphologische Berechnungen wird das BASEMENT *Command File* um einen neuen Eingabeblock MORPHOLOGY erweitert. Dieser Block enthält alle Parameter und Randbedingungen für Geschiebetransportbetrachtungen.

Aufbau und Zusammensetzung der Gerinnesohle

Im ersten Unterblock namens BEDMATERIAL wird die Zusammensetzung der beweglichen Sohle angegeben. Diese kann entweder, für Einkornsimulationen, aus einer einzigen Kornfraktion mit einem charakteristischen Durchmesser d_m , oder, für fraktionierte Berechnungen, aus mehreren Korngrößen bestehen. In diesem Fall werden die einzelnen Korndurchmesser und deren prozentualer Anteil in der Sedimentmischung angegeben. Die Sohle kann aus mehreren Schichten unterschiedlicher Zusammensetzung bestehen.

Für jeden so definierten Bodenaufbau und die unbewegliche Sohle wird ein Index vergeben, der in der Topographie-datei den einzelnen Punkten der Querprofile zugeordnet wird. Dies geschieht im Format FLORIS an der letzten Stelle jeder Zeile und in HEC-RAS unter „Multiple Blocks“.

Jeder Sohlschicht muss eine bestimmte Dicke zugewiesen werden. Hier ist zwischen Einkorn- und Mehrkornmodell zu unterscheiden. Bei der Einkornsimulation ist lediglich die Lage des festen, nicht erodierbaren Horizonts von Interesse, da diese die maximal mögliche Eintiefung der Sohle begrenzt.

Bei der fraktionsweisen Berechnung dagegen ist die Dicke des *Active-Layer* eine Modellgröße, die das Maß der stattfindenden Erosion beeinflusst. Das Active-Layer-Konzept (siehe Kap. 3.2.6) beschreibt die Sortierprozesse und die damit verbundene Veränderung der Kornzusammensetzung in der obersten Sohlschicht. Somit stellt die Dicke dieser Austauschschicht eine Kalibriergröße des numerischen Modells dar.

Der Active-Layer muss in jedem Fall (Einkorn- oder Mehrkornmodell) eine reale Tiefe besitzen. Bei Eingabe einer Null wird die Sohle als unbeweglich angenommen. Zur Abschätzung der Active-Layer-Dicke kann als Anhaltswert der ein- bis dreifache Korndurchmesser d_{90} des Sohlmaterials herangezogen werden.

Morphologische Randbedingungen

Am Anfang der Simulationsstrecke stehen drei verschiedene Oberstrom-Randbedingungen zur Beschreibung der morphologischen Verhältnisse zur Verfügung (Tab. 5). Der Anwender kann hier zwischen „IO Up“, „Wall“ und „Sediment Discharge“ wählen. Auf der Unterstromseite gibt es nur eine Randbedingung namens „IO Down“.

Die Randbedingung „IO Up“ bedeutet analog zur Unterstrom-Randbedingung „IO Down“, dass der Geschiebehaushalt im Gleichgewicht steht. Es wird die Geschiebemenge zugegeben bzw. weitertransportiert, die der berechneten Transportkapazität im ersten bzw. letzten Querprofil entspricht. Die Sohllage verändert sich in diesen Querprofilen folglich nicht. Gleichgewichtsrandbedingungen sind für Simulationsszenarien geeignet, in denen die Untersuchungsstrecke mit einem Querprofil beginnt und endet, in dem die Sohle fixiert ist, oder wenn keine näheren Informationen über die Geschiebezufuhr an den Rändern vorliegen und die Strecke ausreichend lang ist, dass sich der Einfluss der Randbedingungen auf den Zwischenbereich nicht mehr auswirkt. Der Einfluss der Randbedingungen muss folglich bei der Festlegung der Simulationsstreckenlänge berücksichtigt werden.

Die Verwendung der Oberstrom-Randbedingung „Wall“ bedeutet, dass kein Geschiebeeintrag in die Simulationsstrecke stattfindet. Dies hat zur Folge, dass es von Anfang an zu Erosion kommen kann, die Sohle des ersten Querprofils wird nicht fixiert. Eine Situation ohne Geschiebeeintrag kann beispielsweise nach einem Wehr oder in Modellversuchen gegeben sein.

Soll ein bestimmter Geschiebeeintrag in die Untersuchungsstrecke vorgegeben werden, erfolgt dies mittels der Randbedingung „Sediment Discharge“. Dabei wird in einer Hilfsdatei eine zeitabhängige Geschiebezugabe (in m³/s) definiert. Die Zusammensetzung des zugegebenen Geschiebes wird im BASEMENT *Command File* festgelegt, indem eine dort definierte Kornfraktion oder Mischung ausgewählt wird.

Oberstrom-Randbedingungen	Bedeutung	Angaben
Wall	Kein Geschiebeeintrag	-
IO Up	Geschiebezugabe entspricht Transportkapazität (Gleichgewichtszustand)	-
Sediment Discharge	Vorgegebene Geschiebezugabe	File
Unterstrom-Randbedingung		
IO Down	Geschiebetransport entspricht der Transportkapazität im letzten Querprofil	-

Tab. 5: Morphologische Randbedingungen in BASEMENT.

Parameterblock für morphologische Berechnungen

Im Unterblock PARAMETER werden die übrigen, für die morphologische Berechnung erforderlichen, Annahmen getroffen. Hier wird zuerst eine passende Transportformel gewählt. Für die Einkornsimulation ist dies entweder der Ansatz von Meyer-Peter und Müller („MPM“), oder der Ansatz „Powerlaw“.

„MPM“ berechnet die Geschiebetransportkapazität nach folgender Formel (vgl. Kap. 3.2.1):

$$q_b = k \cdot (\theta - \theta_{cr})^{3/2} \cdot \sqrt{(s-1) \cdot g} \cdot d_m^{3/2}$$

mit:	q_b	=	Geschiebetransportkapazität pro Meter Sohlbreite	[m ³ /s m]
	k	=	Kalibrierkonstante	[-]
	θ	=	Dimensionslose Schubspannung nach Shields	[-]
	θ_{cr}	=	Kritische Schubspannung nach Shields	[-]
	s	=	Verhältnis der Sedimentdichte zur Dichte von Wasser	[-]
	g	=	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
	d_m	=	Mittlerer Korndurchmesser des Sohlmaterials	[m]

Die Kalibrierkonstante k ist vom Anwender anzugeben. Sie liegt nach *Hunziker (1995)* in etwa im Bereich von fünf bis acht.

Der Geschiebetransport kann auch als eine Funktion der Fließgeschwindigkeit v betrachtet werden. Nach diesem Ansatz kann in BASEMENT durch die Auswahl der Transportformel „Powerlaw“ gerechnet werden. Diese Formel lautet:

$$q_b = \alpha \cdot v^\beta$$

mit:	α	=	Kalibrierkonstante	[-]
	v	=	Fließgeschwindigkeit	[m/s]
	β	=	Kalibrierkonstante	[-]

Die empirischen Kalibrierkonstanten α und β sind vom Anwender zu wählen. Wobei α laut BASEMENT Manual in der Größenordnung von einem Tausendstel und β zwischen eins und zehn liegen sollte.

Ein Mittelweg zwischen der Einkornsimulation und der fraktionierten Berechnung ist der Ansatz von Günter. Hier wird in der Einkornsimulation mit „MPM“ zusätzlich die mittlere Korngröße der Deckschicht bzw. der d_{90} des Unterschichtmaterials angegeben. In BASEMENT wird dieser Parameter als „*d_{90_ armored_layer}*“ bezeichnet. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass der d_{90} der Unterschicht in etwa dem d_m des Deckschichtmaterials entspricht. Die kritische Schubspannung, bei der Geschiebetransport beginnt, wird nun durch den Günterfaktor (vgl. Kap. 3.2.2) erhöht, um den Einfluss der Deckschicht auf den Erosionsbeginn der Sohle im Modell zu berücksichtigen.

Für fraktionierte Mehrkornsimulationen, stehen in BASEMENT die Formeln von Hunziker („MPM-H“), Parker, sowie der Ansatz von Rickenmann zur Verfügung. Für die Formeln von Hunziker und Parker sind keine weiteren Parameter wählbar. Die Formel von Rickenmann kann auch für Einkornmodelle (d_m) verwendet werden. Dafür wird die zusätzliche Angabe des d_{30} und d_{90} des Sohlmaterials benötigt.

Nach der Wahl eines geeigneten Transportansatzes folgt die Festlegung einiger materialspezifischer Werte, wie die Dichte (ca. 2650 kg/m³), der Porenanteil (zwischen 20 und 40 %) und der Reibungswinkel (um die 30°) des Geschiebematerials. Danach wird noch einmal die Dicke der Aktivschicht („*Height Active Layer*“) angegeben. Diese kann entweder konstant, entsprechend der Annahme in der Sohldefinition, gewählt werden, oder variabel sein und bei jedem Zeitschritt neu berechnet werden. Dies ist laut BASEMENT Manual dann der Fall, wenn an dieser Stelle für die Active-Layer-Dicke eine Null angegeben wird.

Außerdem werden im Morphologieblock noch einige numerische Parameter für den Ablauf der Simulation festgelegt. Der „*Upwind*“-Faktor regelt die Berechnung des Geschiebestroms an den Kanten zwischen zwei Berechnungszellen. Da die Geschiebetransportkapazität bei 1D-Simulationen jeweils in den Querprofilen berechnet wird, wo alle hydraulischen Kenngrößen bekannt sind, muss für die Strecke zwischen zwei Querprofilen eine Annahme für die vorhandene Transportkapazität getroffen werden, was über diesen Faktor geschieht. Mit dem Faktor eins wird das Ergebnis der Oberstrom-Zelle bis zum nächsten Querprofil beibehalten. Bei 0,5 wird der Mittelwert beider Kapazitäten angesetzt, bei null nur die der unterstromigen Zelle verwendet. Im Benutzerhandbuch wird empfohlen, den Faktor zwischen 0,5 und eins zu wählen und abzuwägen, wie die sinnvollsten Ergebnisse und ein stabiler Berechnungsablauf erzielt werden können.

Treten Stabilitätsprobleme auf, bietet BASEMENT die Möglichkeit, eine künstliche Diffusion in den Berechnungsablauf einzustreuen, die solche Probleme reduzieren soll (BASEMENT User's Manual, U III - 3.2-20). Durch die Angabe eines Diffusionskoeffizienten kann der Einfluss sich summierender Diskretisierungsfehler verringert werden. Dafür ist der „*Upwind*“-Faktor gleich 0,5 zu wählen und ein Diffusionsfaktor zwischen null und maximal 0,05 anzugeben.

Falls für die hydraulischen Berechnungen der Modus „*Table*“, also die Interpolation der hydraulischen Größen aus einer Tabelle, verwendet wird, ist im morphologischen Parameterblock der Grenzwert für die zulässige Sohländerung festzulegen, bei dessen Überschreitung die Tabelle neu berechnet wird. Der Befehl hierfür lautet „*max_dz_table*“. Danach wird die zulässige Höhenänderung in Meter angegeben. Der Grenzwert sollte in etwa dem mittleren Korndurchmesser entsprechen. Zu groß gewählte Intervalle können zu Ergebnisabweichungen und Programmabstürzen führen, während sich zu kleine Intervalle negativ auf die Rechenzeiten auswirken, ohne die Ergebnisqualität zu verbessern.

2.2 HEC-RAS

Das Programm HEC-RAS wurde vom Hydrologic Engineering Center des U.S. Army Corps of Engineers (USACE) entwickelt. Die Abkürzung RAS steht für River Analysis System. Es handelt sich dabei um ein eindimensionales Freeware-Programm für die Berechnung sowohl stationärer als auch instationärer Gerinneströmungen. Das Tool kann auf der Internetseite des Army Corps of Engineers unter www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras bezogen werden. Es gibt mittlerweile mehrere Versionen der Software. Die Version 3.1.1 wurde im September 2002 veröffentlicht. Bei der ebenfalls verwendeten Version 3.1.3 handelt es sich lediglich um ein Update dieser Version, der Aufbau des Programms ist identisch. HEC-RAS beinhaltet in der Version 4.0 Beta auch die Möglichkeit, Geschiebetransportberechnungen durchzuführen. Hierfür sind die Transportansätze von Ackers-White, Engelund-Hansen, Laursen-Copeland, MPM, Toffaleti und Yang verfügbar. Im Rahmen dieser Arbeit wurde HEC-RAS jedoch nur für hydraulische Berechnungen und das Erstellen von Geometriefiles für den Import in BASEMENT benutzt. Dabei zeigten sich die verwendeten Versionen gleichwertig, was berechnete Ergebnisse und den Geometrieimport betraf.

HEC-RAS bietet im Gegensatz zu BASEMENT eine graphische Benutzeroberfläche, auf der alle für die numerische Simulation erforderlichen Daten eingegeben werden. Der Benutzer hat durch das Menu den Überblick über Geometrie, Abflussganglinie, Randbedingungen und berechnete Ergebnisse, die auch graphisch dargestellt werden können. Die Anzeige erfolgt jeweils in verschiedenen Fenstern. Die Datenspeicherung funktioniert ähnlich wie bei BASEMENT in verschiedenen Dateien. So gibt es eine Projektdatei, zu der eine oder mehrere Geometriedateien, die Abflussdateien für die berechneten Ganglinien und die zugehörigen Ergebnisdateien gehören.

Die Geometrieingabe erfolgt über Querprofile, die in die Bereiche Hauptkanal sowie links- und rechtsseitiges Vorland unterteilt werden können. Diesen Bereichen kann eine unterschiedliche Rauigkeit nach Manning zugeordnet werden. Der Manning-Rauigkeitswert entspricht dem Kehrwert des Stricklerwertes und wird im amerikanischen Raum verwendet. Ansonsten kann das Programm von den amerikanischen auf SI-Einheiten (metrisches System) umgestellt werden. Als Dezimaltrennzeichen ist (wie in BASEMENT) ein Punkt zu verwenden.

Die Berechnung der Wasserspiegellagen erfolgt durch die iterative Lösung der Bernoulli-Energiegleichung für jedes Querprofil nach der sogenannten Standard-Step-Methode. Die Energiegleichung lautet (USACE 2002):

$$h_2 + z_2 + \frac{k_2 \cdot u_2^2}{2 \cdot g} = h_1 + z_1 + \frac{k_1 \cdot u_1^2}{2 \cdot g} + h_e$$

mit:	$h_{1,2}$	=	Fließtiefe in Querprofile 1 bzw. 2	[m]
	$z_{1,2}$	=	Sohlhöhenkote in Querprofil 1 bzw. 2	[m]
	$k_{1,2}$	=	Gewichtungsfaktor für die Geschwindigkeiten	[-]
	$u_{1,2}$	=	Durchschnittliche Fließgeschwindigkeiten ($u = Q / A$)	[m/s]
	g	=	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
	h_e	=	Energieverlusthöhe	[m]

Die Fließtiefe kann in gegliederten Querschnitten mit Bereichen unterschiedlicher Rauheit entweder über den hydraulischen Radius oder alternativ nach der Streifenmethode berechnet werden. Beide Ansätze führen zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Als Unterstrom-Randbedingungen sind Normalwasserverhältnisse (mit Angabe der Sohlneigung im letzten Querprofil), die kritische Fließtiefe, oder ein bekannter Wasserspiegel wählbar. Auf Oberstromseite wird ein konstanter oder zeitlich veränderlicher Abfluss angegeben. Außerdem können Zusammenflüsse und Verzweigungen von Fluss-systemen sowie der Einfluss von Längs- und Querbauwerken (Brücken, Wehre, Schütze, Rohre, Düker) modelliert und berechnet werden. Die Ergebnisse für alle relevanten hydraulischen Kenngrößen können anschließend entweder in Tabellenform ausgegeben oder graphisch dargestellt werden (siehe Abb. 4 und 5). Als zusätzliches Feature gibt es die Möglichkeit, eine dreidimensionale Ansicht des Gerinnes zu erzeugen, was gerade bei komplexen Geometrien der Übersichtlichkeit dient.

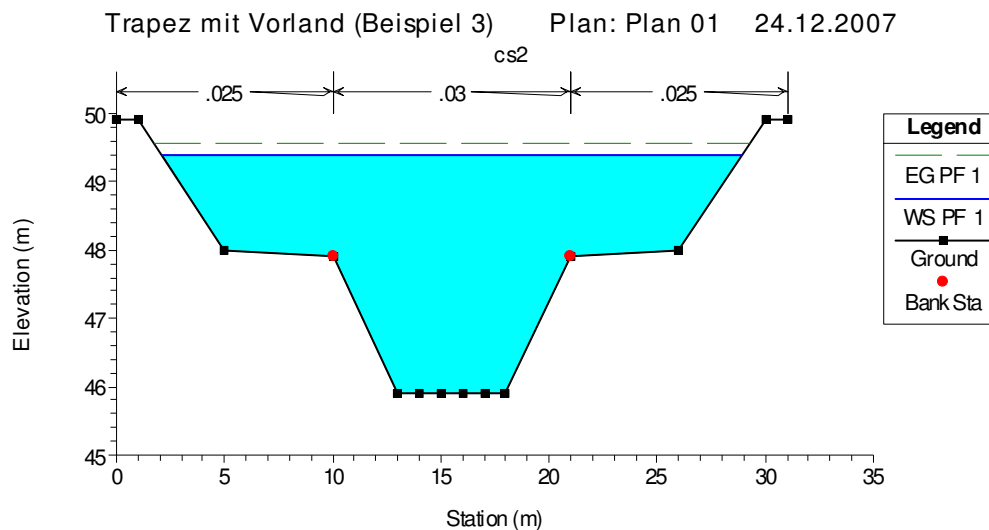


Abb. 4: Graphische Ergebnisdarstellung in HEC-RAS in einem ausgewählten Querprofil.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse, die die Berechnung in HEC-RAS für die Geometrie von Beispiel 2 und 3 (siehe Kap. 4.2) für einen konstanten Abfluss von $90 \text{ m}^3/\text{s}$ ergab. Dargestellt ist der Schnitt durch ein Querprofil mit dem Verlauf der Energielinie, der Wasserspiegellage und der durchströmten Querschnittsfläche. Außerdem sind Bereiche unterschiedlicher Rauigkeit mit Angabe des Manningwertes gekennzeichnet. Die beiden roten Punkte markieren den Übergang zwischen Vorland und Hauptkanal.

Diese Geometrie wurde (mit den entsprechenden Änderungen, siehe Kap. 2.1.3) auch für den Import in BASEMENT verwendet.

Die dreidimensionale Darstellung in Abbildung 5 gibt einen Überblick über alle zwölf Querprofile des Beispiels.

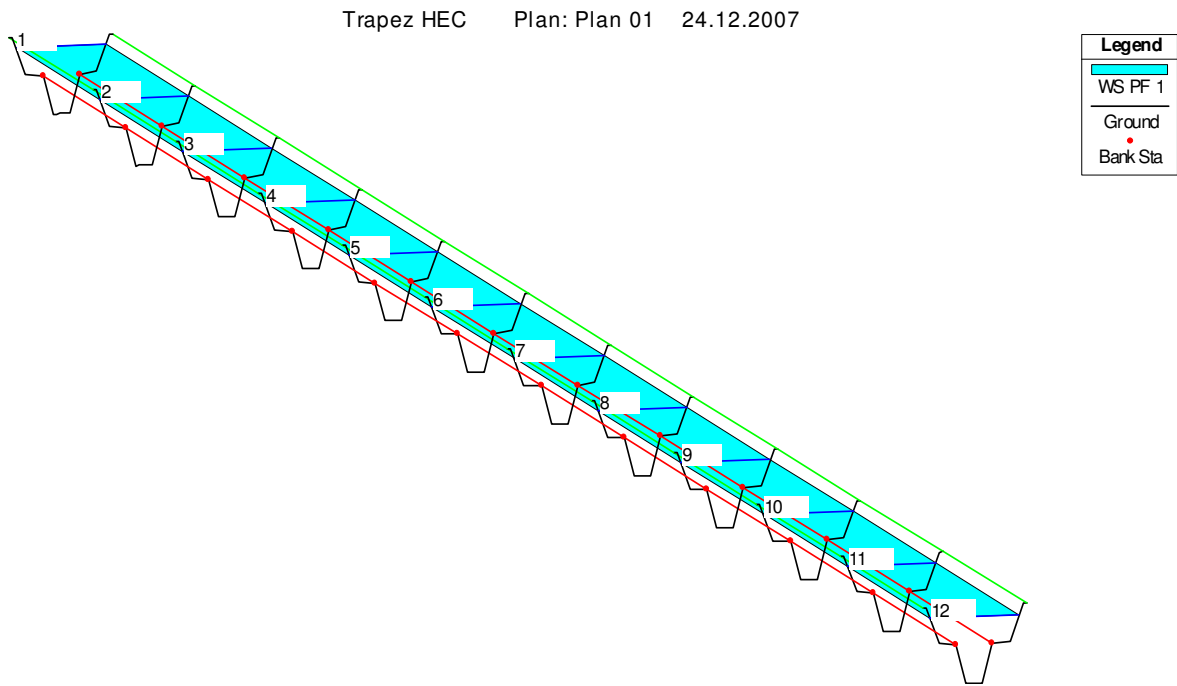


Abb. 5: HEC-RAS, Trapezquerschnitt mit Vorländern aus Beispiel 2 bei $Q = 90 \text{ m}^3/\text{s}$.

3. Theoretische Grundlagen

Als Grundlage für die numerischen Berechnungen dienen eine Reihe mathematischer, strömungsmechanischer, hydraulischer und morphologischer Formeln, deren Inhalt und Anwendungsrahmen in diesem Kapitel näher beschrieben werden soll. Die Kenntnis der zugrunde liegenden Formeln und der verschiedenen Vereinfachungen, die bei der Implementierung in das numerische Simulationsmodell getroffen werden müssen, ist Grundlage für die erfolgreiche Bearbeitung und Modellierung hydraulischer Szenarien.

3.1 Strömungsgleichungen

Strömungsvorgänge in der Natur sind hochkomplex, eine genaue Erfassung aller stattfindenden Prozesse ist in vielen Fällen nicht möglich bzw. mathematisch nicht lösbar, da die erforderlichen Randbedingungen und relevanten Parameter unbekannt sind. Außerdem ist die Leistungsfähigkeit einer numerischen Simulation stets begrenzt, sei es nun durch die Anzahl und Genauigkeit der zur Verfügung stehenden Eingangsdaten oder schlichtweg durch die vorhandene Rechnerleistung. Deshalb sind in der Praxis immer eine Vielzahl von Vereinfachungen zu treffen, um ein konkretes Problem handhaben zu können.

3.1.1 Navier-Stokes Gleichungen

Die Navier-Stokes Gleichungen sind die Grundgleichungen der Strömungsmechanik. Sie beschreiben den Zusammenhang zwischen der Strömungsgeschwindigkeit u und der Druckverteilung für newtonsche Flüssigkeiten und Gase in einem Kontinuum. Den Kern dieser Gleichungen stellt der Impulssatz dar, der auf Newtons Erkenntnis, „Impulsänderung entspricht einer Kraftwirkung“, beruht. Die Navier-Stokes Gleichungen verkörpern ein System von nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen 2. Ordnung und wurden nach ihren Entdeckern, dem Franzosen Claude Navier und dem Briten George Stokes, benannt. Beide hatten unabhängig voneinander – im Jahr 1827 bzw. 1845 – erstmals den Impulssatz für newtonsche Fluide wie Wasser, Öl oder auch Luft in differentieller Form formuliert. Zur Lösung des Gleichungssystems müssen zusätzlich zum Impulssatz noch der Massenerhaltungssatz und der Energieerhaltungssatz hinzugefügt werden. In seiner allgemeinsten Formulierung beschreibt das Navier-Stokes Gleichungssystem Strömungszustände, in denen die Dichte des Fluids in allen drei Koordinatenrichtungen veränderlich ist. Da für diese Gleichung aber die Existenz einer globalen Lösung mathematisch nicht erwiesen ist und weil die praktische Anwendung nur auf Grundlage bekannter Eingangsparameter und Randbedingungen erfolgen kann, werden einige vereinfachende Ansätze benötigt. So geht man in der Hydraulik davon aus, dass die Dichte des Wassers als – zumindest bereichsweise – konstant angenommen werden kann und es sich um ein inkompressibles Fluid handelt. Diese Vereinfachungen sind nicht für alle Fragestellungen zulässig, so zum Beispiel bei Überschallströmungen oder beim Aufsteigen heißer Luft über einem Waldbrand. Für Wasserströmungen sind sie jedoch akzeptabel.

Die inkompressiblen Navier-Stokes Gleichungen lauten (Bollich 2000):

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \text{grad } \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \cdot \text{grad } p + \nu \cdot \text{div grad } \vec{u} + \vec{f}$$

mit:	\vec{u}	=	Vektor der Strömungsgeschwindigkeit mit den Komponenten u , v und w in den drei Koordinatenrichtungen	[m/s]
	t	=	Zeit	[s]
	ρ	=	Dichte des Fluids	[kg/m ³]
	p	=	Physikalischer Druck	[N/m ²]
	ν	=	Kinematische Viskosität	[m ² /s]
	\vec{f}	=	Vektor des Quotienten aus Volumenkraft und Dichte	[m/s ²]

Dazu kommt die Kontinuitätsbedingung, die die Volumenerhaltung im differentiellen Element beschreibt (Manhart 2006):

$$\text{div } \vec{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Die vorliegenden Gleichungen werden in der Literatur üblicherweise als *die* Navier-Stokes-Gleichungen bezeichnet, weil sie die am besten untersuchten und in der Praxis am häufigsten benutzten sind. In der Praxis gewinnt man analytische Lösungen, indem man die physikalischen Modelle und Randbedingungen vereinfacht. Da die Theorie für praktische Probleme keine Lösungen bereitstellen kann, sind die Navier-Stokes-Gleichungen ein wichtiges Anwendungsfeld der numerischen Mathematik. Der Teilbereich, der sich mit der Konstruktion von numerischen Näherungsverfahren für die Navier-Stokes-Gleichungen beschäftigt, ist die numerische Strömungsdynamik oder Computational Fluid Dynamics (CFD).

Die Navier-Stokes-Gleichungen können direkt numerisch gelöst werden. Jedoch erzwingt die Auflösung der einzelnen Turbulenzen ein sehr feines Gitter, so dass dies eigentlich nur in der Forschung unter Zuhilfenahme von Supercomputern und bei kleinen Reynolds-Zahlen möglich ist. In der Praxis hat sich die Lösung der Reynolds-Gleichungen durchgesetzt. Hier ist jedoch ein Turbulenzmodell nötig, um das Gleichungssystem zu schließen. Als Mittelweg gilt die Large Eddy Simulation, die zumindest die großen Wirbel direkt numerisch berechnet und erst die kleinen Skalen über ein Turbulenzmodell simuliert (Malcherek 2002).

3.1.2 Flachwassergleichungen

Wie bereits erwähnt, sind in der Praxis eine Reihe von Vereinfachungen notwendig, um hydrodynamische Berechnungen effektiv handhaben zu können. Ein erster Schritt hierbei ist die Zugrundelegung der hydrostatischen Druckannahme und deren Integration in die Gleichungen von Navier-Stokes. Dies geschieht unter der Voraussetzung, dass die vertikale Beschleunigung der Wasserpartikel vernachlässigbar klein ist. Daraus resultieren die sog. Flachwassergleichungen, welche zunächst noch in dreidimensionaler Form vorliegen. Die vertikale Impulsgleichung wird hier durch die hydrostatische Druckannahme ersetzt:

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot (z_S - z)$$

mit:	p	=	Wasserdruck	[N/m ²]
	p_0	=	Atmosphärendruck	[N/m ²]
	ρ	=	Dichte von Wasser	[kg/m ³]
	g	=	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
	z_S	=	Höhenkote des Wasserspiegels	[m]
	z	=	Höhenkote der Gerinnesohle	[m]

Dadurch entfällt der Vektor f am Ende der Gleichung. Durch Tiefenintegration des dreidimensionalen Navier-Stokes Gleichungssystems erhält man schließlich die sogenannten Flachwassergleichungen in zweidimensionaler Form. Die Massenerhaltungsgleichung lautet:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0$$

Worin u die Geschwindigkeit in x-Richtung und v die Geschwindigkeitskomponente in y-Richtung darstellt (vgl. Abb. 6). Die Fließtiefe h berechnet sich aus der Differenz zwischen der Wasserspiegelhöhe z_S und der Höhenlage der Sohle z .

$$h = z_S - z$$

Aus der Impulserhaltung folgen die Geschwindigkeitsgleichungen, die ausgeschrieben für beide Richtungen lauten (Schindler 2006):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + g \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot (h \cdot \nu_D \cdot \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \cdot (h \cdot \nu_D \cdot \frac{\partial u}{\partial y}) - \frac{1}{h} \cdot \frac{\tau_{Bx}}{\rho}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + g \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot (h \cdot \nu_D \cdot \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \cdot (h \cdot \nu_D \cdot \frac{\partial v}{\partial y}) - \frac{1}{h} \cdot \frac{\tau_{By}}{\rho}$$

Darin bedeutet g die Erdbeschleunigung, ν_D die kinematische Zähigkeit der Impulsdispersion und der letzte Term $\tau_B / (h \rho)$ beschreibt die Sohlreibung über die Schubspannung τ_B .

Zur Lösung der Flachwassergleichungen, benötigt man – wie für jede partielle Differentialgleichung (PDG) – geeignete Randbedingungen. Diese sind an den geschlossenen Rändern:

$$\rho u \cdot n = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad ,$$

worin n den Normalenvektor darstellt, d.h. es findet kein Massenfluss über diese Ränder statt. An den offenen Rändern herrscht der Abfluss q bei der Fließtiefe h (VAW 2007).

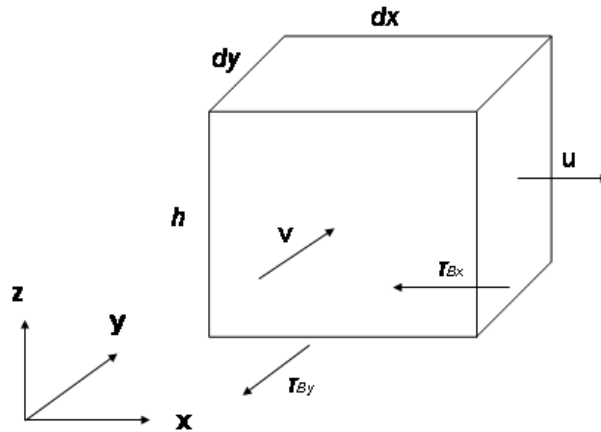


Abb. 6: Geschwindigkeits- und Reibungskomponenten der Flachwassergleichungen.

2D-Modelle stellen im Vergleich zu den verschiedenen Lösungsansätzen der dreidimensionalen Strömungsgleichung „keinen eigenständigen Simulationsmodus dar, in dem alle Eigenschaften der Strömung in exakter oder modellierter Form“ wiedergegeben werden können, wie es bei der Large Eddy Simulation und der tiefenintegrierten Simulation prinzipiell möglich ist. Solche Modelle sind „tatsächlich nur ein Modell, d.h. sie geben einen Teilaspekt der Realität des Fließgewässers wieder“ (Malcherek 2004). Dennoch können mit Hilfe dieser Gleichungen viele Strömungsvorgänge in offenen Gerinnen für praktische Gesichtspunkte genügend genau erfasst werden.

3.1.3 Saint-Venant Gleichungen

Die Saint-Venant Gleichungen sind eindimensionale, tiefen- und breitengemittelte Modelle zur vereinfachten Beschreibung von Gerinneströmungen. Die Strömungsgeschwindigkeit ist dabei nur noch in x-Richtung, also in Fließrichtung, veränderlich. Das BASEMENT Modul BASECHAIN basiert auf diesen Gleichungen. Dabei wird mit folgenden Vereinfachungen gearbeitet:

- Hydrostatische Druckverteilung
- Einheitliche Geschwindigkeit über den gesamten Querschnitt
- Vertikale Beschleunigung = 0
- Kleine Sohlneigung ($\cos \alpha \cong 1$)
- Stationäre Widerstandsgesetze gelten auch für instationäre Fließzustände

So kann für ein Kontrollvolumen mit konstanter Dichte ρ über den Ansatz der Massenerhaltung und Zuhilfenahme einiger Umformungen folgende Kontinuitätsgleichung formuliert werden:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

Aus der Impulserhaltung folgt die Gleichung (Schindler 2006):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (u \cdot Q)}{\partial x} = -g \cdot A \cdot \frac{\partial z_s}{\partial x} - g \cdot A \cdot I_E$$

mit:	Q	=	Abfluss	[m ³ /s]
	t	=	Zeit	[s]
	u	=	Fließgeschwindigkeit in x-Richtung	[m/s]
	A	=	durchströmte Querschnittsfläche	[m ²]
	g	=	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
	I_E	=	Energieliniengefälle	[-]

Nun muss noch die Sohlreibung berücksichtigt werden. Der Zusammenhang zwischen der Sohlschubspannung τ und dem Reibungsgefälle ist:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot I_E$$

worin ρ die Dichte des Wassers und R der hydraulische Radius des Querschnitts, also der Quotient der durchströmten Querschnittsfläche A und des benetzten Umfangs U , ist. Da sich die Fließgeschwindigkeit proportional zur sogenannten Schubspannungsgeschwindigkeit u^*

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$$

verhält, können folgende Reibungsansätze zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit u formuliert werden:

- Nach Chezy: $u = C \cdot \sqrt{R \cdot I_E}$
- Nach Darcy-Weisbach: $u = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cdot \sqrt{8 \cdot g \cdot R \cdot I_E}$
- Nach Manning-Strickler: $u = k_{st} \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{I_E}$

mit:	u	=	Fließgeschwindigkeit	[m/s]
	C	=	Geschwindigkeitsbeiwert nach Chezy	[m ^{1/2} /s]
	R	=	Hydraulischer Radius	[m]
	λ	=	Reibungsbeiwert aus Moody-Diagramm	[-]
	k_{st}	=	Rauhigkeitsbeiwert nach Strickler	[m ^{1/3} /s]

Bei der hydraulischen Berechnung ist eine Aufteilung des Gerinnequerschnitts in verschiedene Zonen mit unterschiedlicher Reibung (z.B. Vorland und Hauptkanal) möglich.

Eindimensionale instationäre Fließgewässermodelle stellen heute die einfachste Möglichkeit einer numerischen Simulation dar, was den Grad an Idealisierung und Berechnungsaufwand betrifft. Ihre Prognosefähigkeit ist durch die getroffenen Vereinfachungen begrenzt. Unter der Einschränkung auf spezielle Untersuchungsstrecken, die durch ihre Beschaffenheit eine Erfassung als eindimensionales Simulationsmodell erlauben (annähernd geradlinig verlaufende Strecken ohne ausgeprägte Kurven und starke Unterschiede in der Geometrie der Querprofile) kann dieser Ansatz durchaus brauchbare Ergebnisse liefern. Die geringeren Anforderungen an die Computerleistung ermöglichen einen großen Anwendungsbereich und

die Rechenzeiten bewegen sich in einem überschaubaren Rahmen, der die Durchführung vieler Rechenläufe zulässt, wie sie zur Kalibrierung und Prognoserechnung erforderlich sind.

3.2 Morphologische Berechnungen

Soll ein numerisches Modell neben hydraulischen auch morphologische Berechnungen durchführen, das heißt eine Aussage über den Geschiebetransport und die damit verbundenen Veränderungen der Gerinnesohle abgeben, geschieht dies durch die Implementierung entsprechender morphologischer Berechnungsansätze. Das Abflussgeschehen beeinflusst dabei die Sohlschubspannung, woraus die Geschiebetransportkapazität berechnet wird. Das Programm muss eine Verknüpfung zwischen den hydraulischen und morphologischen Formeln und deren Ergebnissen sicherstellen. Die Berechnung erfolgt schrittweise, wobei der Anwender die Genauigkeit durch die Vorgabe einer zu erreichenden Präzision und die Begrenzung der Anzahl an Iterationsschritten für die hydraulische Berechnung steuern kann. Abbildung 7 zeigt schematisch den Ablauf einer morphologischen Berechnung mit BASEMENT.

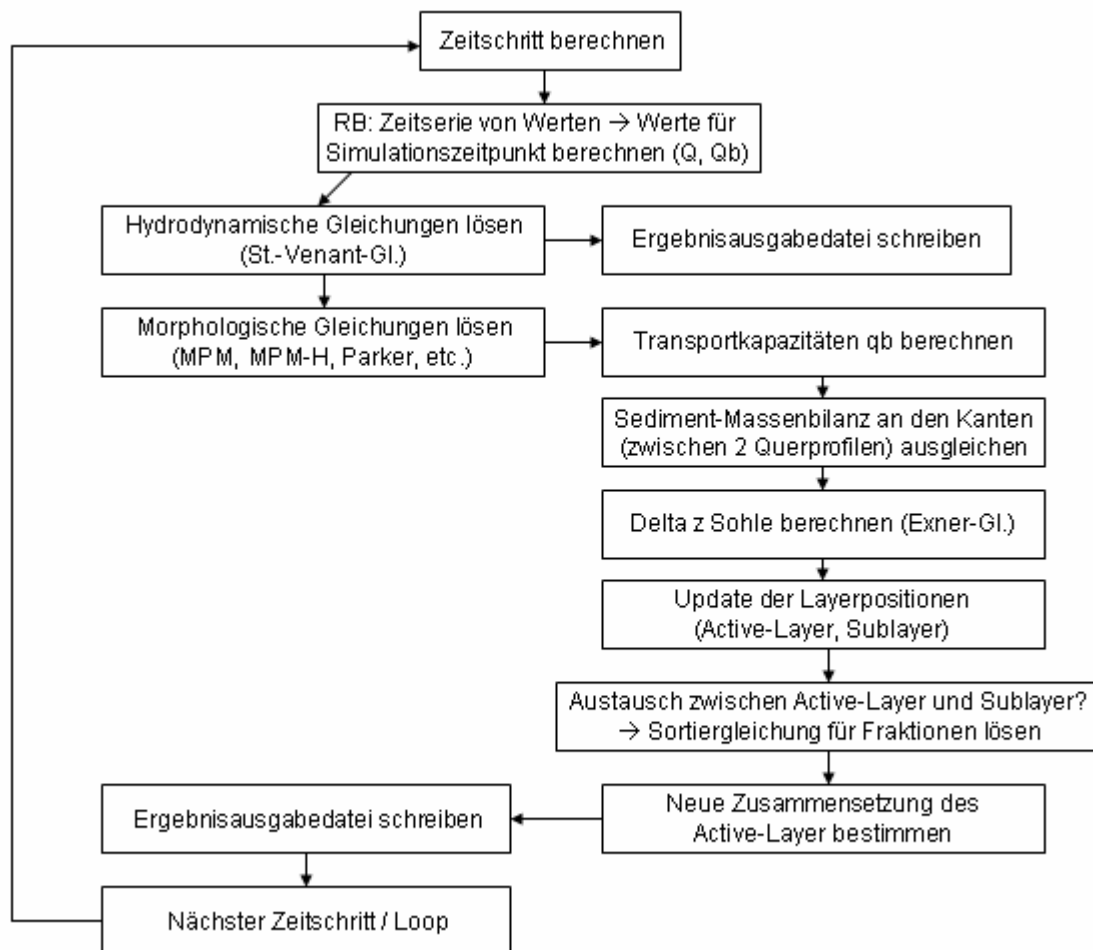


Abb. 7: Ablauf einer morphologischen Berechnung in Basechain 1D.

Zur Berechnung der Geschiebetransportkapazität können unterschiedliche Ansätze verwendet werden. In Wirklichkeit ist der Sedimenttransport ein äußerst komplexer Vorgang, die tatsächlich ablaufenden Prozesse und Wechselwirkungen sind weitgehend unbekannt und

schwer in einer mathematischen Formel zu erfassen. Deshalb haben alle gängigen Ansätze auch stark empirischen Charakter, d.h. sie wurden aus Versuchsreihen unter Laborbedingungen abgeleitet und gelten zunächst auch nur für diese Bedingungen. Bei der praktischen Anwendung ist darum neben der Kenntnis des Anwendungsbereichs einer Transportformel immer auch eine Kalibrierung und Validierung des numerischen Modells notwendig. Die folgenden Ansätze sind zur Berechnung von reinen Geschiebetransportvorgängen entwickelt worden, eine Erfassung von Schwebstoffen, die in Suspension transportiert werden, ist in BASEMENT derzeit noch nicht möglich. Eine dahingehende Erweiterung des numerischen Modells ist aber in der nächsten Version vorgesehen. Im Folgenden werden die morphologischen Gleichungen beschrieben, die BASEMENT zur Auswahl anbietet.

3.2.1 Gleichung von Meyer-Peter und Müller

Einer der in der Praxis weit verbreiteten Ansätze zur Berechnung von Geschiebetransportvorgängen ist die 1948 veröffentlichte Formel von Meyer-Peter und Müller (MPM). Die Gleichung basiert auf einer von Meyer-Peter, Einstein und Favre in den 30er Jahren entwickelten Formel und stellt eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes dar. Die ursprüngliche Formel war für Einheitskorn abgeleitet worden und man fand heraus, dass sie sich nicht ohne Weiteres auf Sedimentmischungen anwenden lässt. Meyer-Peter und Müller führten deshalb eine Reihe von Versuchen mit Geschiebemischungen durch. Sie nahmen dabei an, dass sich solche Mischungen durch einen einzigen Parameter, nämlich den mittleren Korndurchmesser d_m ausreichend beschreiben lassen (*Meyer-Peter, Müller 1949*). Sie untersuchten den Zusammenhang zwischen dem Transportbeginn und der vorhandenen Sohleigung und drückten diesen durch die vorherrschenden Schubspannungen aus. Unterhalb der kritischen Schubspannung findet kein Geschiebetransport statt. Dieser Zusammenhang kann als eine Kräftebilanz am Korn interpretiert werden:

$$\tau_w = \tau_c + \tau_G$$

Die wirkende Schubspannung τ_w ist gleich der Summe aus kritischer (τ_c) und geschiebewirksamer Schubspannung τ_G .

Setzt man die entsprechenden Gleichungen für die einzelnen Terme ein, erhält man:

$$\left(\frac{k_{St}}{k_R}\right)^{3/2} \cdot \rho_w \cdot g \cdot R_s \cdot I_E = \theta_{crit} \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot d_m + 0,25 \cdot \rho_w^{1/3} \cdot [g \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot q_B]^{2/3}$$

mit:	ρ_w	=	Dichte des Wassers	[kg/m ³]
	ρ_s	=	Dichte des Sediments	[kg/m ³]
	g	=	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
	R_s	=	Hydraulischer Radius, bezogen auf den über der Sohle abfließenden Anteil (Q_s) des Abflusses Q	[m]
	I_E	=	Energieliniengefälle	[-]
	$\left(\frac{k_{St}}{k_R}\right)^{3/2}$	=	Faktor zur Abtrennung der Formrauheit	[-]

θ_{crit}	=	Kritischer Shields-Wert	[-]
d_m	=	Mittlerer Korndurchmesser des Sohlmaterials	[m]
q_B	=	spezifischer Geschiebetrieb pro Meter Flussbreite	[m ³ /s m]

Der hydraulische Radius R_S ist wie folgt definiert und kann für eine Handrechnung näherungsweise mit dem Faktor 0,9 aus der Fließtiefe h berechnet werden (Aufleger 2003).

$$R_S = \frac{Q_S}{Q} \cdot h \approx 0,9 \cdot h$$

Die MPM-Gleichung lässt sich auch in einer alternativen Schreibweise formulieren, die in wissenschaftlichen Veröffentlichungen oft zu finden ist. Sie lautet:

$$\phi_G = 8 \cdot \left(\left(\frac{k_{St}}{k_R} \right)^{3/2} \cdot \theta - \theta_{crit} \right)^{3/2}$$

Darin bedeutet ϕ_G die dimensionslose Geschiebetransportkapazität. Im Programm BASEMENT ist die Formel in dieser Form implementiert. Der Kalibrierfaktor vor der Formel wurde in der Arbeit von Meyer-Peter und Müller mit acht angegeben. Erfahrungen mit numerischen Modellen führten zu der Erkenntnis, dass der Faktor acht den tatsächlich stattfindenden Geschiebetransport häufig überschätzt. Realistischere Ergebnisse liefert ein Faktor im Bereich von fünf bis sechs (Hunziker 1995). Diesem Umstand trägt BASEMENT Rechnung, indem die Wahl dieses Parameters dem Anwender überlassen wird. Somit ist bei der Einkornsimulation mit MPM, neben der Wahl des charakteristischen Korndurchmessers und der Rauigkeit des Gerinnes, eine weitere Kalibriergröße gegeben (vgl. Kap. 2.1.5).

Der Shields-Wert θ berechnet sich nach folgendem Zusammenhang:

$$\theta = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot d_m} = \frac{R_S \cdot I_E}{\rho' \cdot d_m} \quad \text{mit:} \quad \rho' = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$$

Der kritische Shields-Parameter θ_{crit} ist in der ursprünglichen Formel von Meyer-Peter und Müller mit 0,047 angegeben, kann aber, je nach Fall, im Bereich von 0,025 bis 0,05 liegen.

Zur Berechnung des charakteristischen, mittleren Korndurchmessers d_m empfehlen Meyer-Peter und Müller folgenden Ansatz, der bis heute gebräuchlich ist:

$$d_m = \sum_{i=1}^n d_i \cdot p_i$$

mit:	p_i	=	Anteil der Fraktion i an der Gesamtkornverteilung des Ausgangsmaterials	[-]
	d_i	=	Korndurchmesser der Fraktion i	[m]
	n	=	Anzahl der Kornfraktionen	[-]

Durch diese Formel wird die Kornverteilung innerhalb einer Sedimentmischung gewichtet. Der so berechnete mittlere Korndurchmesser zeigt, je nach Zusammensetzung des Sohlmaterials, teilweise erhebliche Abweichungen vom d_{50} der Mischung (Sendzik 2003). Auch die mittleren Korndurchmesser in Hunzikers Formel für fraktionierte Transportvorgänge werden nach obiger Definition berechnet.

Die Geschiebetransportkapazität pro Meter Sohlbreite berechnet sich dann folgendermaßen:

$$q_B = \phi_G \cdot \sqrt{\rho' \cdot g \cdot d_m^3}$$

Die Formel von Meyer-Peter und Müller ist zur Abschätzung von Geschiebetransportraten nach wie vor sehr gebräuchlich, allerdings können durch das Einkornmodell keinerlei Austausch- und Sortierprozesse erfasst werden, wie sie beispielsweise bei der Deckschichtbildung ablaufen. Unter Deckschichtbildung versteht man die Auswaschung feinerer Kornanteile und die damit verbundene allmähliche Vergrößerung der Sohloberfläche bei unterbundener oder geringer Geschiebezugabe. Dieser Effekt ist in der Realität von großer Bedeutung, da er zu einer Abpflasterung der Sohle und damit zu einem höheren Widerstand gegenüber Erosion führt. Die kritische Sohlschubspannung hängt bei ausgebildeter Deckschicht nämlich vom mittleren Korndurchmesser an der Oberfläche ab und erhöht sich somit gegenüber der Unterschicht. Erst bei Überschreitung dieser Schubspannung kommt es zu einem Aufreißen der Abpflasterungsschicht und zur Erosion der feineren Unterschicht. Sollen solche Effekte im Modell berücksichtigt werden, sind differenziertere Ansätze erforderlich.

3.2.2 Günters Zweikornmodell

Der Ansatz von Günter (1971) ist ein Zweikornmodell, um den Einfluss der Deckschicht zu berücksichtigen. Dabei wird die kritische Schubspannung, bei der Geschiebetrieb einsetzt, aus der Formel von Meyer-Peter und Müller berechnet und mit einem Faktor, dem sogenannten Günterfaktor multipliziert. Dadurch wird ein späterer Transportbeginn als bei MPM zugrunde gelegt, da dieser vom größeren Korndurchmesser der Deckschicht abhängt. Der Günterfaktor beschreibt diesen Zusammenhang folgendermaßen:

$$\theta_{crit,DS} = \theta_{crit} \cdot \left(\frac{d_{m,DS}}{d_{m,US}} \right)^{2/3}$$

mit:	$\theta_{crit,DS}$	=	Erhöhte kritische Schubspannung nach Günter	[-]
	θ_{crit}	=	Kritische Schubspannung des Unterschichtmaterials	[-]
	$d_{m,DS}$	=	Mittlerer Korndurchmesser der Deckschicht	[m]
	$d_{m,US}$	=	Mittlerer Korndurchmesser der Unterschicht	[m]

Der mittlere Korndurchmesser der Deckschicht entspricht in etwa dem d_{90} des Unterschichtmaterials, deshalb findet man die Formel in der Literatur auch mit diesem Parameter. Das von Günter modifizierte Einkornmodell geht von einem Zustand mit vollständig ausgebildeter Deckschicht aus, was in der Praxis oftmals zu einer Überschätzung der kritischen Schubspannung führen kann. Dies hat zu geringe Transportraten zur Folge, da die in Wirklichkeit

herrschenden Zwischenzustände bei der Deckschichtbildung nicht berücksichtigt werden können. Ein Vergleich der Ergebnisse mit denen einer Einkornsimulation mit MPM ist daher stets angebracht.

3.2.3 Formel von Meyer-Peter Müller und Hunziker

Der Ansatz von Günter berücksichtigt lediglich den späteren Transportbeginn bei vorhandener Deckschicht, er erlaubt aber keine genauere Erfassung der Zusammensetzung des Sohlenmaterials und der ablaufenden Sortier- und Transportvorgänge. Hier wird es erforderlich, die Sedimentmischungen detaillierter zu beschreiben. Dies geschieht durch die Umformung der Formel von Meyer-Peter und Müller für einzelne Kornfraktionen.

$$\phi_i = p_i \cdot 8 \cdot (k \cdot \theta_i - \xi_i \cdot \theta_{crit})^{3/2}$$

mit:	ϕ_i	=	dimensionslose Geschiebetransportkapazität der Fraktion i	[-]
	p_i	=	Anteil der Fraktion i in der Transportschicht	[%]
	ξ_i	=	Hiding & Exposure – Funktion	[-]
	k	=	Kalibrierkonstante, die den Einfluss der Formrauheit berücksichtigt	[-]
	θ_i	=	Shields-Parameter der Fraktion i	[-]

Jeder Fraktion wird eine eigene Transportkapazität zugeordnet, welche dann für das gesamte Material summiert wird. Die sogenannte Hiding & Exposure-Funktion beschreibt den Abschirmeffekt, den größere Körner auf feinere Kornfraktionen ausüben, da sie der Strömung mehr Angriffsfläche bieten. Es gibt eine Reihe unterschiedlicher Ansätze für diese Funktion, als Beispiele seien hier die Namen Proffitt und Sutherland, Egiazaroff sowie Ashida und Michiue genannt.

Die 1995 an der ETH Zürich veröffentlichte Formel von Hunziker (MPM-H) stellt eine Variante der Formel von Meyer-Peter und Müller dar. Sie lautet:

$$\phi_i = p_i \cdot 5 \cdot (\xi_i \cdot (\theta_{dms} - \theta_{cdms}))^{3/2}$$

mit:	θ_{dms}	=	Shields-Parameter des d_m der Deckschicht	[-]
	θ_{cdms}	=	kritische dimensionslose Schubspannung (Shields-Parameter) des d_m an der Sohlenoberfläche	[-]
	p_i	=	prozentualer Anteil der Fraktion i in der Gesamtmischung	[%]

In der Formel von Hunziker werden die dimensionslosen Schubspannungen nicht mehr pro Fraktion bestimmt, sondern für den mittleren Korndurchmesser an der Sohlenoberfläche. Die Hiding & Exposure-Funktion korrigiert nicht nur die kritische Schubspannung, sondern den gesamten Term. Durch diesen Ansatz wird dem Gedanken der „equal mobility“ Rechnung getragen, d.h. der Transportbeginn liegt für alle Fraktionen bei derselben Schubspannung. Das Konzept des einheitlichen Bewegungsbeginns für alle Kornfraktionen basiert auf Beobachtungen von Günter und Gessler, die in ihren Versuchen feststellten, dass in der Deckschicht stets alle Fraktionen vorhanden waren, wenn auch der Anteil an Feinkorn kleiner geworden war (Hunziker 1995).

Für die Hiding-Funktion stellt Hunziker folgenden Ansatz auf:

$$\xi_i = \left(\frac{d_i}{d_{ms}} \right)^{-\alpha} \quad \text{mit} \quad \alpha = 0,011 \cdot (\theta_{dms})^{-1,5} - 0,3$$

$$\theta_{cdms} = \theta_{crit} \cdot \left(\frac{d_{m0}}{d_{ms}} \right)^{0,33}$$

mit:	d_i	=	repräsentativer Korndurchmesser der Fraktion i	[m]
	d_{ms}	=	charakteristischer, mittlerer Korndurchmesser der obersten Schicht (Deckschicht)	[m]
	d_{m0}	=	charakteristischer Korndurchmesser der Ausgangsmischung (Unterschicht)	[m]
	θ_{crit}	=	kritische dimensionslose Schubspannung für Einheitskorn	[-]

Die Formel von Hunziker ist die in BASEMENT implementierte Standardformel für fraktionierte Transportvorgänge, eine Variation einzelner Parameter innerhalb der Formel ist nicht möglich.

3.2.4 Formeln von Parker und Rickenmann

Neben den bereits erwähnten Formeln bietet BASEMENT noch zwei weitere Formeln zur Berechnung von Geschiebetransportvorgängen an. Diese sind aber auf Grund ihres eingeschränkten Gültigkeitsbereiches nicht für alle Fragestellungen geeignet.

Die Formel von Parker wurde aus Naturdaten des Flusses Qak Creek abgeleitet. Dabei wurde der Sandanteil nicht berücksichtigt, da dieser während hoher, geschiebewirksamer Abflussraten für gewöhnlich in Suspension transportiert wird. Die Formel gilt also speziell für Flüsse mit Kiesbett und einem kleinsten Korndurchmesser größer als zwei Millimeter.

BASEMENT enthält die Formel in der für fraktionierten Transport erweiterten Form von 1990 mit einer reduzierten Hiding-Funktion. Die komplexe Formel basiert auf folgenden grundlegenden Beziehungen:

$$q_{Bi} = f \left(\frac{\theta}{\theta_{crit}}, \frac{d_i}{d_{ms}}, p_i \right) \quad \text{mit} \quad \theta_{crit} = 0,0386$$

$$\theta = \frac{R_s \cdot I'}{(s-1) \cdot d_{ms}} \quad \text{mit} \quad R_s = \frac{Q_s}{Q} \cdot h \quad \text{und} \quad I' = I_E \cdot \left(\frac{k_{St}}{k_R} \right)^{3/2}$$

Die Ausgleichsfunktion lautet:

$$\xi_i = \left(\frac{d_i}{d_{ms}} \right)^{-0,0951}$$

Die Definition des hydraulischen Radius R_S ist mit der MPM-Formel identisch (Kap. 3.2.1), ebenso das Kornreibungsgefälle I' . Die dimensionslose kritische Schubspannung liegt in Parkers Formel niedriger als bei MPM. Bei der Berechnung der dimensionslosen Schubspannung und der Ausgleichsfunktion bezieht sich Parker auf den mittleren Korndurchmesser an der Sohlenoberfläche. Der Ansatz ist mit dem von Hunziker vergleichbar und berücksichtigt ebenfalls das Konzept der gleichen Mobilität.

Parkers Formel wurde zur Erfassung großer Transportraten entwickelt. Sie zeigte sich aber auch bei der Modellierung des Günter-Versuchs zur Deckschichtbildung als gut geeignet (Hunziker 1995).

Die Formel von Rickenmann ist ähnlich der Parker-Formel nur für Grobkorn geeignet. Sie wurde auf der Grundlage von 252 Modellversuchen ermittelt. Rickenmann bezog sich dabei sowohl auf die Versuche von Meyer-Peter und Müller, die mit Sohlneigungen zwischen 0,4 und 23 ‰ arbeiteten, als auch auf die Versuche von Smart und Jäggi mit sehr steilen Sohlneigungen von 3 bis 20 ‰. Er entwickelte folgende Formel, die den gesamten Bereich an untersuchten Sohlgefällen abdecken sollte (VAW 2007):

$$\phi = \frac{3,1}{\sqrt{s-1}} \cdot \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \cdot \sqrt{\theta} \cdot (\theta - \theta_{crit}) \cdot Fr^{1,1}$$

mit:	$d_{90/30}$	=	Charakteristische Korngrößen des Unterschichtmaterials als prozentuale Fraktionen der Sieblinie (90 bzw. 30 ‰)	[m]
	s	=	Relative Dichte des Sohlmaterials im Vergleich zu Wasser	$\frac{\rho_s}{\rho_w}$ [-]
	Fr	=	Froudezahl	[-]

Unter normalen Umständen angewandt, liefert die Formel meist zu geringe Transportraten, da sich hier der Einfluss der verwendeten steilen Sohlneigungen bemerkbar macht. Im Alpenraum kann der Ansatz zur Prognose und Simulation von Murgängen an alpinen Flüssen und Wildbächen eingesetzt werden. Die höheren Formverluste auf Grund rauer und unregelmäßiger Gerinnesohlen und die beschränkte Geschiebeverfügbarkeit stellen dabei die hauptsächlichen Merkmale solcher Gerinne dar (Rickenmann 2007).

3.2.5 Exner Differentialgleichung

Die Exner Gleichung gibt die Sohlhöhenänderung in allgemeiner, differentieller Form an. Sie entsteht aus den Massenerhaltungsgleichungen für jede Kornfraktion durch Aufsummieren der Massen aller Sedimentschichten zwischen der Oberfläche der Gerinnesohle und einem bestimmten Bezugsniveau. Für den eindimensionalen Fall lautet sie:

$$(1-p) \cdot \frac{\partial z_B}{\partial t} + \sum_{k=1}^{ng} \left(\frac{\partial q_{Bg}}{\partial x} + S_g - Sl_g \right) = 0$$

Darin bedeutet p den Porenanteil des Materials, z_B die Höhenkote der beweglichen Sohle, q_{Bg} die Transportkapazität in x-Richtung der jeweiligen Kornfraktion g . S_g ist die Schwebstoffquelle, und Sl_g steht für eine lokale Sedimentquelle pro Zelle und Kornklasse, sofern eine

solche externe Geschiebezugabe oder Entnahme vorhanden ist. Abbildung 8 gibt eine Übersicht der in der Exner-Gleichung vorkommenden Parameter eines zwei-dimensionalen numerischen Modells.

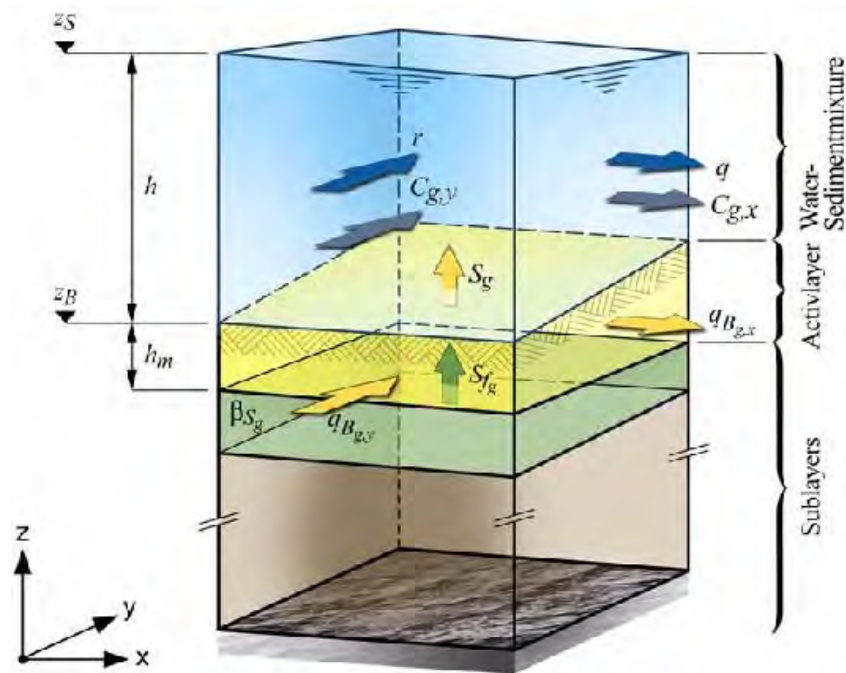


Abb. 8: Geschiebetransportparameter im numerischen Modell (VAW 2007).

Im eindimensionalen Fall werden die drei Komponenten in y-Richtung vernachlässigt. Die Variablen q und r stehen dabei für den spezifischen Abfluss in beiden Koordinatenrichtungen und C_g für die Konzentration des in Suspension transportierten Sediments. Der Anteil der Kornfraktion g (in Volumenprozent) an der Zusammensetzung der Unterschicht (*Sublayer*) wird hier mit β_{Sg} bezeichnet, der Anteil in der Austauschschicht (*Active Layer*) mit β_g .

Die Variable S_{fg} kommt in der Exner-Gleichung nicht vor. Sie beschreibt den Sedimentfluss zu oder aus der Austauschschicht (vgl. Kap. 3.2.6). Im Erosionsfall kommt – sofern mit einer konstanten Dicke h_m der Austauschschicht gerechnet wird (bei variabler Active-Layer-Dicke muss diese erst berechnet werden) – Unterschichtmaterial zur Austauschschicht. Im Anlandungsfall wird die Austauschschicht vom transportierten Geschiebe überlagert, auf Grund der konstanten Dicke der Schicht gelangt Material des Active-Layer in die Unterschicht. Dieser Sedimentfluss wird in BASEMENT nach folgender Formel berechnet:

$$S_{fg} = -(1-p) \cdot \frac{\partial}{\partial t} \cdot [(z_B - h_m) \cdot \beta] \quad \text{mit} \quad \beta = \beta_g \quad \text{bei Anlandung}$$

$$\beta = \beta_{Sg} \quad \text{im Erosionsfall}$$

Nun kann die neue Kornzusammensetzung der Schichten berechnet werden. Dies geschieht bei der eindimensionalen Berechnung mittels dieser Sortiergleichung:

$$(1-p) \cdot \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\beta_g \cdot h_m) + \frac{\partial q_{Bg}}{\partial x} + S_g + S_{fg} + S_{lg} = 0$$

Die Gleichung wird anschließend über die Querschnittsbreite und die Länge des Kontrollvolumens integriert (Finite Volumen Methode, siehe Kap. 3.3) und so diskretisiert, dass der neue Volumenanteil der einzelnen Fraktionen in der Gesamtmischung einer Schicht bestimmt werden kann [BASEMENT Manual R II - 3.2].

3.2.6 Das Active-Layer-Konzept

Da in einem Einkornmodell, in dem die gesamte Gerinnesohle aus Material einer einzigen gemittelten Korngröße besteht, wichtige Prozesse wie die Deckschichtbildung nicht erfasst werden können, muss das numerische Modell für fraktionsweise Berechnungen erweitert werden. Hierfür muss die Gerinnesohle in verschiedene Schichten eingeteilt werden. Zur Erfassung von Sortier- und Vergrößerungsprozessen sind mindestens zwei Schichten erforderlich. Die oberste Schicht ist die Austauschschicht (*Active-Layer*), deren Kornzusammensetzung veränderlich ist. Damit kann z.B. eine Auswaschung feinerer Kornfraktionen und die damit verbundene Abpflasterung und höhere Erosionsstabilität der Gerinnesohle berücksichtigt werden. Darunter folgen eine oder mehrere Unterschichten (*Sublayer*), deren Kornzusammensetzung erhalten bleibt, da sie nicht direkt der Strömung ausgesetzt sind, bis ein fester, nicht erodierbarer Horizont erreicht ist. Die Unterschichten sind am Transportgeschehen zunächst nicht beteiligt.

Diese Modellvorstellung geht auf Hirano zurück, der 1971 erstmals eine Differentialgleichung (DGL) zur Berechnung der Änderung der Kornzusammensetzung der Austauschschicht formulierte. Hirano ging dabei von einem Ein-Schicht-Modell aus (Abb. 9). Die Dicke der Austauschschicht wird hier mit L_a bezeichnet, $F_{i,a}$ und $F_{i,o}$ stellen den Anteil der Fraktion i in der Austauschschicht bzw. der Unterschicht dar.

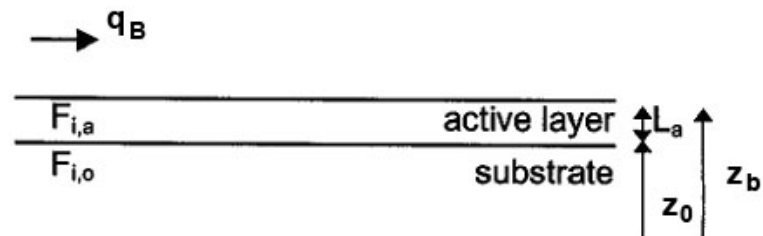


Abb. 9: Active-Layer-Konzept von Hirano (Kroekenstoel et al. 2003).

Im Erosionsfall lautet die DGL zur Bilanzierung des fraktionsweisen Sedimenteintrags in die Austauschschicht:

$$\frac{\partial F_{i,a}}{\partial t} + \frac{1}{L_a} \cdot \left(\frac{\partial (p_i \cdot q_B)}{\partial x} - F_{i,o} \cdot \frac{\partial q_B}{\partial x} \right) = 0$$

Für den Anlandungsfall gibt Hirano folgende Gleichung an:

$$\frac{\partial F_{i,a}}{\partial t} + \frac{1}{L_a} \cdot \left(\frac{\partial (p_i \cdot q_B)}{\partial x} - F_{i,a} \cdot \frac{\partial q_B}{\partial x} \right) = 0$$

Das Modell von Hirano ist jedoch nicht geeignet, um Dünenbildung an der Sohle zu beschreiben, hier tendiert es zur numerischen Instabilität. Deshalb führte Ribberink 1987 ein Zwei-Schichten Modell ein, bei dem er eine weitere Austauschschicht („Exchange Layer“) anordnete (Abb. 10).

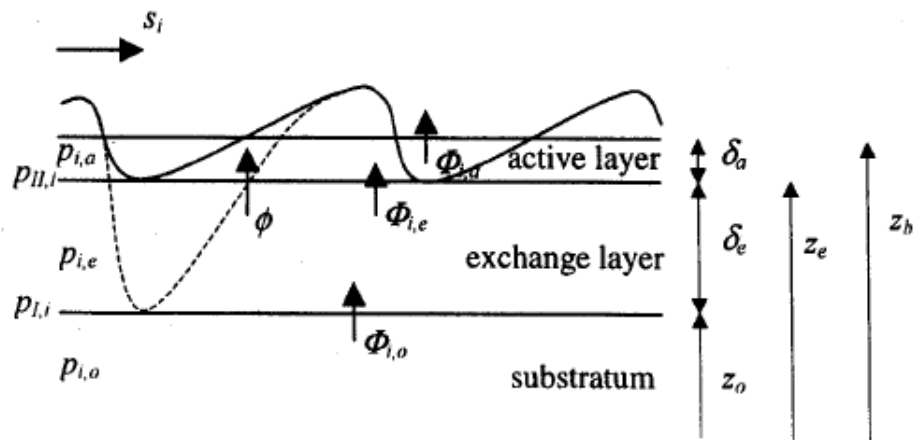


Abb. 10: Zwei-Schichten Modell von Ribberink (Kroekenstoel et al. 2003).

Im Gegensatz zu Hiranos Ansatz, kann mit diesem Modell auch ein vertikaler Sediment-austausch zwischen den Schichten stattfinden, ohne dass sich das Sohlniveau verändert. Solche Sortierprozesse spielen in der Natur eine wichtige Rolle.

Das Modellkonzept, das in BASEMENT zum Einsatz kommt, arbeitet allerdings mit nur einer Austauschschicht, darunter beginnt die Unterschicht, die in beliebig viele Lagen auch unterschiedlicher Zusammensetzung eingeteilt werden kann. Es handelt sich also um ein erweitertes Ein-Schicht-Modell.

3.3 Numerische Lösung

Da sowohl die Flachwassergleichungen, als auch die Sedimenttransportgleichung als Gleichungssystem mit nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen (PDG) vorliegen, ist eine eindeutige analytische Lösung nur unter Zuhilfenahme vereinfachter, idealisierter Annahmen möglich. Hierfür werden in der Praxis numerische Verfahren angewendet. Eine numerische Lösung ergibt sich durch Diskretisierung der Gleichungen. Das bedeutet, das Berechnungsgebiet wird in kleine Teilgebiete unterteilt in denen die PDG dann näherungsweise gelöst werden kann. Je feiner die Unterteilung des Berechnungsgebietes ist, desto geringer fallen die Fehlerungenauigkeiten in den Untergebieten ins Gewicht. Es gibt verschiedene Wege, um ein Rechenggebiet zu diskretisieren. Bekannte Verfahren sind beispielsweise:

- Finite Differenzen (FD)
- Finite Volumen (FV)
- Finite Elemente (FE)
- Charakteristische Methode (CM)

Oft sind bestimmte Diskretisierungsmethoden mit den Lösungsverfahren verknüpft. Bei der Diskretisierung wird gewöhnlich zwischen zeitlicher und räumlicher Diskretisierung unterschieden. Bei letzterer erfolgt die Unterteilung nach Art des Gitters. Es gibt orthogonale, krummlinige, strukturierte und unstrukturierte Gitterformen.

Während in FD-Methoden die partiellen Ableitungen der Gleichungen direkt über Taylorreihen genähert werden, was besonders für orthogonale, äquidistante Gitter geeignet ist, werden bei der FV-Methode die Gleichungen über ein bestimmtes Kontrollvolumen integriert. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass durch die Integration die Ableitungen in den Grundgleichungen wegfallen, wodurch die Lösung des Gleichungssystems vereinfacht wird (*Malcherek 2002*). Außerdem bietet die FV-Methode die Möglichkeit der freien Wahl der Zellformen, aus denen das Gitter besteht. Sie können z.B. dreiecksförmig sein, was die Abbildung komplexer Geometrien erheblich vereinfacht. Die FV-Methode ist also wesentlich flexibler als die der finiten Differenzen, deshalb kommt in BASEMENT dieses Verfahren zum Einsatz.

Der stabile Ablauf einer numerischen Berechnung kann durch eine Reihe von Parametern beeinflusst werden. Diese sind je nach Programm entweder intern festgelegt, oder – wie in BASEMENT – vom Anwender zu wählen. Die Variabilität solcher numerischer Parameter ermöglicht es, beim Auftreten von Instabilitäten in der Berechnung selbst nach einer Lösung zu suchen. Als Beispiel für ein solches numerisches Kriterium sei hier die CFL-Zahl genannt.

Die Courant-Friedrichs-Lewy Bedingung, oder kurz CFL-Zahl, ist die Stabilitätsbedingung für das numerische Verfahren. Sie lautet:

$$CFL = \frac{c \cdot \Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

Die CFL-Bedingung beschreibt das Verhältnis der physikalischen Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Lösungen der Differentialgleichung zur Informationsausbreitungsgeschwindigkeit $\Delta x/\Delta t$ des Algorithmus. Sie ist in BASEMENT vom Anwender vorzugeben und muss zwischen 0,5 und 1 liegen. Es wird empfohlen, die CFL in der Nähe von 1 zu wählen und im Falle von Stabilitätsproblemen zu reduzieren. Der Zeitschritt wird dann im Zuge der Berechnung programmintern ermittelt. Hier ist nur ein Initialwert zu Beginn der Simulation anzugeben (*VAW 2007*).

Bei der Berechnung von Sedimenttransport und Abfluss, zunächst in den einzelnen Querprofilen, dann an den Übergangsstellen zwischen den Querprofilen, hat das Programm zu Beginn ein Anfangswertproblem zu lösen. Dies geschieht durch die Vorgabe geeigneter Randbedingungen und eines Initialzustands. So kann beispielsweise von einem trockenen Gerinne zu Simulationsbeginn ausgegangen werden, oder es können Startwerte für den Abfluss und die zugehörigen Wasserspiegelhöhen bzw. die durchströmte Querschnittsfläche für die einzelnen Querprofile angegeben werden.

Die Lösung der Strömungsgleichungen erfolgt dann iterativ in mehreren Schritten, bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium, sei es die gewünschte Genauigkeit oder die maximale Anzahl von Iterationsschritten, erreicht worden ist. Um den Ablauf der Berechnungen zu beschleunigen, bietet BASEMENT die Option an, Zwischenwerte der hydraulischen Kenngrößen aus einer zu Beginn der Simulation angelegten Tabelle für jedes Querprofil zu interpolieren.

4. Dokumentation der durchgeführten Berechnungen

Zur Einarbeitung in die Thematik war es zunächst erforderlich, einige akademische Beispiele in BASEMENT zu bearbeiten, die mit geringem Aufwand überprüfbare Ergebnisse liefern sollten. Anhand dieser Beispiele sollte die Sensitivität von BASEMENT bezüglich der Eingabeparameter, Initial- und Randbedingungen näher untersucht werden. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse dienten als Grundlage für die anschließende Modellierung eines realen Szenarios. Außerdem sollten Unterschiede zwischen den Programmen BASEMENT und HEC-RAS bei der hydraulischen Berechnung aufgezeigt werden.

Wie die durchgeführten Berechnungen zeigten, enthielt die Originalversion BASEMENT V 1.3 noch eine Reihe von Fehlern und Bugs. Außerdem befindet sich das Programm noch in stetiger Überarbeitung von Seiten des Entwicklerteams in Zürich. Für die Bearbeitung dieser Diplomarbeit kamen daher mehrere Versionen von BASEMENT zum Einsatz, in denen einzelne Fehler korrigiert bzw. größere Änderungen vorgenommen worden waren. Um dem Leser eine Orientierung über den Entwicklungsstand zu geben, ist es notwendig die unterschiedlichen Versionen aufzuführen, die für die Bearbeitung der Beispiele verwendet wurden. Für eine Nachrechnung der Beispiele müssten diese Versionen benutzt werden, da die Ergebnisse sonst zum Teil stark abweichen. Die vorgenommenen Änderungen werden in die neue Version 1.4 eingehen, deren Veröffentlichungstermin allerdings noch nicht feststeht. Alle verwendeten Versionen (Tab. 6) befinden sich im Anhang der Arbeit auf einer CD.

BASEMENT Programmversion	Änderungen	Datum
V 1.1	Erste Veröffentlichung	06.10.2006
V 1.2	„Bugfix-Release“ mit 1D-Sedimenttransport	06.02.2007
V 1.3	Originalversion (OV 1.3)	23.04.2007
V 1.3.1	wie V 1.3; Randbedingung H-Q Datei korrigiert	18.12.2007
V 1.3.2	wie V 1.3; HEC-RAS Geometrieingabe korrigiert	16.07.2007
V 1.3.3	Basiert auf V 1.2; Kornzusammensetzung Active-Layer korrigiert (MPM-H), MPM falsch.	02.11.2007
V 1.3.4	wie V 1.3.3; Randbedingung H-Q Datei korrigiert	23.11.2007
V 1.3.5	Vorabversion zu V 1.4; Änderungen im Syntax des Command-File, noch nicht getestet	29.01.2008

Tab. 6: Verwendete Versionen des Programms BASEMENT.

4.1 Beispiel 1: Rechteckgerinne

Als erstes akademisches Beispiel wurde ein einfaches Rechteckgerinne mit konstanter Sohlneigung gewählt. Hier sollte zunächst die Normalwassertiefe für zwei verschiedene stationäre Abflüsse berechnet werden.

4.1.1 Geometrie

Der Rechteckquerschnitt besitzt eine Breite von zehn Metern und eine Höhe von fünf Metern. Das Gerinne wurde in acht identische Querprofile im Abstand von jeweils 100 Metern untergliedert, dabei wurde eine konstante Sohlneigung von einem Promille und ein konstanter Stricklerbeiwert von $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ für Sohle und Ränder des Gerinnes angenommen. Die Geometrie wurde sowohl im Format FLORIS als auch in HEC-RAS eingegeben, da das Beispiel mit beiden Programmen berechnet und der Geometrieimport von HEC-RAS Dateien in BASEMENT getestet werden sollte. Dabei waren die entsprechenden Anpassungen der HEC-RAS Geometriedatei, wie die Eingabe von Strickler- anstatt Manningwerten und die Änderung der Stationierungsrichtung, vorzunehmen (vgl. Kap. 2.1.3). Die Verwendung von HEC-RAS Geometriedateien funktionierte mit der BASEMENT Version 1.3 noch nicht fehlerfrei, die Probleme wurden aber in der Zwischenzeit behoben. Mit der korrigierten Fassung wurden mit BASEMENT in Beispiel 1 die gleichen Ergebnisse wie mit der FLORIS-Geometrie erzielt.

Für das Beispiel wurden zwei verschiedene stationäre Abflusssituationen definiert. Dabei wurde der Abfluss so gewählt, dass sich einmal eine Fließtiefe von ungefähr einem Viertel der Querschnittshöhe und einmal ein fast bordvoller Abfluss einstellte. Für den Rechteckquerschnitt war dies bei einem Abfluss Q von 15 bzw. 100 m^3/s der Fall.

Abbildung 11 zeigt das erste Querprofil des Rechteckgerinnes mit den berechneten Wasserspiegellagen für die beiden konstanten Abflusssituationen sowie die zugehörigen Energiehöhen. Jedes Querprofil wurde nur über die sechs eingezeichneten Eckpunkte beschrieben. Wird ein Abfluss angegeben, der das Fassungsvermögen des Querschnitts überschreitet, nimmt die Berechnung rechts- und linksseitig zwei senkrechte Wände an. Im Beispiel wäre dies bei den y -Koordinaten null und zwölf Meter der Fall, die horizontalen Vorländer würden überströmt werden.

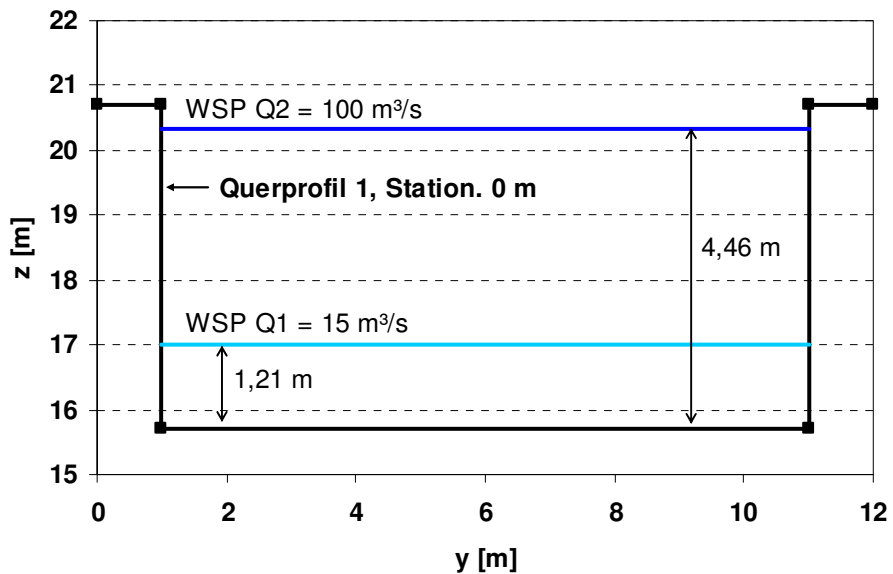


Abb. 11: Geometrie und gewählte Abflussverhältnisse für Beispiel 1, Querprofil 1.

4.1.2 Berechnungen

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die geometrische Situation und die berechneten hydraulischen Szenarien im Beispiel. Die korrekte Unterwasser-Randbedingung zur Berechnung von Normalwasserverhältnissen ist „*H-Q Relation*“, dabei ist die Sohlneigung im letzten Querprofil anzugeben. Dies geschieht entweder in der FLORIS-Topographiedatei oder in der BASEMENT *Command File* für HEC-RAS Geometriedateien.

Programmversion	Basement V 1.3.2
Geometrie	
Anzahl der Querprofile	8
Querschnittsbreite	10 m
Querschnittshöhe	5 m
Gesamtlänge der Simulationsstrecke	700 m
Sohlneigung	1,0 ‰
Stricklerbeiwert der Sohle	40 m ^{1/3} /s
Stricklerbeiwert der Ränder	40 m ^{1/3} /s
Hydraulische Randbedingungen	
Oberstrom	Konstanter Abfluss Q = 15 / 100 m ³ /s
Unterstrom	H-Q Relation
Initialbedingung	Dry / Backwater Calculation / Fileinput
Simulationsdauer	20000 s
Rechenzeit	2 s

Tab. 7: Übersicht der Eingabeparameter für Beispiel 1.

Die Berechnung mit HEC-RAS ergab eine Fließtiefe von 1,21 bzw. 4,46 Meter für die beiden Abflusssituationen (15 bzw. 100 m³/s). Fließtiefe und die übrigen hydraulischen Kenngrößen wie Fließgeschwindigkeit, durchströmte Querschnittsfläche, Froudezahl und Energiehöhe waren dabei in allen Querprofilen identisch, was angesichts des Berechnungsverfahrens und der gegebenen stationären Verhältnisse nachvollziehbar ist. HEC-RAS erfordert im Gegensatz zu BASEMENT für stationäre Berechnungen auch nicht die Vorgabe einer Simulationszeit. Die Berechnung endet mit der Lösung der Energiegleichung (vgl. Kap. 2.2).

Nun sollten die Normalwassertiefen mit dem Programm BASEMENT berechnet werden. Neben der Randbedingung „*H-Q Relation*“ und einer ausreichend großen Simulationsdauer (siehe „Stationäre Verhältnisse“, Seite 43) erfordert BASEMENT die Angabe eines Initialzustandes. Hier gibt es drei Möglichkeiten, die miteinander verglichen werden sollen.

Verschiedene Initialbedingungen

Zuerst wurde die Initialbedingung „*Dry*“ gewählt, die keine weiteren Parameter benötigt. Der Rechenlauf mit dieser Initialbedingung (trockenes Gerinne zu Simulationsbeginn) liefert eine Ergebnisdatei (*A(Q)* für jedes Querprofil), mit der ein weiterer Rechenlauf gestartet werden kann. Diese Initialbedingung heißt „*Fileinput*“. Daneben wurde das Beispiel mit der dritten möglichen Initialbedingung „*Backwater Calculation*“ berechnet. Hier wurde ein beliebig gewählter Initialwasserspiegel und der entsprechende Abfluss für das letzte Querprofil vorgegeben. Abbildung 12 zeigt die mit BASEMENT unter verschiedenen Initialbedingungen berechneten Wasserspiegellagen für den konstanten Abfluss $Q_I = 15 \text{ m}^3/\text{s}$.

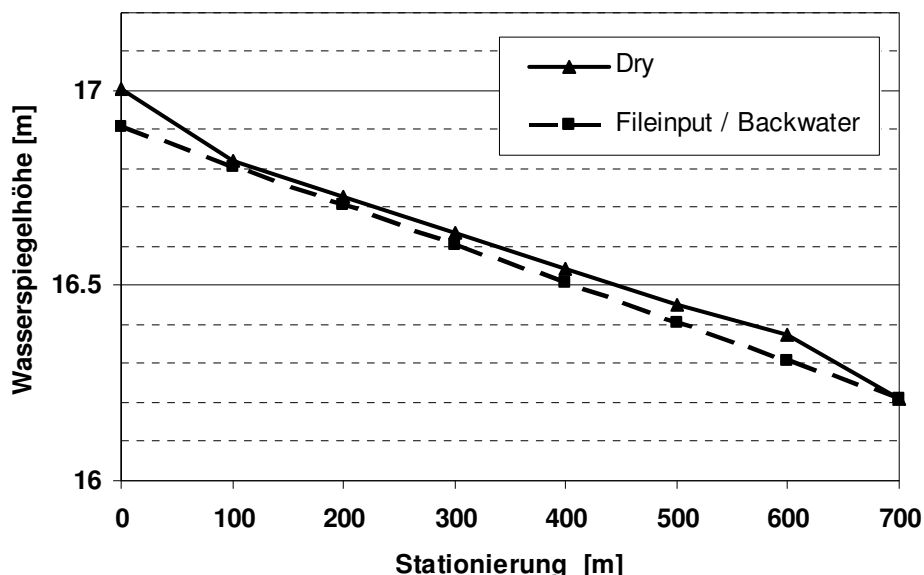


Abb. 12: Mit verschiedenen Initialbedingungen berechneter Wasserspiegel bei $Q_I = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ nach einer Simulationsdauer von 20000 Sekunden.

Die Initialbedingungen „*Fileinput*“ und „*Backwater Calculation*“ führten zu identischen Ergebnissen, die mit denen von HEC-RAS übereinstimmten, während sich mit „*Dry*“ eine deutliche Abweichung von bis zu zehn Zentimetern ergab. Nur im letzten Querprofil stimmte die Fließtiefe für alle drei Startbedingungen mit der auch in HEC-RAS berechneten von 1,21

Meter überein. Dies ist damit zu begründen, dass in diesem Querprofil die Normalwassertiefe durch die Unterwasser-Randbedingung vorgegeben wurde.

Mit der Initialbedingung „Dry“ wird selbst bei sehr langer Simulationsdauer (es wurde bis zu zwei Millionen Sekunden gerechnet) keine konstante Fließtiefe in allen Querprofilen der Strecke erreicht, vielmehr bleibt die Abweichung des Wasserspiegels in vollem Umfang erhalten. Es stellt sich bereits nach relativ kurzer Rechenzeit von etwa 3000 Sekunden ein stationärer Zustand ein. Die Ergebnisse in den Querprofilen verändern sich danach nicht mehr (siehe Abb. 13). Die Initialbedingung sollte daher nur für die Erzeugung einer Startdatei für die Option „Fileinput“ verwendet werden.

Die Initialbedingungen „Backwater Calculation“ und „Fileinput“ sind gleichwertig, was die berechneten Ergebnisse betrifft. Sie unterscheiden sich nur durch ihre Einsatzbereiche. Für konstante Abflüsse spart man mit der Initialbedingung *Backwater* einen Rechenlauf, da keine Startdatei erzeugt werden muss. Dafür ist sie für instationäre Berechnungen ungeeignet, da im letzten Querprofil ein konstanter Abfluss vorgegeben werden muss.

Was die Vorgabe eines Initialwasserspiegels betrifft, ist die Initialbedingung *Backwater* unempfindlich auch gegenüber unrealistischen Eingaben, beispielsweise einem Wasserspiegel unter Sohl- oder über Dammniveau. Solche Werte werden automatisch korrigiert. Ist der Startwert weit von der tatsächlichen Fließtiefe entfernt, benötigt die Simulation zusätzliche Zeitschritte, bis sich stationäre Verhältnisse einstellen.

Stationäre Verhältnisse

Bis sich (für konstant vorgegebene Abflüsse) stationäre Verhältnisse einstellen, benötigt die Simulation in BASEMENT einen gewissen Zeitraum. Dieser variiert je nach verwendeter Initialbedingung. Deshalb wurde für dieses Beispiel ($Q_I = 15 \text{ m}^3/\text{s}$, konstant) die zeitliche Entwicklung der Wasserspiegellagen genauer untersucht. Abbildung 13 zeigt den Verlauf in Querprofil 4, bei einer Stationierung von 300 Metern (von der Oberstromseite).

Die Sohle befindet sich in diesem Querprofil auf einer Höhe von 15,4 Metern, die Normalwassertiefe beträgt 1,21 Meter, sodass sich eine Wasserspiegelhöhenkote von 16,61 Metern ergibt. Allerdings liefert die Initialbedingung „Dry“ in Querprofil 4 eine abweichende Fließtiefe von 1,23 Meter (vgl. Abb. 12), was in der Abbildung 13 auf Grund der Skalierung nicht sichtbar ist. Für die Initialbedingung „Backwater Calculation“ wurden verschiedene Initial-Wasserspiegel im letzten Querprofil (Nr. 8, Stationierung 700) probiert. So wurde die Simulation mit einem Wasserspiegel auf Höhenkote 18, 17, 16 und 16,21 Meter begonnen, wobei der letzte Wert bereits der richtigen Normalwassertiefe entspricht (Abweichung im Millimeter-Bereich). Für die Initialbedingung „Fileinput“ wurde die Ergebnisdatei des Rechenlaufs „Dry“ verwendet. Die Ergebnisse wurden jeweils in Intervallen von zehn Sekunden ausgegeben. Als stationärer Zustand wurde der Zeitpunkt definiert, zu dem sich die berechnete Fließtiefe im Millimeterbereich nicht mehr ändert. Dieser lag bei minimal 288 und maximal 2477 Sekunden Simulationszeit. Abbildung 14 zeigt die Zeiten für die verschiedenen Initialzustände.

Gerechnet wurden jeweils 20000 Sekunden. Die gewählte Simulationsdauer war folglich ausreichend groß, um einen stationären Zustand der berechneten Fließtiefen zu erreichen. Dass dieser mit der Initialbedingung „Dry“ nicht in allen Querprofilen der Normalwassertiefe entspricht, liegt nicht an einer zu kurzen Berechnungsdauer, sondern an der Berechnungsweise von BASEMENT.

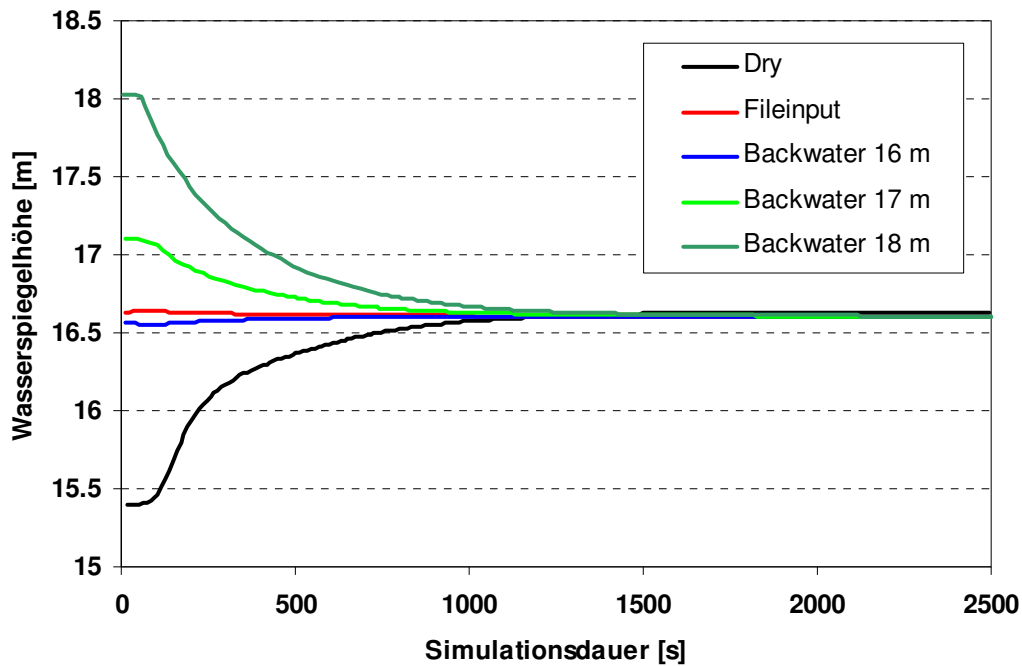


Abb. 13: Zeitliche Entwicklung der Wasserspiegellage in Querprofil 4 für unterschiedliche Initialbedingungen.

Die zeitliche Entwicklung des Wasserspiegels (Abb. 13) sieht in allen Querprofilen qualitativ gleich aus. Es unterschieden sich nur die Zeiträume (Abb. 14) und absoluten Höhen je nach Lage des jeweiligen Querprofils. So benötigt die Initialbedingung „Dry“ im letzten Querprofil (Nr. 8, Station 700) etwas mehr Simulationszeit (3257 sec) bis zum Erreichen eines stationären Zustands, während die anderen Initialbedingungen vergleichbare Zeitspannen ergeben. Die entsprechenden Diagramme für Querprofil 8 sind im Anhang A.1 dargestellt.

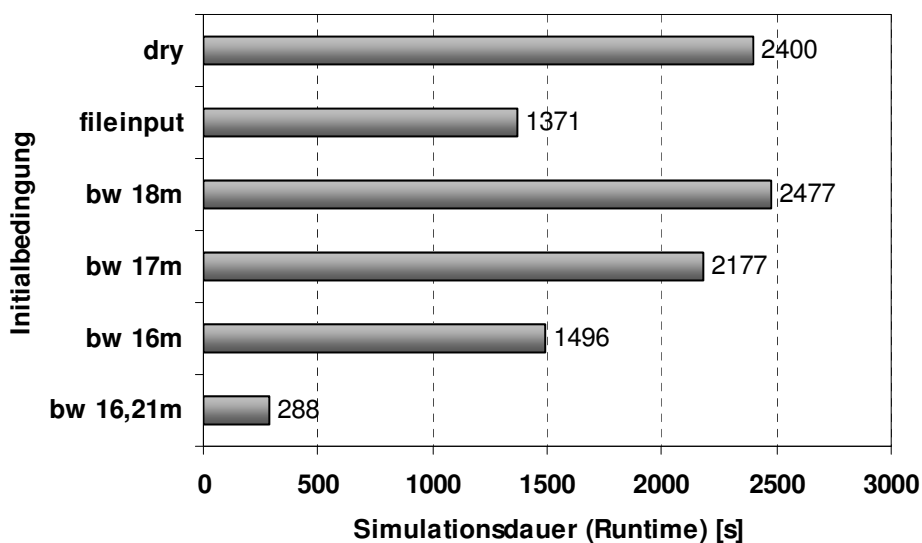


Abb. 14: Erforderliche Simulationsdauer bis zum Erreichen stationärer Verhältnisse in Beispiel 1 für verschiedene Initialbedingungen, $Q_1 = 15\text{m}^3/\text{s}$.

Randbedingung Zero-Gradient

Als nächstes Beispiel wurde die Unterstrom-Randbedingung „*H-Q Relation*“ durch „*Zero-Gradient*“ (siehe Kap. 2.1.4, Seite 13) ersetzt, um die Auswirkungen einer veränderten (ungenauen) Randbedingung zu untersuchen. Die übrigen Simulationsparameter wurden beibehalten. Es wurde mit allen drei Initialbedingungen gerechnet. Tabelle 8 stellt die so erzielten Ergebnisse den mit der Randbedingung Normalwassertiefe berechneten gegenüber. Mit der Randbedingung „*Zero-Gradient*“ sinkt der Wasserspiegel im Verlauf der Strecke ab, die Fließgeschwindigkeit nimmt zu. Der numerisch berechnete Abfluss nimmt von anfangs 14,96 m³/s auf 14,78 m³/s im letzten Querprofil ab. Es wird zwar ein stationärer Zustand erreicht, d.h. die Ergebnisse ändern sich bei längerer Simulationsdauer nicht mehr, der Zustand entspricht jedoch nicht der Normalwassertiefe. Die Randbedingung ist folglich für diese Fragestellung ungeeignet.

Berechnete Fließtiefen für unterschiedliche Rand- und Initialbedingungen						
Beispiel 1: Rechteckquerschnitt, Q = 15m ³ /s						
	RB: Zerogradient			RB: HQ Relation		HEC-RAS
	Initialbedingungen					[m]
Stat.	dry	fileinput	backwater	dry	fileinput	(NWT)
0	1.537	1.193	1.193	1.303	1.207	1.21
100	1.491	1.190	1.190	1.222	1.207	1.21
200	1.592	1.186	1.186	1.229	1.207	1.21
300	1.614	1.181	1.181	1.234	1.207	1.21
400	1.714	1.174	1.174	1.245	1.207	1.21
500	1.753	1.165	1.165	1.252	1.207	1.21
600	1.857	1.153	1.153	1.276	1.207	1.21
700	1.887	1.139	1.139	1.208	1.208	1.21

Tab. 8: Vergleich der mit Unterstrom-Randbedingung Zero-Gradient und H-Q Relation berechneten Fließtiefen.

Berechnungsmodus

Bisher wurden alle Berechnungen mit dem Modus „*Table*“ durchgeführt. Die hydraulischen Daten wurden dabei aus einer Tabelle interpoliert. Dafür wurde eine maximal bzw. minimal zulässige Wasserspiegeldifferenz von 0,2 bzw. 0,05 Metern zwischen den einzelnen Tabellenwerten vorgegeben. Diese Intervallbreiten wurden aus den BASEMENT-Tutorials übernommen. Die berechnete Normalwassertiefe im letzten Querprofil (1,208 m, siehe Tabelle 8, Randbedingung *H-Q Relation*, Initialbedingung *Fileinput*) weicht hier um einen Millimeter von den übrigen Querprofilen ab (1,207 m). Dieser Unterschied ist auf Rundungsfehler bei der Interpolation zurückzuführen. Durch die Wahl etwas kleinerer Tabellenintervalle (z.B. 0,1 und 0,01 m) verschwindet die Abweichung und man erhält eine konstante Fließtiefe von 1,208 Meter in allen Querprofilen. Zum gleichen Ergebnis führte auch der alternativ zu „*Table*“ wählbare Iterationsmodus. Die höhere Genauigkeit machte sich bei diesem einfachen Beispiel in den Rechenzeiten nicht bemerkbar. Diese lagen bei etwa zwei Sekunden. Unter praktischen Gesichtspunkten ist eine Abweichung dieser Größenordnung aber vernachlässigbar, da der Wasserspiegel eines Fließgewässers niemals vollkommen glatt ist. Das Programm HEC-RAS rundet die Fließtiefe daher auf ganze Zentimeter.

Berechnungszeitschritte

Um den Einfluss der numerischen Parameter, die in BASEMENT zu wählen sind, zu untersuchen, wurde der Initialzeitschritt für die Simulation von 0,01 bis 1000 Sekunden variiert. Dabei waren mit der Programmversion 1.3 alle Rechenläufe stabil und lieferten identische Ergebnisse (in den älteren BASEMENT Versionen 1.1 und 1.2 führte ein zu kleiner Zeitschritt zu Programmabstürzen). Der Initialzeitschritt gibt den ersten Simulationszeitschritt vor. Die weiteren Zeitschritte ergeben sich aus dem programminternen Berechnungsablauf. Ihre Größe ist variabel und passt sich an die Berechnungssituation an. Unter stationären Abflussbedingungen ergibt sich ein konstanter Zeitschritt, sobald sich die berechneten Ergebnisse nicht mehr ändern (vgl. Abb. 13). Bei instationären Berechnungen wird der Zeitschritt umso kleiner, je schneller sich die Abflussverhältnisse verändern (z.B. bei einer Hochwasserwelle). Abbildung 15 zeigt den Zusammenhang zwischen gewählter CFL-Zahl (vgl. Seite 47 und Kap. 3.3), dem Initialzeitschritt und dem Berechnungszeitschritt (*Timestep*) unter stationären Abflussverhältnissen.

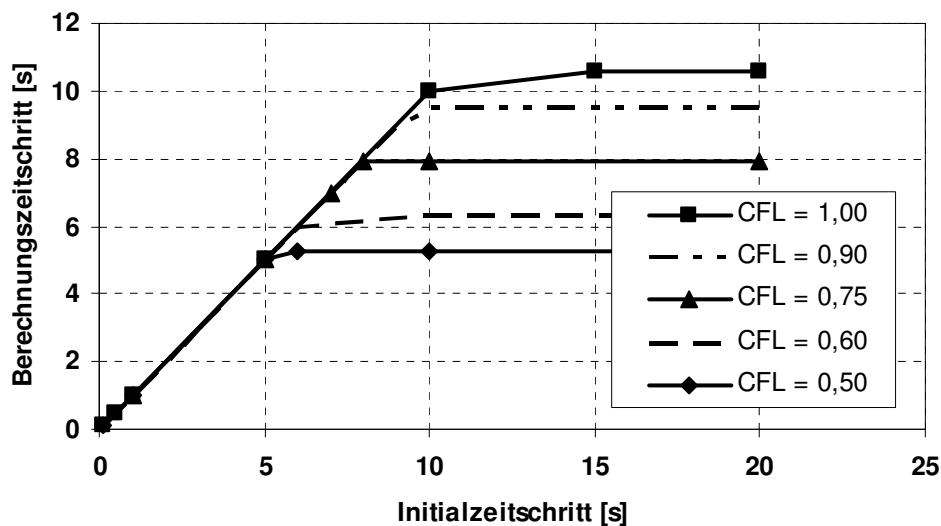


Abb. 15: Simulationszeitschritte in Abhängigkeit vom gewählten Initialzeitschritt und der CFL-Zahl.

Der größtmögliche Berechnungszeitschritt ist von der gewählten CFL-Zahl abhängig. Der gewählte Initialzeitschritt begrenzt die Größe des Berechnungszeitschritts nach oben hin. Ein zu kleiner Initialzeitschritt wirkt sich negativ auf die Rechenzeit aus. So resultiert beispielsweise die Verwendung eines (extrem kleinen) Initialzeitschritts von 0,1 Sekunden in der zehnfachen Rechenzeit im Vergleich zu einer Sekunde. Der größte Berechnungszeitschritt in diesem Beispiel lag bei 10,58 Sekunden für eine CFL-Zahl von eins. Mit einem Initialzeitschritt von zehn Sekunden liegen auch alle Berechnungszeitschritte bei exakt zehn Sekunden.

Da der Initialzeitschritt nur programmintern für den numerischen Ablauf der Simulation von Interesse ist und sich keine Auswirkungen auf das berechnete Ergebnis feststellen ließen, wurde für alle weiteren Berechnungen ein Zeitschritt von 30 Sekunden gewählt.

Die CFL-Zahl

Die CFL-Zahl (Kap. 3.3) steuert die Geschwindigkeit, mit der sich der numerische Algorithmus der Lösung annähert. Sie ist in einem Bereich von 0,5 bis 1 zu wählen, ungültige Eingaben führen in BASEMENT Version 1.3 zu einer Fehlermeldung. Je größer die CFL-Zahl gewählt wird, desto größer wird der sich einstellende Berechnungszeitschritt. Abbildung 16 veranschaulicht den linearen Zusammenhang zwischen beiden Größen. Eine kleinere CFL-Zahl führt zu kleineren Zeitschritten, womit der Simulationsablauf in manchen Fällen stabilisiert werden kann. Damit werden aber auch längere Rechenzeiten in Kauf genommen. Die Variation der CFL-Zahl führte bei stabilen Rechenläufen zu keinen Ergebnisänderungen. Für alle folgenden Berechnungen wurde daher eine CFL-Zahl von eins verwendet.

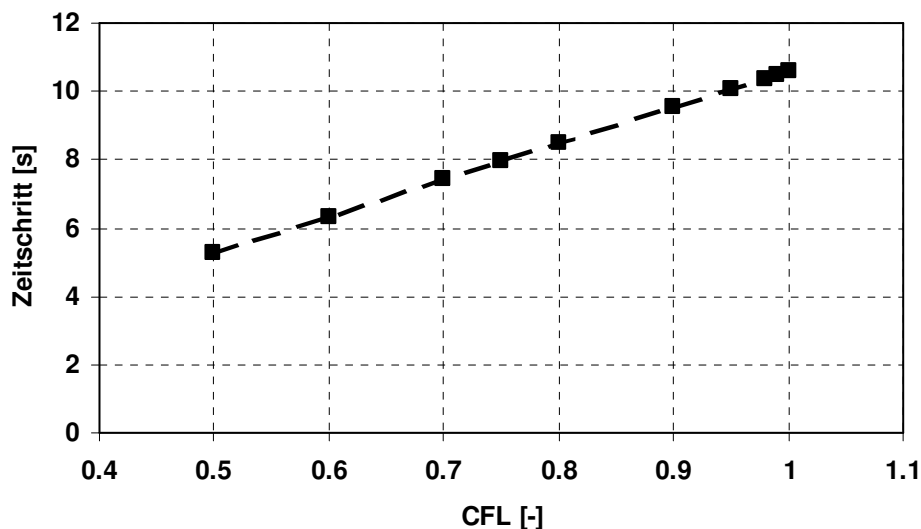


Abb. 16: Linearer Zusammenhang zwischen CFL-Zahl und dem sich einstellenden Berechnungszeitschritt.

Am Ende des Eingabeblocks ist noch die minimale Fließtiefe in einer Berechnungszelle zu wählen, bei deren Unterschreitung die Zelle als trocken betrachtet wird. Der standardmäßig verwendete Wert von 0,0001 Meter aus den Tutorials ist hier sicher ausreichend genau. Für Beispiel 1 wurde sogar mit Werten bis zu 0,15 Meter das gleiche Ergebnis erzielt.

4.1.3 Fazit

Will man als Unterstrom-Randbedingung Normalwasserverhältnisse oder eine abflussabhängige Fließtiefe $H(Q)$ vorgeben, wie es für die meisten praktischen Fragestellungen der Fall sein wird, ist „*H-Q Relation*“ die geeignete Randbedingung. Die Randbedingung „*Zero-Gradient*“ führt zu einem abfallenden Wasserspiegel und niedrigeren Fließtiefen und ist daher ungeeignet. Die Wahl einer korrekten Unterstrom-Randbedingung ist maßgebend für die Qualität der Ergebnisse.

Die Initialbedingung „*Dry*“ ist nur zur Erzeugung einer Initialdatei für den nächsten Rechenlauf mit der Initialbedingung „*Fileinput*“ vorgesehen. Es stellen sich hier unabhängig von der Simulationsdauer keine konstanten Normalwasserverhältnisse ein, sondern die Fließtiefe schwankt in den unterschiedlichen Querprofilen. Die Initialbedingung „*Backwater*“

Calculation“ spart einen Rechenlauf, ist aber nur für konstante Abflusssituationen brauchbar. Die vorgegebene Wasserspiegelhöhe im letzten Querprofil dient nur als Startwert für die Berechnung und hat keine Auswirkung auf das Ergebnis. Die Simulationsdauer sollte jedoch ausreichend groß gewählt werden, damit sich ein stationärer Zustand einstellen kann. Hierfür wurden im Beispiel bis zu 3300 Sekunden benötigt. Bei längeren Simulationsstrecken und variabler Querprofilgeometrie sollte deutlich länger gerechnet werden. Angesichts der kurzen Rechenzeiten für 1D-Modelle ohne Geschiebetransport stellt diese Vorgehensweise keine Einschränkung der Arbeitsgeschwindigkeit dar.

Der Berechnungsmodus *„Table“*, bei dem die hydraulischen Kenngrößen aus einer Tabelle interpoliert werden, ist dem Iterationsmodus in den meisten Fällen ebenbürtig. Die Intervalle sollten jedoch ausreichend klein gewählt werden.

Die numerischen Parameter beeinflussen die Ergebnisse nicht, können aber zu längeren Rechenzeiten führen. Es empfiehlt sich hier, die Defaultwerte beizubehalten und nur im Fall von instabilen Rechenläufen davon abzurücken. Als Standardwerte können eine CFL-Zahl von 1, ein Initialzeitschritt von 30 Sekunden sowie eine minimale Wassertiefe von 0,0001 Meter angesetzt werden.

4.2 Beispiel 2: Trapezquerschnitt mit Vorland

Beispiel 1 diente auf Grund seiner einfachen Geometrie dazu, sich zunächst einmal mit den grundlegenden Funktionen und Eingabeparametern von BASEMENT vertraut zu machen und einen ersten Eindruck zu erhalten, welche Parameter mehr oder weniger starke Auswirkungen auf die Ergebnisse einer numerischen Simulation haben. Der praktische Einsatz eines Rechenprogramms erfordert jedoch weitreichendere Erkenntnisse, deswegen wurde im zweiten Beispiel mit einer etwas komplexeren Geometrie gearbeitet, die Bereiche unterschiedlicher Rauigkeit aufweist. Erstes Ziel sollte wieder die Berechnung der Normalwassertiefe für zwei aussagekräftige Szenarien sein, dabei wurde das Beispiel wieder parallel in HEC-RAS eingegeben und berechnet, um die Ergebnisse vergleichen zu können.

4.2.1 Geometrie

Für Beispiel 2 wurde ein symmetrischer Trapezquerschnitt mit Vorländern auf beiden Uferseiten verwendet. Bei einer konstanten Sohlneigung von einem Promille wurden zehn geometrisch identische Querprofile erstellt und wieder im Abstand von jeweils 100 Metern angeordnet. Der Querschnitt wurde in zwei Bereiche unterschiedlicher Rauigkeit, Hauptkanal und Vorländer, unterteilt. Werden die topographischen Daten im Format FLORIS eingegeben, ist noch eine weitere Unterteilung des Hauptkanals in (bewegliche) Sohle und Wände möglich. Darauf wurde aber verzichtet, da HEC-RAS diese Unterteilung nicht anbietet. Für Hauptgerinne und Vorländer wurden zwei verschiedene Stricklerwerte, nämlich $33,33$ und $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, verwendet. Der ungerade Wert von $33,33 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ergibt sich aus dem Kehrwert des in HEC-RAS verwendeten Manningwertes von $0,03$. In HEC-RAS wurden also die Werte $0,03$ und $0,04 \text{ s}/\text{m}^{1/3}$ eingegeben.

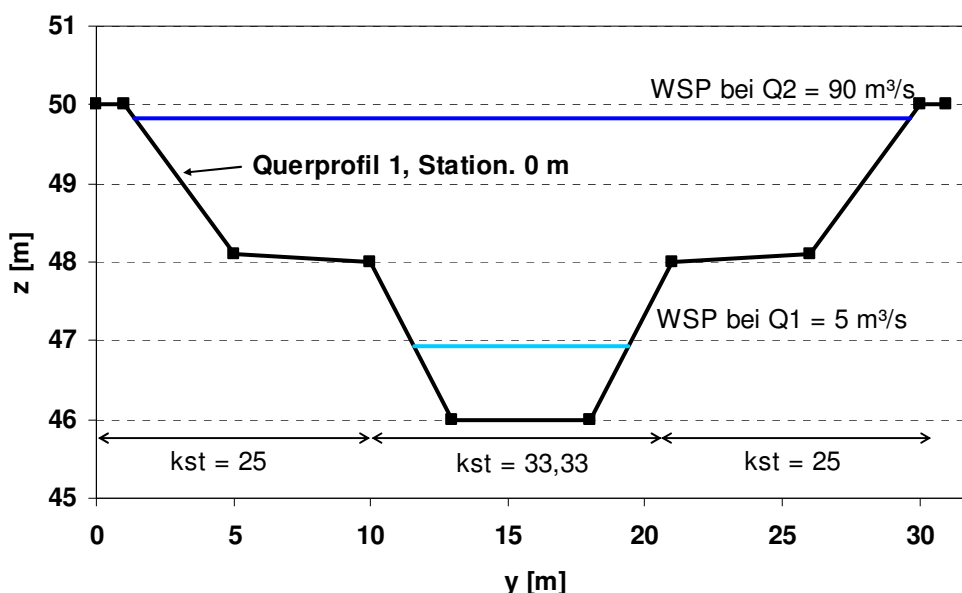


Abb. 17: Mit BASEMENT berechnete Wasserspiegellagen für beide Abflusssituationen.

Abbildung 17 zeigt die Geometrie des Beispielquerschnitts. Die Punkte mit der y-Koordinate 10 bzw. 21 markieren den Übergang zwischen Hauptgerinne und Vorland. Alle eingegebenen Querprofilpunkte sind in der Abbildung markiert.

4.2.2 Stationäre Berechnungen

Tabelle 9 stellt die Simulationseingangsdaten noch einmal zusammen. Nachdem alle erforderlichen Dateien erstellt waren, wurde wieder die Normalwassertiefe für zwei unterschiedliche, konstante Abflussereignisse berechnet.

Programmversion	Basement V. 1.3.2
Geometrie	
Anzahl der Querprofile	10
Maximale Querschnittsbreite	29,0 m
Minimale Querschnittsbreite	5,0 m
Querschnittshöhe	4,0 m
Gesamtlänge der Simulationsstrecke	900 m
Sohlneigung	1,0 ‰
Stricklerbeiwert des Hauptkanals	33,33 m ^{1/3} /s
Stricklerbeiwert der Vorländer	25 m ^{1/3} /s
Hydraulische Randbedingungen	
Oberstrom	Q = 5 / 90 m ³ /s (konstant)
Unterstrom	H-Q Relation (Normalwassertiefe)
Initialbedingung	Backwater Calculation / Fileinput
Simulationsdauer	50000 s
Rechenzeit	2 s

Tab. 9: Übersicht der Eingabeparameter für Beispiel 2.

Es wurden die Abflüsse $Q_1 = 5 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_2 = 90 \text{ m}^3/\text{s}$ gewählt. Bei Q_1 liegt der Wasserspiegel innerhalb des Hauptkanals, bei Q_2 ist der Querschnitt fast bordvoll gefüllt, sodass der Einfluss der unterschiedlichen Rauheit der Vorländer zum Tragen kommt. Während die mit BASEMENT und HEC-RAS berechneten Wasserspiegellagen im ersten Fall übereinstimmten, zeigte sich im zweiten Fall eine große Abweichung zwischen den Ergebnissen beider Programme.

Beispiel 2: Trapezquerschnitt mit Vorland								Vergleich der berechneten Fließtiefen	
Initialbedingung: Fileinput									
Total Run Time: 50000s									
section	distance	zbed	z	eline	A	Q	u	Basement	HecRas
CS1	0	46	49.837	49.95	60.4286	90	1.48936	3.837	3.64
CS2	100	45.9	49.735	49.848	60.3752	90	1.49068	3.835	3.64
CS3	200	45.8	49.633	49.747	60.3218	90	1.492	3.833	3.64
CS4	300	45.7	49.531	49.645	60.2663	90	1.49337	3.831	3.64
CS5	400	45.6	49.429	49.543	60.2041	90	1.49491	3.829	3.64
CS6	500	45.5	49.327	49.441	60.1343	90	1.49665	3.827	3.64
CS7	600	45.4	49.224	49.338	60.0594	90	1.49852	3.824	3.64
CS8	700	45.3	49.12	49.235	59.9774	90	1.50057	3.82	3.64
CS9	800	45.2	49.011	49.127	59.708	90	1.50734	3.811	3.64
CS10	900	45.1	48.949	49.06	60.7713	90	1.48096	3.849	3.64

Tab. 10: Abweichung zwischen BASEMENT und HEC-RAS bei $Q_2 = 90 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 dargestellt. Neben der Sohlage z_{bed} , dem Wasserspiegel z und der Energiehöhe (jeweils in Meter), ist hier auch die durchströmte Querschnittsfläche A (in m^2) und die Fließgeschwindigkeit u (in m/s) angegeben. HEC-RAS berechnete eine

konstante Fließtiefe von 3,64 Metern in allen Querprofilen, die BASEMENT Ergebnisse lagen zwischen 3,81 und 3,85 Metern.

Beide Programme berechnen die Fließtiefe bei zusammengesetzten Querschnitten über den hydraulischen Radius. Dabei werden Bereiche unterschiedlicher Rauheit über Trennflächen voneinander getrennt. Bei der Berechnung des hydraulischen Radius werden von den Programmen jedoch zwei unterschiedliche Annahmen getroffen. HEC-RAS rechnet die Länge der Trennlinie zwischen Hauptgerinne und Vorland zum hydraulischen Radius des Vorlandes, während BASEMENT von der gegenteiligen Annahme ausgeht und die Trennfläche zum Hauptgerinne zählt. Überprüft man beide Ergebnisse mittels einer wasserwirtschaftlichen Gebrauchsformel zur Abflussberechnung in gegliederten Querschnitten, bestätigt sich die Abweichung um 20 Zentimeter je nach gewählter Trennflächenannahme (Berechnung befindet sich im Anhang A.2).

Da es sich hierbei um ein Näherungsverfahren handelt und die Übergänge von einem Bereich zum anderen in der Natur nicht auf einen bestimmten Punkt fixiert sind, sind beide Annahmen zulässig. BASEMENT berechnet hier den auf der sicheren Seite liegenden, höheren Wasserstand als HEC-RAS. Die Abweichung zwischen den berechneten Fließtiefen fällt in diesem Beispiel auf Grund der gewählten Geometrie des Querschnitts sehr groß aus. In anderen Fällen, beispielsweise bei einem sehr breiten Hauptkanal und kürzeren Vorländern, kann der Unterschied auch sehr gering sein. Damit ist allerdings auch die Ergebniskontrolle durch das jeweils andere Programm erschwert.

Ursache der Abweichung der BASEMENT Fließtiefen

Um die Ursache der Abweichungen innerhalb der mit BASEMENT berechneten Fließtiefen zu untersuchen, wurde die Geometrie des Beispiels verfeinert. Es wurden zusätzliche Querprofile angeordnet, sodass der Abstand zwischen den Profilen auf 50 Meter halbiert wurde. Die Änderung zeigte aber für beide Abflusssituationen nur geringfügige Auswirkungen. Deshalb wurden die Präzisionseinstellungen für die Berechnung verfeinert.

Abbildung 18 gibt einen Überblick der berechneten Fließtiefen für einen konstanten Abfluss von $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Abweichungen der BASEMENT-Ergebnisse liegen hier innerhalb der Rundungsgenauigkeit von HEC-RAS. Durch eine leichte Erhöhung der Präzisionsparameter (*Table-Intervalle*) um den Faktor 10 stimmen die Werte bis zur Stationierung 500 Meter mit den HEC Ergebnissen überein, danach beträgt die maximale Abweichung zwei Millimeter. Die Rechenzeit erhöhte sich durch die Änderungen bei diesem Beispiel nicht merklich.

Für den Abfluss von $90 \text{ m}^3/\text{s}$ brachten dieselben Änderungen dagegen keine Verbesserung der Abweichungen, wie Abbildung 19 zeigt. Hier erhöhte sich jedoch die Rechenzeit bereits durch die zusätzlichen Querprofile von etwa zwei auf acht Sekunden. Das Beispiel wurde nocheinmal mit sehr kleinen *Table-Intervallen* berechnet. Dabei wurden alle Genauigkeitsparameter, wie die zulässige Anzahl der Iterationsschritte und die minimale Wassertiefe, sehr hoch gewählt, was in einer Rechenzeit von gut vier Minuten für das Erstellen der Tabelle resultierte. Die Tendenz eines fallenden Wasserspiegels blieb aber auch hier erhalten. Gleiches gilt für den Iterationsmodus. Eine deutliche Verlängerung der Simulationsdauer (es wurde bis zu fünf Millionen Sekunden gerechnet) verbesserte die Ergebnisse ebenfalls nicht.

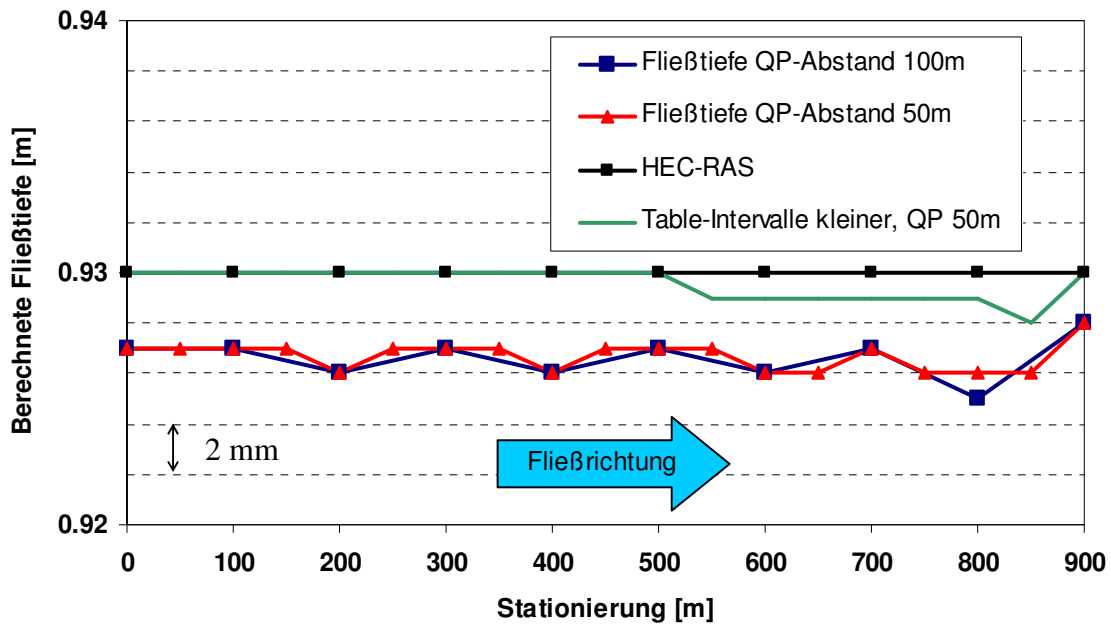


Abb. 18: Abweichung der Ergebnisse bei $Q_1 = 5 \text{ m}^3/\text{s}$ im Millimeterbereich.

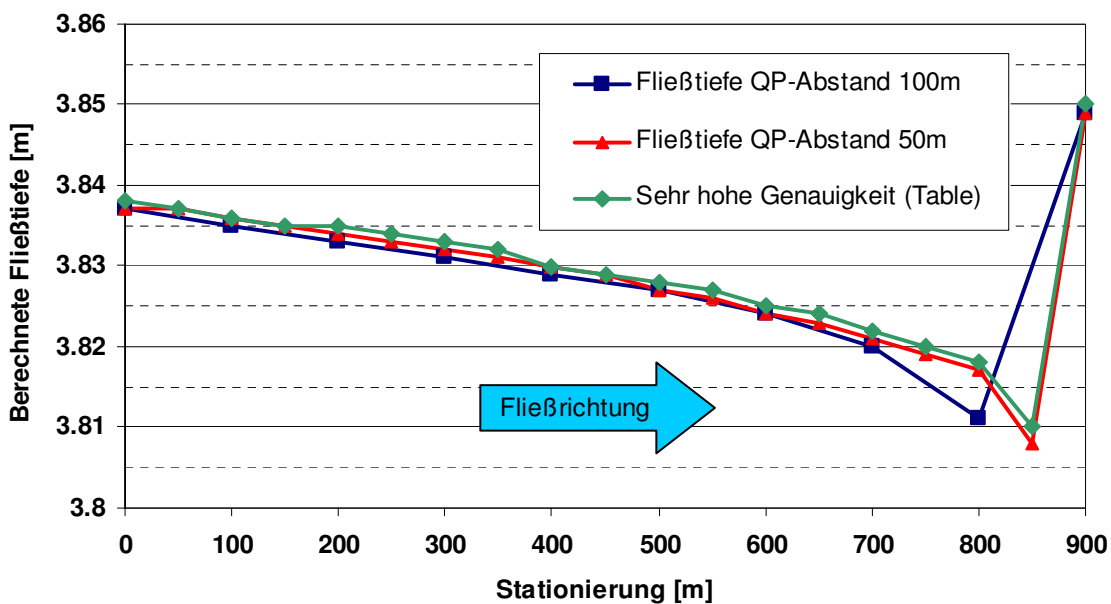


Abb. 19: Mit BASEMENT berechnete Fließtiefen für $Q_2 = 90 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die Initialbedingungen „Backwater Calculation“ und „Fileinput“ sind gleichwertig und liefern identische Ergebnisse. Auch mehrere Rechenläufe mit der Initialbedingung „Fileinput“, wobei die Ergebnisdatei jeweils als neue Initialdatei für den nächsten Rechenlauf verwendet wurde, änderten die Ergebnisse nicht. Es genügt also ein Rechenlauf mit dieser Initialbedingung bzw. der „Backwater Calculation“.

Die berechneten Fließgeschwindigkeit nahmen bis zum vorletzten Querprofil stets leicht zu und demzufolge sank der Wasserspiegel. Im letzten Querprofil, wo die Randbedingung Normalwassertiefe vorgegeben wurde, hat man plötzlich einen Sprung im Wasserspiegel und die niedrigste Fließgeschwindigkeit u (in m/s, vgl. Tab. 10).

Die Ursache für solche, für praktische Anforderungen sicherlich hinnehmbaren, Abweichungen scheint in der numerischen Berechnungsweise von BASEMENT, dem Finite Volumen Verfahren, begründet sein. Während HEC-RAS die Fließtiefe in jedem Querprofil aus der Energiegleichung berechnet und somit bei identischen Geometrien auch überall zum gleichen Ergebnis kommt, rechnet BASEMENT von einem Querprofil zum nächsten. Dadurch werden Abweichungen durch Rundungsfehler und Ähnliches weitergetragen.

Berechnung mit einem einheitlichen Stricklerwert

Um weitere Unterschiede in der Berechnungsweise beider Programme beurteilen zu können, wurde das Beispiel mit einer einheitlichen Rauigkeit von $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ im gesamten Querschnitt nachgerechnet. Sonst wurde das Beispiel nicht verändert, die definierten Übergangspunkte zwischen Vorland und Hauptgerinne wurden beibehalten. Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse dieses Rechenlaufs.

Beispiel 2: Trapezquerschnitt mit Vorland								Vergleich der berechneten Fließtiefen	
Initialbedingung: Backwater, Iteration, ein kst = 40									
Total Run Time: 50000s								Basement	HecRas
section	distance	zbed	z	eline	A	Q	u		
CS1	0	46	49.433	49.602	49.321	90	1.82478	3.433	3.3
CS2	100	45.9	49.331	49.501	49.2913	90	1.82588	3.431	3.3
CS3	200	45.8	49.23	49.4	49.248	90	1.82748	3.43	3.3
CS4	300	45.7	49.128	49.298	49.1975	90	1.82936	3.428	3.3
CS5	400	45.6	49.026	49.197	49.1386	90	1.83156	3.426	3.3
CS6	500	45.5	48.923	49.095	49.0698	90	1.83412	3.423	3.3
CS7	600	45.4	48.82	48.992	48.9896	90	1.83713	3.42	3.3
CS8	700	45.3	48.717	48.889	48.8974	90	1.84059	3.417	3.3
CS9	800	45.2	48.608	48.782	48.673	90	1.84908	3.408	3.3
CS10	900	45.1	48.541	48.71	49.5578	90	1.81606	3.441	3.3

Tab. 11: Berechnung mit einem einheitlichen Stricklerbeiwert von $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Es ergab sich wieder eine deutliche Abweichung von ungefähr 13 Zentimetern zwischen den von beiden Programmen berechneten Wasserspiegellagen. Um den Beweis zu erbringen, dass diese Abweichung ebenfalls auf die Trennflächenannahme in HEC-RAS zurückzuführen ist, wurde in der HEC-RAS Geometrie die Lage der Übergangspunkte zwischen Hauptgerinne und Vorland (bisher bei y-Koordinate 10 und 21, siehe Abb. 17) an den Anfangs- bzw. Endpunkt des Querschnitts verlegt (y-Koordinaten 1 und 30). Damit gibt es keinen Übergang zwischen zwei Bereichen mehr, da der gesamte Abfluss im neu definierten Hauptgerinne stattfindet. Mit der so veränderten Geometrie berechnet HEC-RAS eine Fließtiefe von 3,43 Meter, also das gleiche Ergebnis wie BASEMENT.

Die Lage der Übergangspunkte hat also eine entscheidende Auswirkung auf das erzielte Berechnungsergebnis mit HEC-RAS, selbst wenn für Vorland und Hauptgerinne ein identischer Rauigkeitswert verwendet wird.

Die gleiche Änderung wurde auch in der FLORIS-Topographiedatei für BASEMENT durchgeführt und dort die Punkte mit der y-Koordinate 1 und 30 mit den Schlüsselzahlen 12 und 13 als Anfang und Ende des Bereichs Hauptgerinne deklariert. Die Berechnung mit dieser

Topographiedatei ergab wieder Fließtiefen von 3,40 bis 3,43 Meter, wobei die größten Abweichungen gegenüber der alten Geometrie genau einen Zentimeter betragen. Das Berechnungsverfahren in BASEMENT ist also weniger empfindlich, was den Einfluss der Trennflächen auf das Ergebnis angeht.

HEC-RAS Geometriedatei in BASEMENT importiert

Im Anschluss daran wurde die HEC-RAS Geometriedatei in BASEMENT importiert und das Beispiel mit diesem Geometrieformat nachgerechnet. Dabei ergaben sich für die Fließtiefen geringfügige Abweichungen im Millimeterbereich zu den mit der FLORIS-Geometrie berechneten Werten. Diese konnten aber durch kleinere *Table*-Intervalle eliminiert werden. Es wurden zwei Geometriedateien, nämlich mit der HEC-RAS Version 3.1.1 und 3.1.3 erstellt. Der Import funktionierte mit beiden Versionen, der Aufbau der Dateien unterscheidet sich nur geringfügig, die berechneten Ergebnisse waren identisch.

Abbildung 20 zeigt die berechneten Wasserspiegellagen für die beiden Abflusssituationen. Die Abweichung der BASEMENT Ergebnisse für den Abfluss Q_2 (vgl. Abb. 19, eigentlich müsste sich eine Gerade parallel zur Sohle ergeben) ist aufgrund der Skalierung kaum zu erkennen.

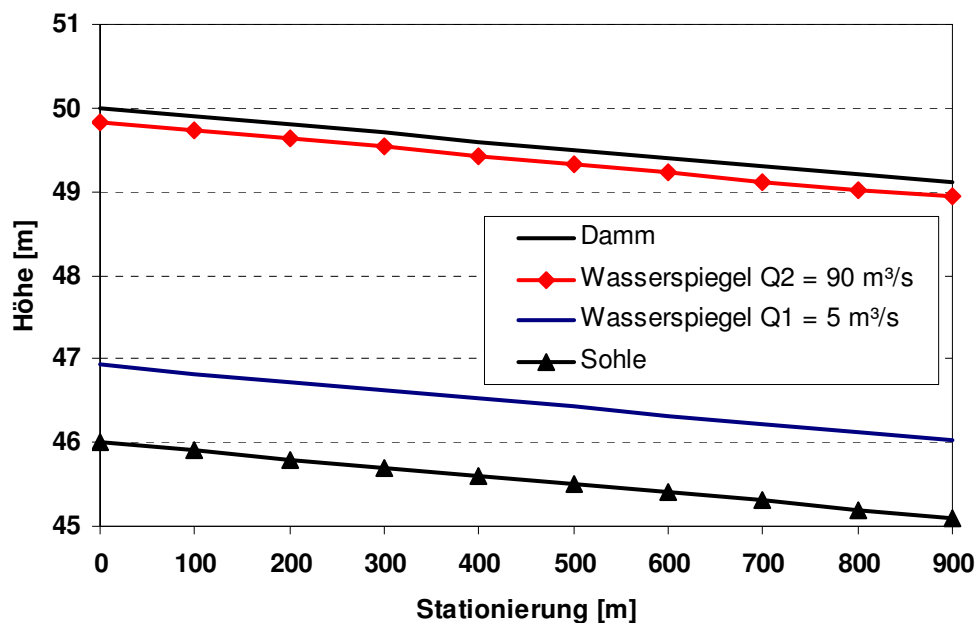


Abb. 20: Mit BASEMENT berechnete Wasserspiegellagen für zwei konstante Abflüsse.

4.2.3 Instationäre Berechnung

Bisher wurden mit BASEMENT nur stationäre Abflussberechnungen durchgeführt. Deshalb soll zum Vergleich die Vorgehensweise bei instationären Verhältnissen kurz beschrieben werden.

Für dieses Beispiel wurde eine fiktive Hochwasserganglinie (Abb. 21) entworfen, die mit einem Abfluss von $5 \text{ m}^3/\text{s}$ beginnt und einen Spitzenabfluss von $71 \text{ m}^3/\text{s}$ hat. Danach klingt

die Hochwasserwelle wieder bis zum Ausgangsabfluss ab. Als Zeitraum für den Ablauf dieser Welle wurden 48 Stunden (172800 Sekunden) angenommen.

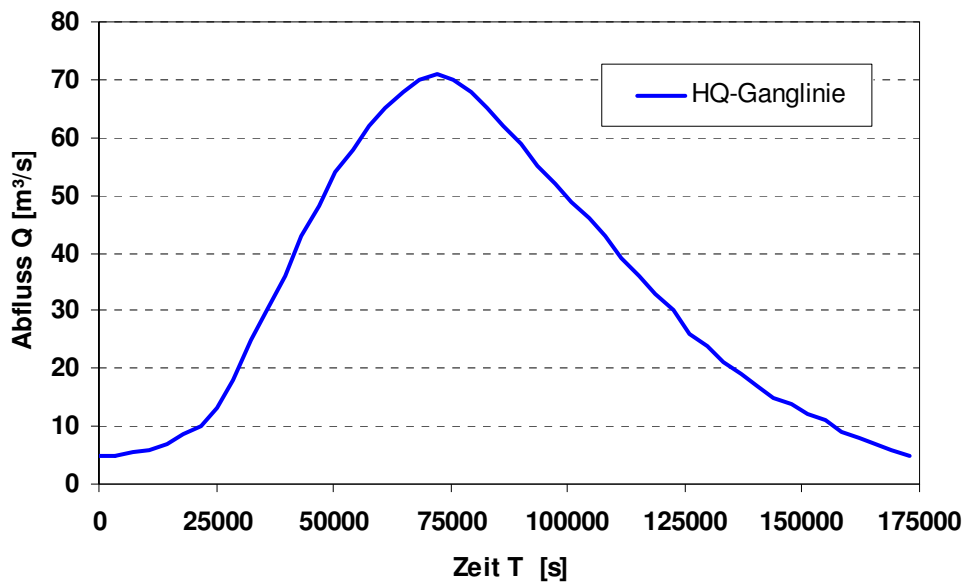


Abb. 21: Gewählte Hochwasserganglinie für die instationäre Berechnung.

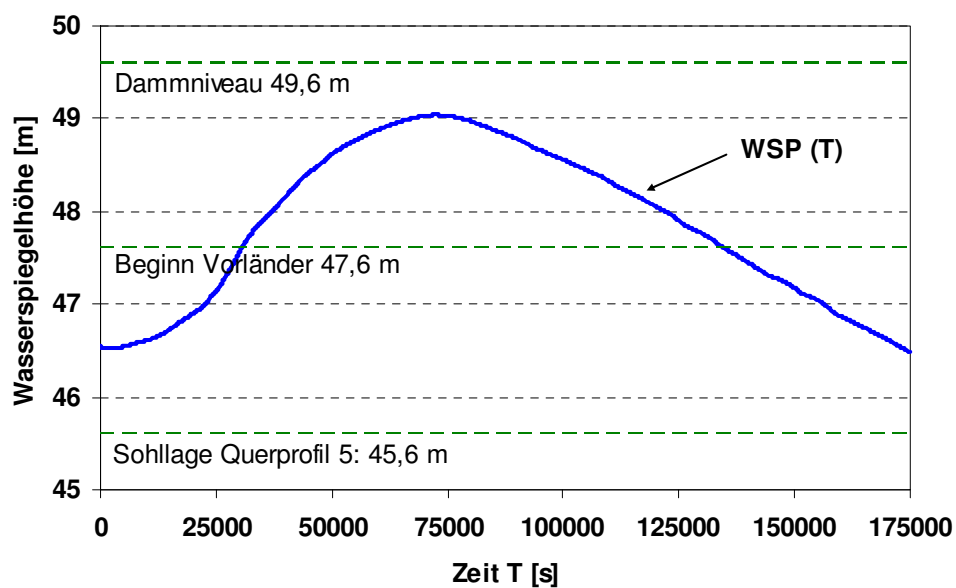


Abb. 22: Zeitlicher Wasserspiegelverlauf für den Ablauf obiger Hochwasserwelle im Trapezquerschnitt (Querprofil 5, Station 400 m).

Will man eine instationäre Berechnung durchführen, erzeugt man für den ersten Abflusswert der Ganglinie eine Initialdatei mit der in einem zweiten Schritt die Simulation gestartet wird. Das Beispiel wurde also mit einem konstanten Abfluss von $5 \text{ m}^3/\text{s}$ und der Initialbedingung „Dry“ gerechnet. Genauso wäre eine Verwendung der Initialbedingung „Backwater Calculation“ zur Erzeugung geeigneter Startwerte möglich. Mit der Ergebnisdatei wird anschließend ein zweiter Rechenlauf mit der Initialbedingung „Fileinput“ ausgeführt, nun

aber die Hochwasserganglinie als Oberstrom-Randbedingung verwendet. Als Unterstrom-Randbedingung wurden Normalwasserverhältnisse gewählt.

Wählt man bei der Ergebnisausgabe entsprechend kleine Zeitschritte, ist es möglich, den Verlauf der Hochwasserwelle in einem bestimmten Querprofil über die Zeit zu verfolgen. Abbildung 22 zeigt sowohl die verwendete Ganglinie als auch das Ergebnis im Querprofil 5.

Der Wasserspiegelverlauf entspricht in seiner Form der verwendeten Hochwasserganglinie, ist jedoch leicht zeitlich verschoben, da der Scheitel der Welle erst die Distanz bis zum beobachteten Querprofil zurücklegen muss. Bis zu einem Abfluss von ca. 20 m³/s verläuft der Wasserspiegel innerhalb des schmalen Hauptkanals (vgl. Abb. 17). Das Überströmen der Vorländer hat einen langsameren Anstieg des Pegels zur Folge, was sich in einem Knick in der Wasserspiegellinie äußert.

4.2.4 Fazit

Beispiel 2 hat gezeigt, dass die numerischen Modelle BASEMENT und HEC-RAS bei Querschnitten mit Zonen unterschiedlicher Rauheiten deutlich verschiedene Fließtiefen berechnen können. Dies ist auf unterschiedliche Annahmen bei der Berechnung des hydraulischen Radius und die verschiedenen numerischen Lösungsverfahren zurückzuführen, die in beiden Modellen implementiert sind. Der Anwender sollte sich deshalb der zugrunde liegenden Verfahren bewusst sein und in der Praxis eine Wasserspiegelfixierung anhand von Messdaten durchführen.

Die Finite Volumen Methode, die in BASEMENT zum Einsatz kommt, führte bei größeren Abflüssen zu Abweichungen zwischen den berechneten Wasserspiegellagen in den einzelnen Querprofilen, obwohl die Abflussverhältnisse stationär waren. Die Abweichungen waren auch durch höhere Präzisionseinstellungen und längere Simulationszeiten nicht zu eliminieren.

Die Berechnung mit einer einheitlichen Rauigkeit im gesamten Querschnitt zeigte, dass BASEMENT im Vergleich zu HEC-RAS weniger anfällig für Abweichungen aufgrund verschiedener Definitionen von Hauptkanal und Vorland ist. Während in HEC-RAS unterschiedlich definierte Übergangspunkte (zwischen den Bereichen Main Channel und Flood Plains) zu abweichenden Fließtiefen führten, wirkte sich eine solche Änderung in BASEMENT nicht auf die Ergebnisse aus.

In Beispiel 1 (Rechteckgerinne, einheitliche Rauigkeit) traten nur mit der Initialbedingung „Dry“ oder bei Verwendung einer falschen Randbedingung Abweichungen in den berechneten Wasserspiegellagen auf. In diesem Beispiel (Trapezgerinne) kam es auch mit den Initialbedingungen „Backwater“ und „Fileinput“ zu Abweichungen, die mit steigendem Wasserspiegel zunahmen. Dabei wurde immer die Randbedingung „H-Q Relation“ benutzt, die zur Berechnung von Normalwassertiefen vorgesehen ist. Die Ergebnisse für „Backwater“ und „Fileinput“ waren wie im ersten Beispiel identisch. Mit welcher Initialbedingung („Dry“ oder „Backwater“) das Initialfile berechnet worden war, machte keinen Unterschied, obwohl die berechneten Initial-Wasserspiegel deutlich verschieden waren.

4.3 Beispiel 3: Trapezquerschnitt mit Morphologie

Nachdem sich die ersten beiden Beispiele ausschließlich mit hydraulischen Berechnungen und den dafür zur Verfügung stehenden Randbedingungen und Eingabeparametern beschäftigt haben, sollen im dritten Beispiel die Parameter für morphologische Berechnungen, die BASEMENT anbietet, beschrieben und bewertet werden.

4.3.1 Geometrie

Für dieses Beispiel wurde keine neue Geometrie entworfen, sondern der Trapezquerschnitt mit Vorland aus Beispiel 2 weiterverwendet. Dadurch sollten die Unterschiede zwischen der rein hydraulischen Berechnung und der Berücksichtigung von Geschiebetransport deutlich gemacht werden.

4.3.2 Einkornsimulation

Das Beispiel wurde zunächst als Einkornmodell mit der MPM-Formel berechnet. Dabei wurde ein konstanter Abfluss und ein Simulationszeitraum vorgegeben, der deutliche Sohlveränderungen bewirkte, um den Einfluss einzelner Parameter zu verdeutlichen. Tabelle 12 stellt die gewählte Konfiguration zusammen.

Programmversion	Basement V 1.3 und V 1.3.4
Geometrie	
Wie in Beispiel 2	Trapezquerschnitt mit Vorländern
Punkte innerhalb der beweglichen Sohle	2, 3 und 5
Stricklerbeiwert des Hauptkanals	33,33 m ^{1/3} /s (unverändert)
Stricklerbeiwert der Vorländer	25 m ^{1/3} /s (unverändert)
Hydraulische Randbedingungen	
Oberstrom	Konstanter Abfluss Q = 40 m ³ /s
Unterstrom	H-Q Relation (Normalwassertiefe)
Initialbedingung	Backwater Calculation / Fileinput
Simulationsdauer	100000 s
Morphologische Randbedingungen	
Oberstrom	IO Up / Wall
Unterstrom	IO Down (Gleichgewicht)
Transportformel	MPM, Faktor 5
Morphologische Parameter	
Korndurchmesser	23 mm
Porenanteil	30 %
Active Layer Dicke	10 cm
Sublayer Dicke	150 cm

Tab. 12: Eingangsparameter für die Einkornsimulation unter konstantem Abfluss.

Für dieses Beispiel wurden mit den unterschiedlichen BASEMENT Versionen V 1.3 und V 1.3.4 völlig verschiedene Ergebnisse erhalten. Deshalb musste zunächst geklärt werden, welche Version korrekt ist. Abbildung 23 stellt die Ergebnisse beider Programmversionen gegenüber (RB: „IO Up“; IB: „Backwater“; 5 Sohlpunkte). Dargestellt sind die berechneten Sohlagen und Schubspannungen bei Simulationsende (nach 100000 Sekunden).

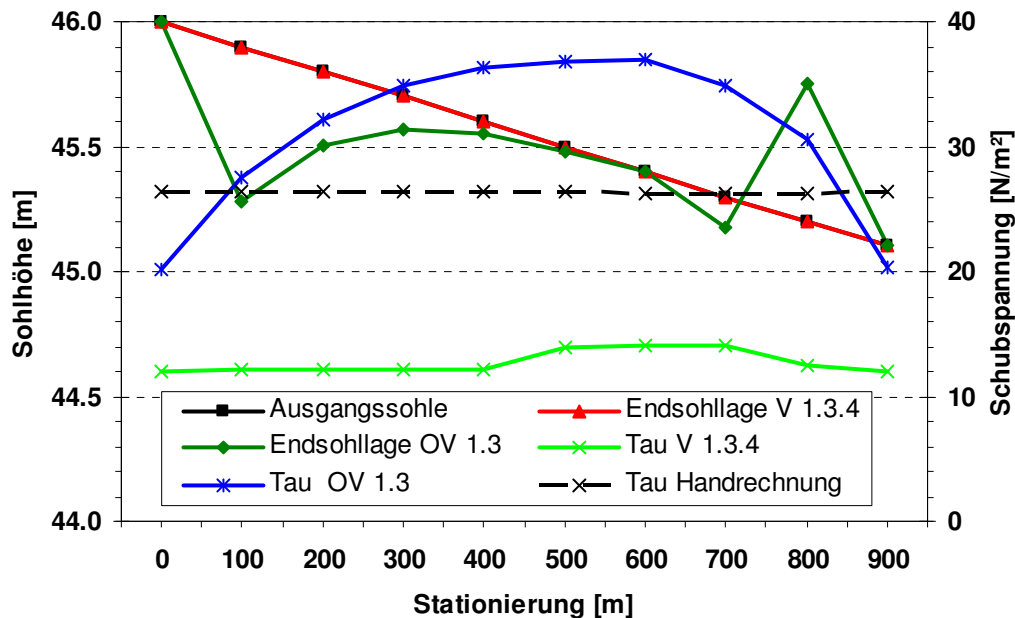


Abb. 23: Ergebnisvergleich der BASEMENT Versionen V 1.3 und V 1.3.4.

Während mit BASEMENT Version V 1.3 große Sohländerungen zu beobachten sind, findet mit V 1.3.4 kein Geschiebetransport statt. Die mit V 1.3.4 berechneten Sohl Schubspannungen liegen viel niedriger als die der Originalversion. Für den konstanten Abfluss von $40 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt sich in beiden Versionen eine Fließtiefe von ca. 2,70 m. Demzufolge müssen auch die selben Schubspannungen an der Sohle auftreten.

Die Handrechnung dieses Beispiels (analog der Berechnungen in Anhang A.4) ergibt für das Material mit $d_m = 23 \text{ mm}$ eine kritische Schubspannung τ_{crit} von $17,5 \text{ N/m}^2$. Die vorhandene Schubspannung ($h = 2,70 \text{ m}$) liegt bei $26,5 \text{ N/m}^2$ und damit in der Größenordnung des Ergebnisses von V 1.3. V 1.3.4 berechnet mit maximal 14 N/m^2 zu geringe Schubspannungen, es muss sich hier um einen Fehler im Programmcode handeln. Für die weiteren Berechnungen wurde mit BASEMENT V 1.3 gearbeitet.

Randbedingungen und Anzahl der Sohlpunkte

Das Beispiel wurde erst mit nur zwei definierten Punkten innerhalb der beweglichen Sohle, dann mit drei und fünf Sohlpunkten berechnet. Abbildung 24 zeigt die Sohländerungen, die mit der morphologischen Randbedingung „IO Up“ (Geschiebeeintrag gleich der Transportkapazität im ersten Querprofil) und der Randbedingung „Wall“ (kein Geschiebeeintrag) für die verschiedenen Topographien berechnet wurden.

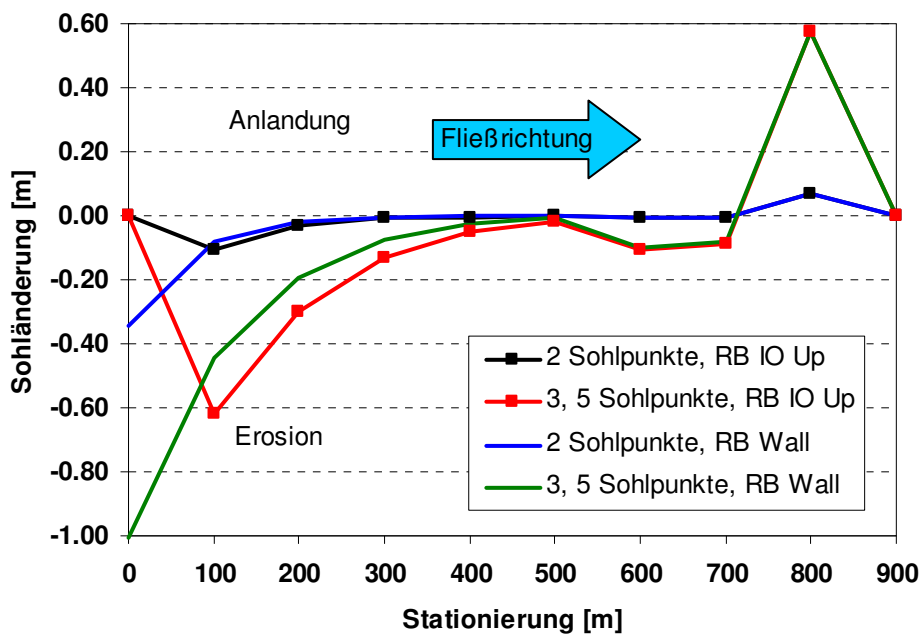


Abb. 24: Einfluss der Anzahl der Sohlpunkte und der morphologischen Randbedingung.

Wird die bewegliche Sohle mit mehr als nur zwei Punkten beschrieben, ergeben sich deutlich höhere Erosionen und Anlandungen. Drei Sohlpunkte liefern ein identisches Ergebnis wie fünf oder mehr Punkte. Zwei Sohlpunkte sind offensichtlich zu wenig und führen zu geringeren Sohländerungen, was eine Eigenart des Geometrieformats FLORIS darstellt. Die Sohldefinition über nur zwei Punkte wird vom Programm anders aufgefasst, als wenn ein zusätzlicher Punkt angegeben wird. In natürlichen Gerinnen verläuft die Sohle nie exakt horizontal und wird daher immer über mehrere Punkte beschrieben werden. Für alle weiteren Berechnungen wurde mit mehreren Sohlpunkten gearbeitet.

Während die morphologische Oberstrom-Randbedingung „IO Up“ das erste Querprofil fixiert, da die der Transportkapazität entsprechende Geschiebemenge zugegeben wird, ergab die Randbedingung „Wall“ im ersten Querprofil sehr große Erosionen. Im weiteren Streckenverlauf näherten sich die Ergebnisse wieder an. Der Unterschied besteht einzig darin, dass das im ersten Fall („IO Up“) von außen zugegebene Geschiebe nun („Wall“) im ersten Querprofil entnommen und weitertransportiert wird.

Am Ende der Untersuchungsstrecke waren jeweils (Abb. 24) Anlandungen zu beobachten, die durch die Unterstrom-Randbedingung „IO Down“ entstanden. Durch diese Randbedingung wird die Lage des letzten Querprofils fixiert. Es wird (analog zu „IO Up“) nur die Geschiebemenge zur letzten Berechnungszelle (Übergang bei Station 850) transportiert, die der dort herrschenden Transportkapazität entspricht. Das überschüssige Material blieb vorher liegen und führte zu der Anlandung bei Station 800. Da es für die Unterstromseite nur diese morphologische Randbedingung gibt, muss die Topographie um eine Nachlaufstrecke erweitert werden, wenn man den störenden Einfluss auf den Untersuchungsbereich reduzieren will. Der Einfluss beider Randbedingungen (Ober- und Unterstromseite) erstreckte sich im Beispiel ungefähr über die Distanz dreier Querprofile, der Mittelbereich war störungsfrei.

Einfluss der hydraulischen Initialbedingung

Alle bisherigen Rechenläufe wurden mit Initialbedingung „Backwater Calculation“ gerechnet. Zum Vergleich wurde das Beispiel nun mit der Initialbedingung „Fileinput“ gestartet. Dabei wurden zwei verschiedene Initialdateien vorgegeben. Eine davon wurde mit der Initialbedingung „Dry“, die andere mit „Backwater“ berechnet. Die Berechnung der Initialdateien erfolgte rein hydraulisch ohne die Berücksichtigung von Geschiebetransport. Abbildung 25 zeigt die mit beiden Initialfiles erzielten Ergebnisse und die zuvor berechnete Sohlveränderung mit der „Backwater Calculation“ (RB: „IO Up“; 5 Sohlpunkte).

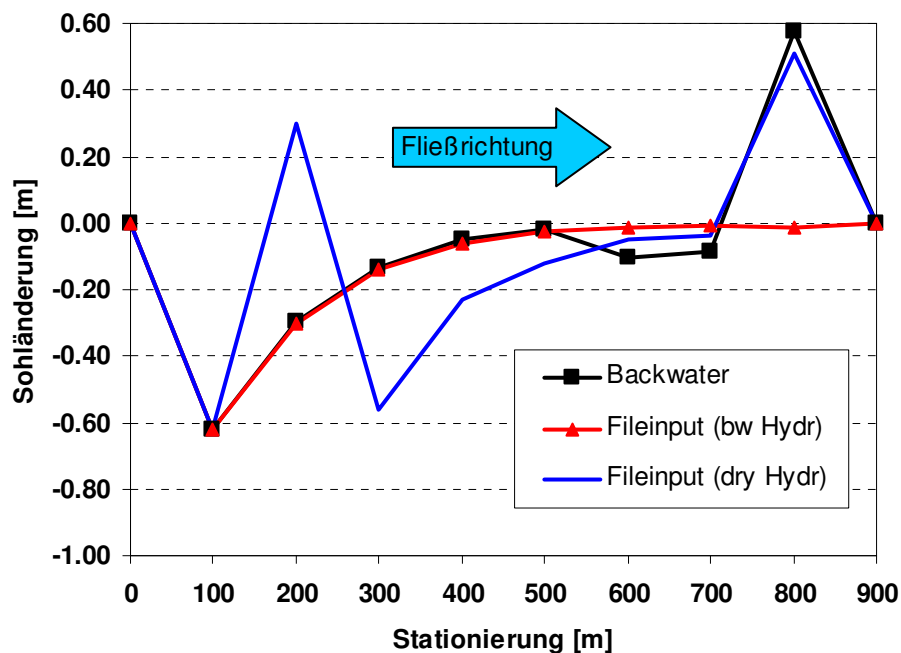


Abb. 25: Berechnete Sohlveränderung mit unterschiedlichen Initialbedingungen und -Files.

Bei Verwendung der Initialbedingungen „Backwater“ und „Fileinput (bw Hydr)“ wurden weitgehend übereinstimmende Ergebnisse erhalten, nur im Bereich der Unterstrom-Randbedingung kam es mit Initialfile nicht zu der Anlandung. Bei Verwendung der mit der Initialbedingung „Dry“ erzeugten Startdatei „Fileinput (dry Hydr)“ wichen die Ergebnisse deutlich von denen der anderen Rechenläufe ab. Hier kommt es bei Station 200 zu einer Anlandung von ca. 30 cm.

Um die Ursache der Abweichungen zu klären, wurden die Initialwasserspiegel und Schubspannungsverläufe in den drei Szenarien genauer untersucht. In den Abbildungen 26 und 27 sind diese nach einer Simulationsdauer von zehn bzw. 100 Sekunden dargestellt. Die „Backwater Calculation“ wurde mit einem Wasserspiegel auf Höhe 47,5 m im letzten Querprofil initialisiert. Nach zehn Sekunden ist an dieser Stelle ein Wasserspiegel von 47,6 m erreicht, während die anderen beiden Rechenläufe mit der korrekten Normalwassertiefe (auf Höhenkote 47,8 m) gestartet wurden. Die Schubspannungsverläufe in Abbildung 26 sind nachvollziehbar. Dass für niedrigere Fließtiefen höhere Schubspannungen berechnet werden, kann durch das steilere Energieliniengefälle erklärt werden.

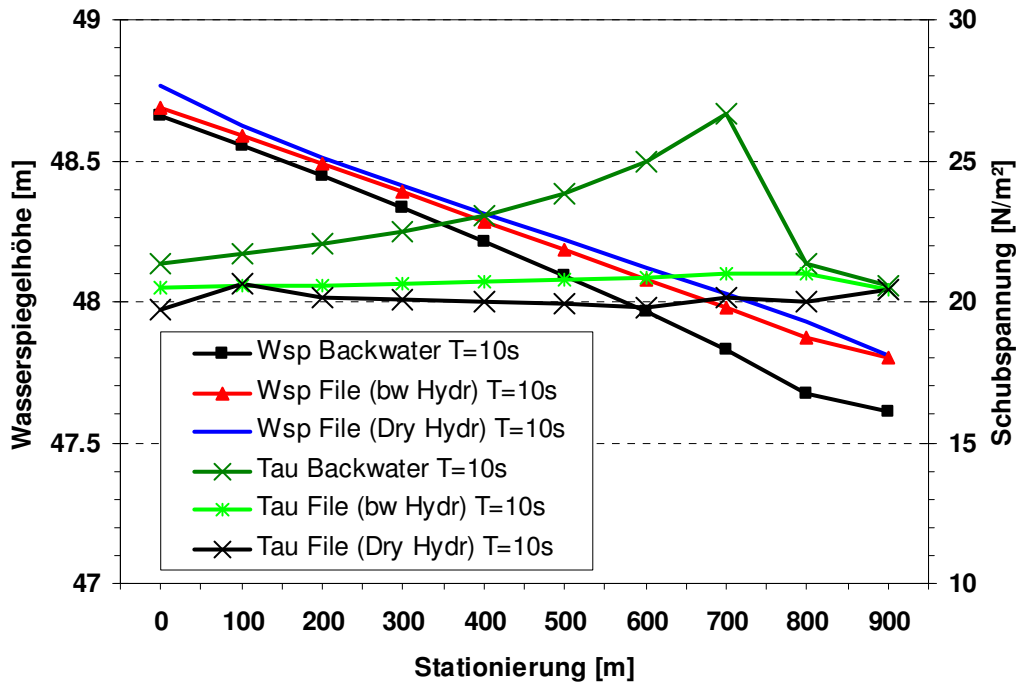


Abb. 26: Wasserspiegel und Schubspannungen nach 10 Sekunden.

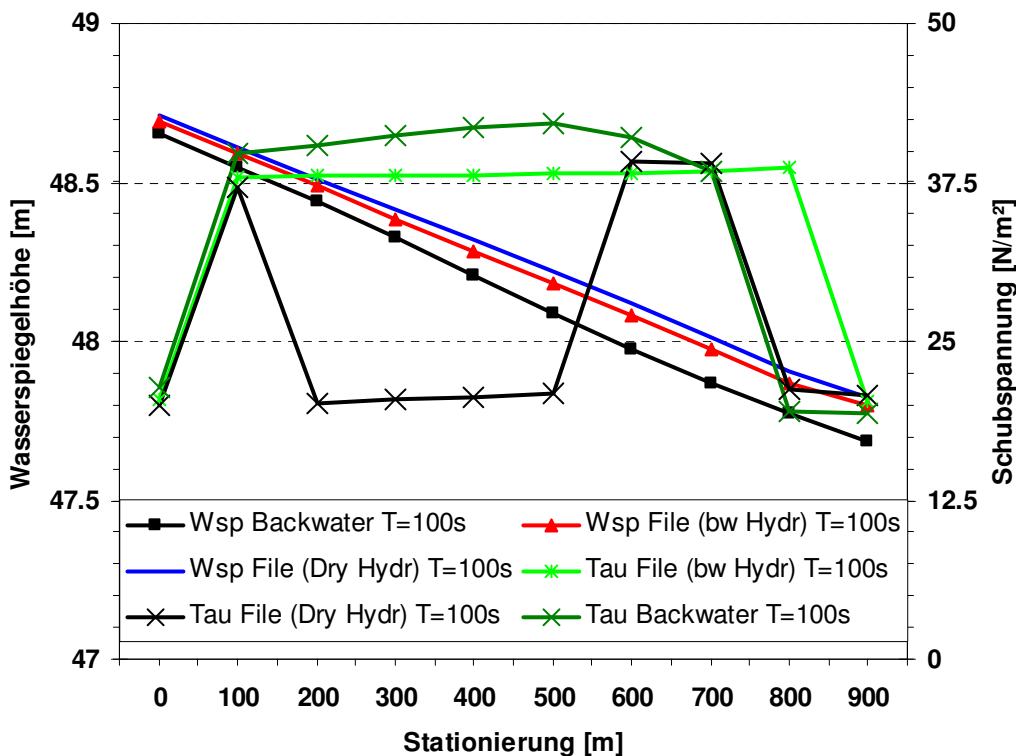


Abb. 27: Wasserspiegel und Schubspannungen nach 100 Sekunden.

Nach einer Simulationszeit von 100 Sekunden ist für den Rechenlauf „File (Dry Hydr)“ ein deutlich abweichender Schubspannungsverlauf zu beobachten (Abb. 27). Dieses Phänomen ist angesichts des zugehörigen Wasserspiegels nicht zu erklären, da dieser annähernd konstant verläuft und keine Unregelmäßigkeiten aufweist. Außerdem haben zu diesem frühen

Simulationszeitpunkt noch keine nennenswerten Sohländerungen stattgefunden. Die Tendenz zu der späteren Anlandung bei Station 200 ist am Schubspannungsverlauf bereits ablesbar. Die zeitliche Entwicklung der Schubspannungen in diesem Rechenlauf ist in Abbildung 28 dargestellt. Unmittelbar nach Simulationsbeginn ergeben sich zwei Spannungsspitzen bei den Stationen 100 und 700. Die bei Station 700 berechnete Schubspannung setzt sich in Oberstromrichtung fort. Der Spannungsabfall bei Station 200 bleibt jedoch bis Simulationsende erhalten.

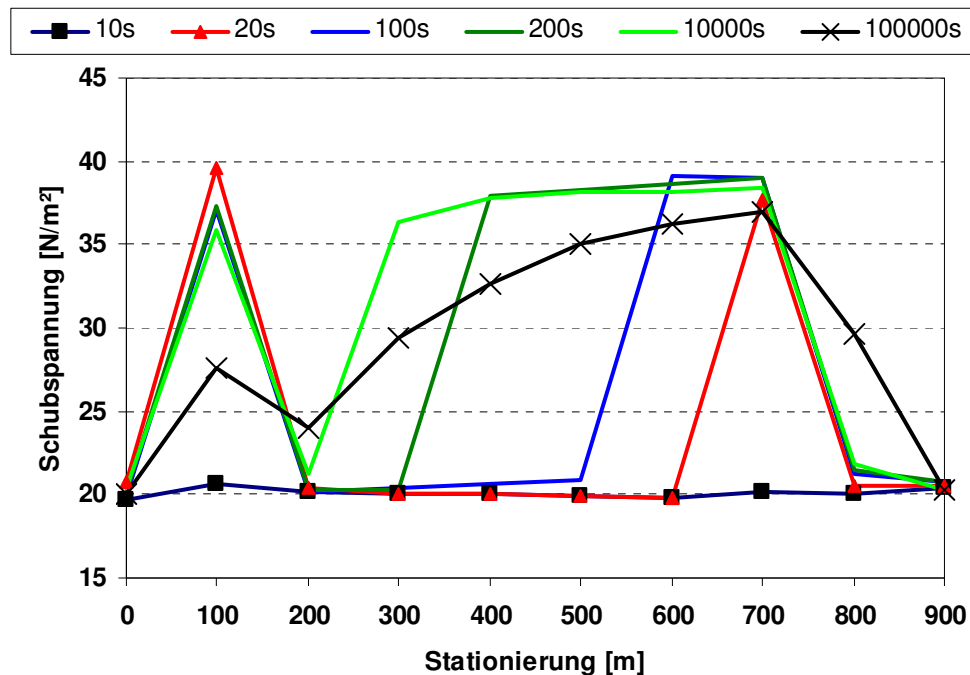


Abb. 28: Zeitliche Entwicklung der berechneten Schubspannungen Fileinput (Dry Hydr).

Offensichtlich ergeben sich bei morphologischen Berechnungen mit BASEMENT Probleme, wenn für einen konstanten geschiebewirksamen Abfluss ein mit der Initialbedingung „Dry“ berechnetes Startfile verwendet wird. Das Startfile sollte für solche Szenarien mit einer „Backwater Calculation“ erzeugt oder gleich mit dieser Initialbedingung gerechnet werden. Die in diesem Fall entstehende Anlandung auf der Unterstromseite, kann durch eine Nachlaufstrecke vermieden werden.

Der Rechenlauf „Fileinput (bw Hydr)“ liefert aufgrund des konstanten Initialwasserspiegels einen ausgeglichenen Schubspannungsverlauf gleich zu Simulationsbeginn. Dadurch kommt es bei Station 800 nicht zu der Anlandung, die in den beiden anderen Rechenläufen beobachtet wurde. Die Transportkapazität im letzten Querprofil ist ausreichend groß, um das gesamte ankommende Material weiterzutransportieren. Eine Nachlaufstrecke ist in diesem Fall nicht erforderlich.

Formel von Rickenmann

Das Beispiel wurde auch mit der Formel von Rickenmann berechnet. Hier sind neben dem d_m noch die Korngrößen d_{30} und d_{90} anzugeben. Für diese Korndurchmesser wurden Werte von acht bzw. 30 Millimeter verwendet. Allerdings ergab sich mit diesem Ansatz keinerlei Erosion, die Sohlage blieb unverändert. Auch mit kleineren Korndurchmessern ergaben sich nur minimale Transportraten. Dies ist mit dem Anwendungsbereich der Rickenmann-Formel für steilere Sohlgefälle zu begründen. Das Sohlgefälle im Beispiel ist mit einem Promille zu flach gewählt, um eine Erosion zu berechnen, Fließgeschwindigkeit und Froude-Zahl sind zu niedrig.

Der Transportansatz „*Powerlaw*“ führte trotz der Wahl der Kalibrierfaktoren im empfohlenen Rahmen stets zu Programmabstürzen. Das Problem befindet sich noch in Überarbeitung, daher wurde auf die Verwendung dieser Transportformel im Weiteren verzichtet.

4.3.3 Mehrkornmodell

Im Anschluss wurde das Beispiel für fraktionsweise Berechnungen modifiziert. Anstatt eines einzigen mittleren Korndurchmessers wurden fünf Kornfraktionen von einem bis 50 Millimeter Durchmesser deklariert. Als Transportformel wurde der Ansatz von Hunziker MPM-H gewählt. Die Simulationsstrecke wurde um einen 200 Meter langen Nachlaufbereich erweitert. Tabelle 13 zeigt die getroffenen Annahmen für die Mehrkornsimulation.

Programmversion	Basement V 1.3
Geometrie	
Wie in Beispiel 2	Trapezquerschnitt mit Vorländern
Punkte innerhalb der beweglichen Sohle	5
Nachlaufstrecke	200 m
Hydraulische Randbedingungen	
Oberstrom	Konstanter Abfluss $Q = 70 \text{ m}^3/\text{s}$
Unterstrom	H-Q Relation (Normalwassertiefe)
Initialbedingung	Backwater Calculation
Simulationsdauer	200000 s
Morphologische Randbedingungen	
Oberstrom	IO Up / Wall
Unterstrom	IO Down (Gleichgewicht)
Transportformel	MPM-H
Morphologische Parameter	
Anzahl Kornfraktionen	5
Korngrößen	1, 4, 16, 21, 50 mm
Porenanteil	37 %
Active-Layer Dicke	10 cm
Sublayer Dicke	100 cm
Upwind	1
Max dz Table	0,005 m

Tab. 13: Eingangsparameter für die Mehrkornsimulation.

Für die Active- und Sublayer wurden verschiedene Zusammensetzungen angenommen, die in Tabelle 14 aufgeführt sind. Die gewählte Active-Layer Zusammensetzung weist einen mittleren Korndurchmesser von 13,5 Millimeter auf. Darunter wurde eine feinere Unterschicht mit einem mittleren Korndurchmesser von 8,35 Millimeter angeordnet. Abbildung 29 veranschaulicht die fraktionsweise Zusammensetzung der Schichten.

Kornfraktion [mm]	Zusammensetzung Active-Layer [%]	Zusammensetzung Sublayer [%]
1	30	40
4	20	30
16	20	20
21	20	5
50	10	5
d_m	13,5 mm	8,35 mm

Tab. 14: Zusammensetzung der Schichten.

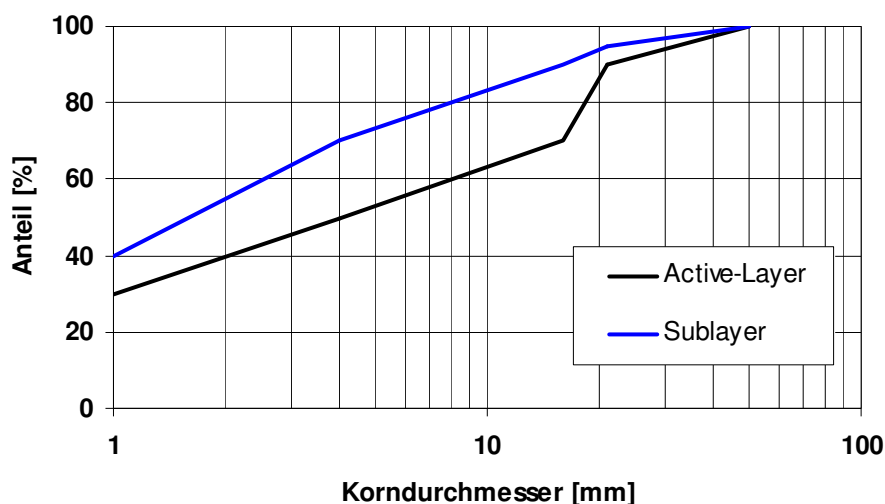


Abb. 29: Sieblinien des Active- und Sublayermaterials im Beispiel.

Mit der Formel von Hunziker werden im Vergleich zu MPM wesentlich geringe Transportraten berechnet. Für das Beispiel wurde deshalb ein höherer Abfluss von $70 \text{ m}^3/\text{s}$ und eine doppelt so lange Simulationsdauer als für das Einkornmodell gewählt, um die Wirkungsweise der getesteten Parameter veranschaulichen zu können.

Randbedingungen und Berechnungsmodus

Das Beispiel wurde mit den morphologischen Oberstrom-Randbedingungen „IO Up“ und „Wall“ berechnet. Die hydraulischen Kenngrößen wurden wieder aus einer Tabelle interpoliert, dabei ist auf eine angemessene Größe der vorgegebenen Table-Intervalle zu achten, wie Abbildung 30 zeigt. Die Schwankungen im Wasserspiegel, die sich bei zu groben Tabellenintervallen ergeben, beeinflussen die berechneten Ergebnisse erheblich. Vor allem

die Randbedingung Gleichgewicht (*IO Up*), bei der Geschiebeeintrag in die Strecke stattfindet, reagierte sensibel auf Abweichungen in der hydraulischen Berechnung. Dem zufolge sollten auch die zulässigen Sohlveränderungen, bis eine neue Tabelle erstellt wird, nicht zu groß gewählt werden. Im Beispiel wurde stets mit fünf Millimetern (*max_dz_table*) gearbeitet.

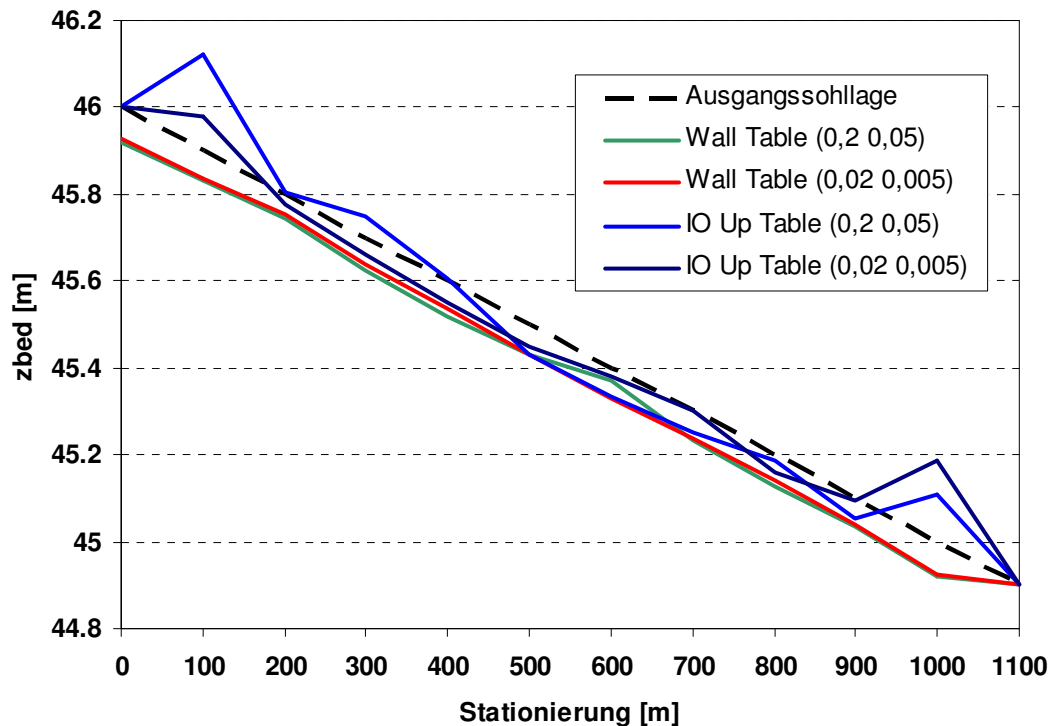


Abb. 30: Ergebnisse für unterschiedliche Randbedingungen und Präzisionseinstellungen (verwendete Tabellenintervalle in Klammern).

Die Randbedingung „Wall“, bei der kein Geschiebeeintrag in die Strecke stattfindet, lieferte für die vorgegebene Active-Layer Dicke von zehn Zentimetern gleichmäßige Sohlerosion, wobei auch keine Anlandung durch die Unterstrom-Randbedingung zu beobachten war. Zur weiteren Parameteranalyse wurde dieser Rechenlauf ausgewählt.

HEC-RAS Geometrie

Bei der Nachrechnung der beiden vorherigen Rechenläufe (mit Intervallen von max. 0,02 und min. 0,005 m zulässiger Wasserspiegeldifferenz zwischen zwei Tabellenwerten) mit einem HEC-RAS Geometriefile wurden deutliche Abweichungen festgestellt, wie Abbildung 31 zeigt. Für diese Berechnungen wurde die BASEMENT Version V 1.3.2 verwendet, in der die HEC-RAS Kompatibilität korrigiert worden war. Während beim Einkornmodell mit beiden Geometrieformaten übereinstimmende Ergebnisse erzielt worden waren, kam es bei der fraktionierten Berechnung wieder zu Abweichungen. Es muss zwischen beiden Geometrieformaten noch einen weiteren Unterschied geben. Dies könnte der Stricklerwert für die Sohle sein, der in FLORIS angegeben wird und in HEC-RAS nicht eigens definiert werden kann. Für die folgenden Beispiele war es daher notwendig, sich auf ein einheitliches Geometrieformat festzulegen. Es wurde stets FLORIS verwendet.

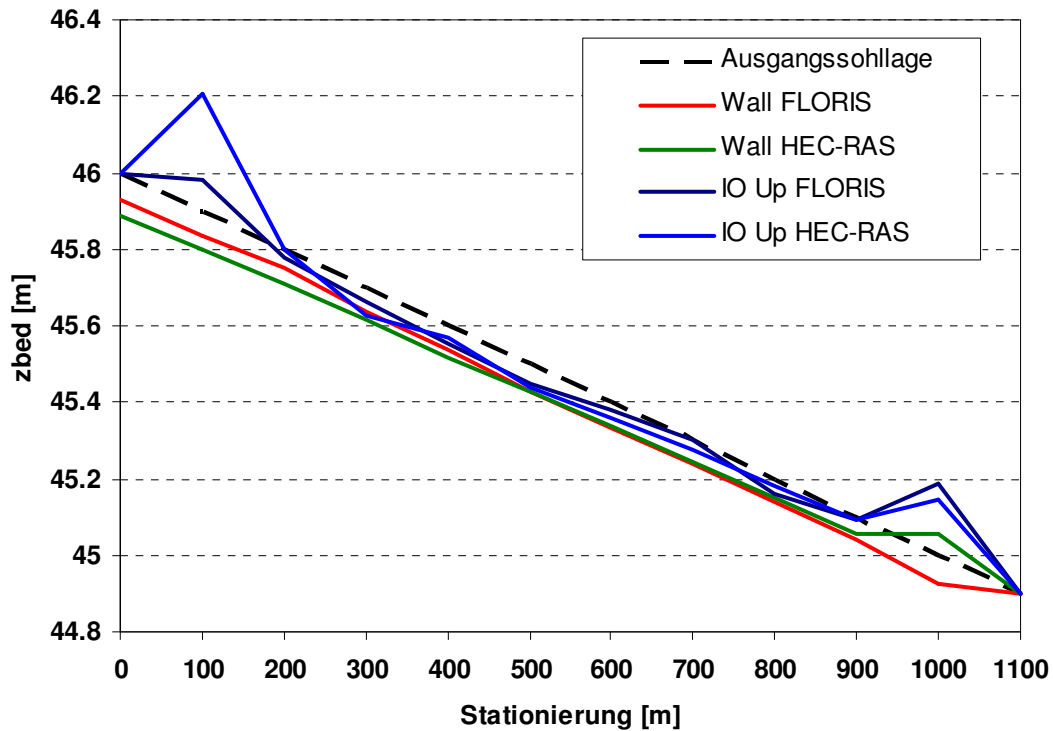


Abb. 31: Unterschiedliche Ergebnisse mit unterschiedlichen Geometrieformaten.

Einfluss der Active-Layer Dicke (MPM-H)

Um die Bedeutung der Modellgröße Active-Layer (AL) Dicke für fraktionierte Berechnungen zu verdeutlichen, wurde dieser Parameter in einem Bereich von 0,05 bis 0,4 Meter variiert. Abbildung 32 zeigt den direkten Zusammenhang zwischen AL-Dicke und Erosion. Bei der Einkornsimulation beeinflusste dieser Parameter die Ergebnisse nicht, da dort der Transportbeginn allein von der kritischen Schubspannung für den mittleren Korndurchmesser abhängt.

Während in Abbildung 32 mit unterschiedlichen Zusammensetzungen von Active- und Sublayer (siehe Tab. 14) gerechnet wurde, zeigt Abbildung 33 die Ergebnisse für eine homogene Sohlzusammensetzung. Für beide Schichten wurde hier das (größere) AL-Material verwendet. Die Ergebnisse für den homogenen Sohlaufbau aus einer einzigen Kornmischung fielen insgesamt konstanter aus. Es stellte sich eine etwas geringere Erosionstiefe als mit der feinen Unterschicht ein. Deckschichtbildung und eine Selbststabilisierung der Sohle sind hier auch für dickere Active-Layer möglich.

In beiden Fällen ergeben sich mit größeren AL-Dicken auch größere Erosionen. Diese Beobachtung lässt sich durch das zugrunde liegende Schichtenkonzept begründen. Sedimenttransport und die sich daraus ergebende Änderung der Kornzusammensetzung finden nur in der Austauschschicht (Active-Layer) statt. Die Unterschicht bleibt in ihrer Zusammensetzung unverändert. Ist das Active-Layer dicker, kann bei jedem Berechnungszeitschritt mehr Material transportiert werden, was zu größeren Erosionen führt.

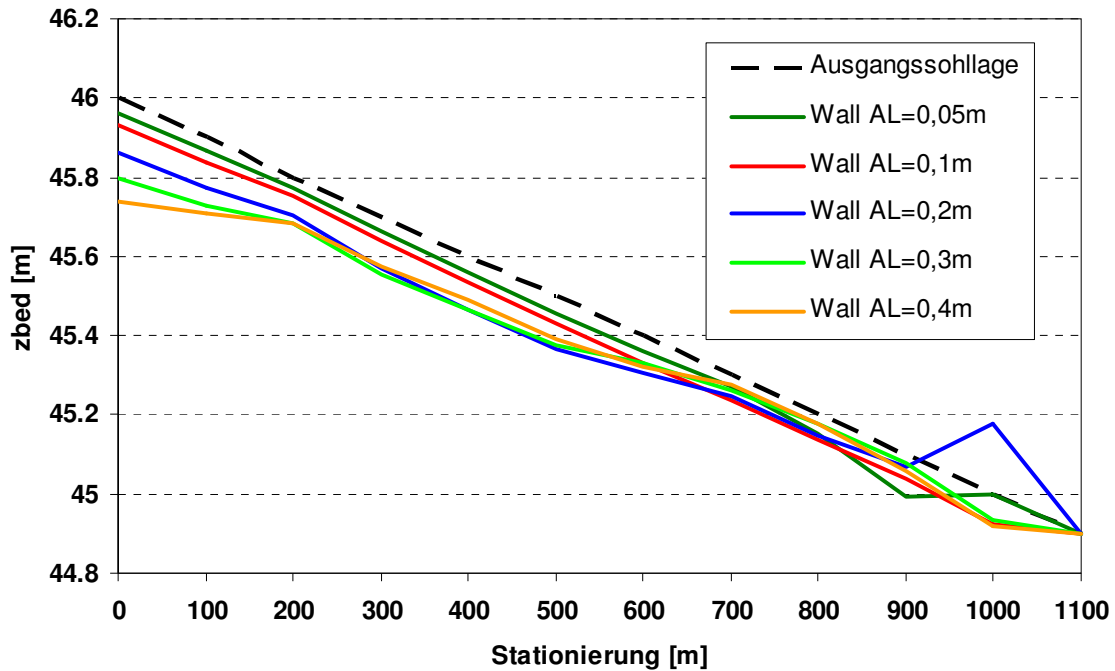


Abb. 32: Einfluss verschiedener Active-Layer Dicken, RB Wall, MPM-H.

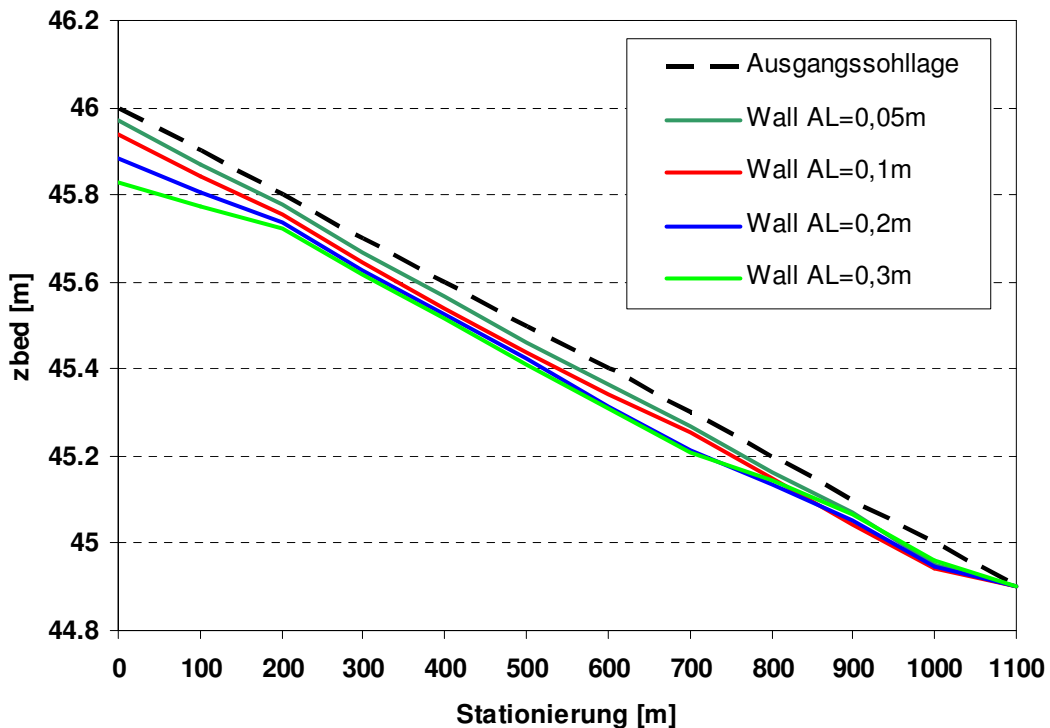


Abb. 33: Gleiche Zusammensetzung von Active- und Sublayer (AL Material), RB Wall.

Für die Active-Layer Dicke von 0,2 Meter trat bei der Berechnung mit zwei unterschiedlichen Schichtzusammensetzungen (Abb. 32) eine Anlandung bei Station 1000 auf. In diesem Fall wird innerhalb der Strecke soviel Material erodiert und weitertransportiert, dass die, durch die Unterstromrandbedingung vorgegebene, Transportkapazität am Ende nicht ausreicht, das

gesamte Material weiterzutransportieren. Mit den AL-Dicken 0,3 bzw. 0,4 Meter wird zwar am Anfang der Strecke mehr Material erodiert, dieses landet sich aber bereits innerhalb der Strecke kontinuierlich wieder an, weshalb die Anlandung am Ende ausbleibt. Mit einer AL-Dicke von 0,1 Meter wurde in beiden Fällen ein gleichmäßiger Sohlaustrag berechnet, der unter den gegebenen, konstanten Abflussverhältnissen am realistischsten ist. Die AL-Dicken von 0,2 Meter und mehr sind zu groß gewählt, um sinnvolle Ergebnisse zu erzielen. Liegen in der Praxis gemessene Sohlveränderungen vor, kann das Modell über die AL-Dicke kalibriert werden.

Das Sohlmaterial im Beispiel war relativ grob gewählt worden, um eine Berechnung mit anderen Transportansätzen zuzulassen. Für die Formeln von Parker und Rickenmann ist die im Beispiel verwendete Sohlneigung von einem Promille jedoch zu gering. Es stellte sich hier gar keine bzw. nur eine sehr geringe Erosion ein. Die Formeln können hier also nicht angewendet werden.

4.3.4 Fazit

Morphologische Berechnungen reagieren sehr sensibel auf eine Vielzahl von Parametern, wie die im Beispiel 3 durchgeführten Berechnungen zeigten. Die Eingangsdaten wie Rauigkeiten, Korngrößen und Schichtzusammensetzungen wurden allesamt frei gewählt. Das Beispiel diente daher in erster Linie zur Sensitivitätsanalyse des Programms. Qualitative Aussagen zum tatsächlichen Transportgeschehen sind aus den Beispielen nicht abzuleiten. Wohl aber kann die Wirkungsweise einzelner Parameter beurteilt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen bei der folgenden Modellierung realer Beispiele berücksichtigt werden.

Das Zusammenwirken von Geometrieingabe und Transportberechnung erwies sich als noch nicht problemlos. Während die Geometrieformate HEC-RAS und FLORIS beim Einkornmodell identische Ergebnisse lieferten, kam es beim Mehrkornmodell (fraktionierte Berechnung mit MPM-H) zu Abweichungen nur auf Grund verschiedener Geometrieingabeformate.

Gravierend waren auch die Unterschiede, die sich beim Einkornmodell aus verschiedenen Initialfiles und -bedingungen ergaben. Wurde für die Simulation ein mit der Initialbedingung „Dry“ erzeugtes Starfile verwendet, berechnete BASEMENT fehlerhafte Schubspannungsverläufe, was zu unplausiblen Anlandungen führte. Für morphologische Berechnungen mit einem konstanten, geschiebewirksamen Abfluss sollte daher auch für die Erzeugung eines Initialfiles die „Backwater Calculation“ benutzt werden.

Einkorn- und Mehrkornmodell sind nur bedingt miteinander vergleichbar, da die zugrunde liegenden Formeln sehr unterschiedliche Transportraten berechnen. Die Formel von Hunziker ist überwiegend für die Modellierung von Deckschichtbildungsprozessen geeignet, während die MPM-Formel wesentlich höhere Transportraten berechnet und daher für Szenarien mit großen Geschiebeumlagerungen und Sohländerungsprognosen eingesetzt werden kann.

4.4 Beispiel 4: Modellversuch zur Deckschichtbildung

Beispiel 3 diente dazu, die verschiedenen Funktionen und Parameter, die BASEMENT für morphologische Berechnungen bereitstellt, vorzustellen und deren Sensitivität bezüglich unterschiedlicher Eingabegrößen und Randbedingungen zu erkennen. Eine Kalibrierung des akademischen Beispiels war aufgrund fehlender Naturdaten jedoch nicht möglich. Deshalb soll in Beispiel 4 ein Modellversuch nachgerechnet werden, der an der Versuchsanstalt für Wasserbau der TU München in Oberrach durchgeführt wurde und zu dem eine Reihe von Messergebnissen vorliegen. Anhand dieser Messwerte ist eine gute Vergleichsmöglichkeit für die Simulationsergebnisse vorhanden. Außerdem dienen diese Daten als Grundlage für die Kalibrierung des numerischen Modells. Angesichts der idealisierten Versuchsbedingungen ist ein eindimensionaler Berechnungsansatz zu vertreten. Es handelte sich um einen Geschiebetransportversuch mit einer Sedimentmischung unter stationären Abflussbedingungen. Dabei sollten die Vorgänge, die bei der Deckschichtbildung ablaufen, näher untersucht und die Transportraten quantifiziert werden.

Ziel der numerischen Simulation ist die Berechnung der Deckschichtzusammensetzung nach der Versuchszeit, wie sie sich unter den gegebenen Randbedingungen einstellt und ein Vergleich der berechneten Ergebnisse mit den ermittelten Kornzusammensetzungen im Modellversuch. Dafür ist zunächst eine möglichst exakte Erfassung des Versuchsaufbaus im numerischen Modell erforderlich.

4.4.1 Versuchsaufbau und Ergebnisse des Modellversuchs

Das Versuchsgerinne (Abb. 34) besteht aus einem geradlinig verlaufenden Rechteckquerschnitt mit einer Breite von 52 cm und einer konstanten Sohlneigung von 1,55 ‰. Die Versuchsstrecke ist 6,74 m lang, wobei nach einem Meter Vorlaufstrecke das Sohlmaterial beginnt.

Das Gerinne wurde unter stationären Verhältnissen für 24 Stunden mit einem konstanten Abfluss von 14 l/s beschickt. Dabei wurde eine Fließtiefe von 5,9 cm gemessen. Am Ende der Untersuchungsstrecke wurde das ausgetragene Sohlmaterial aufgefangen und gewogen. Die Sieblinie des Ausgangssohlmaterials war bekannt und nach Versuchsende wurden die Sieblinien der Deckschicht und des ausgetragenen Materials bestimmt. Von der Deckschicht wurden hierfür zwei Flächenproben entnommen, einmal wurde die oberste Schicht mittels eines Klebestreifens abgehoben, bei der zweiten Probe mit einer Spachtel abgetragen. Somit konnte man eine Aussage über die Zusammensetzung der Deckschicht treffen und quantifizieren, welche Kornfraktionen in welchem Ausmaß transportiert worden waren. Nach Versuchsende wurde eine annähernd konstante Sohlabsenkung von 0,9 cm gemessen. Das ausgetragene Material wog im feuchten Zustand 22 kg. Allerdings war es mittels der Auffangkonstruktion nicht möglich, Schwebstoffanteile mitzuberücksichtigen, da sich nur die größeren Kornfraktionen am Boden des Behälters absetzten. Somit waren die 22 kg Sedimentaustrag nur ein Anhaltswert, die Kalibrierung sollte auf die Sohlabsenkung von neun Millimetern erfolgen.

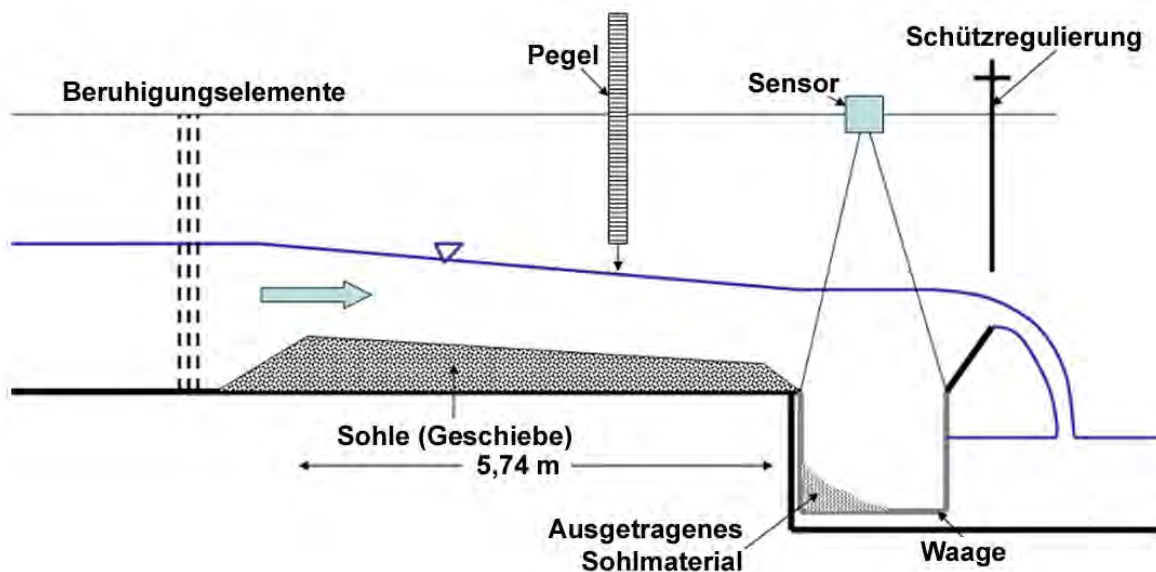


Abb. 34: Versuchsaufbau mit Bemaßung.

Anhand dieser Ausgangsdaten wurde nun ein numerisches Modell für die Berechnung in BASEMENT erstellt. Der eindimensionale Berechnungsansatz wird den Versuchsbedingungen gerecht, da es sich um ein geradliniges Versuchsgerinne ohne Kurvenströmungen oder sonstige Unregelmäßigkeiten handelt. Sowohl die Querschnittsgeometrie, als auch das Abflussgeschehen ist konstant. Als morphologische Transportformel kommt nur der Ansatz von Hunziker (MPM-H) für fraktionsweisen Geschiebetransport in Frage, da die anderen Formeln, die BASEMENT beinhaltet, nicht für die im Versuch verwendeten kleinen Korndurchmesser geeignet sind. Eine Einkornsimulation scheidet auf Grund der Fragestellung aus.

4.4.2 Abbildung der Geometrie

Die Geometrieingabe des Versuchsgerinnes erfolgte im Format FLORIS. Es wurden 17 Querprofile, deren Höhen aus der Vermessung der Ausgangssohllage vorhanden waren, mit jeweils sechs Punkten innerhalb der beweglichen Sohle eingegeben. Der Querschnitt wurde in die Bereiche Hauptkanal (Wände) und bewegliche Sohle unterteilt. Für beide Bereiche wurden die entsprechenden Stricklerwerte eingegeben, die Sohle ist bis zur Stationierung von einem Meter fest (Vorlaufstrecke) und danach beweglich (5,74 m Geschiebe + 3,00 m Nachlaufstrecke).

Die aus drei Querprofilen im Abstand von jeweils einem Meter bestehende Nachlaufstrecke hat die Aufgabe, den störenden Einfluss der unterstromigen Randbedingung für den Geschiebetransport (siehe Kap. 4.4.3) auf die Untersuchungsstrecke zu reduzieren. Als Berechnungsmodus wurde in der Topographie-datei die Interpolation aus einer Tabelle mit entsprechend feinen Intervallabständen gewählt (max. 0,02 und min. 0,005 m zulässige Wasserspiegeldifferenz zwischen zwei Tabellenwerten; vgl. S. 18).

4.4.3 Wahl der Randbedingungen

Als hydraulische Unterstrom-Randbedingung wurden Normalwasserverhältnisse gewählt, wie sie während des Versuchs vorlagen. Hierfür wurde im letzten Querprofil die vorhandene Sohlneigung von 1,55 ‰ angegeben. Oberstromig wurde ein konstanter Abfluss von 14 l/s in der Hydrograph-Datei festgelegt.

Die morphologischen Randbedingungen waren ebenfalls klar gegeben. Da während der gesamten Versuchsdauer kein Geschiebe zugegeben wurde, konnte als oberstromige Randbedingung „Wall“ verwendet werden. Als unterstromige Randbedingung bietet BASEMENT lediglich „IO Down“ an. Das heißt die Sohle des letzten Querprofils befindet sich im Gleichgewicht. Da dies aber für die Versuchsbedingungen nicht zutrifft, muss der Einfluss dieser falschen Randbedingung durch die bereits erwähnte Nachlaufstrecke reduziert werden.

4.4.4 Abbildung der Sieblinie

Da die Berechnung mit der Formel von Hunziker erfolgen sollte, musste die Sieblinie des Sohlmaterials in einzelne Fraktionen unterteilt werden. Zu diesen Fraktionen aus Körnern gleichen Durchmessers müssen die prozentualen Anteile an der Gesamtmischung angegeben werden. Die kontinuierliche Siebdurchgangslinie kann also nur näherungsweise abgebildet werden, die Anzahl an Fraktionen und damit der Grad dieser Näherung ist bestimmt durch die Genauigkeit der zur Verfügung stehenden Informationen bezüglich des Ausgangsmaterials. Beim Modellversuch in Oberrach wurde als Sohlmaterial „Sand 0-3“ verwendet, also von null bis drei Millimetern Korngröße. Vor dem gleichmäßigen Einbau des homogen durchmischten Sohlkörpers mit einer Dicke von etwa zehn Zentimetern, wurde die Sieblinie des Materials durch eine Siebanalyse ermittelt. Dabei wurde das Material durch mehrere Siebe mit verschiedenen Maschendurchmessern gesiebt, anschließend wurden die Massen der Siebrückstände bestimmt. Man erhält somit den Siebdurchgang in Massenprozent. Um diese Information für die Verwendung im numerischen Modell aufzubereiten, sind zwei unterschiedliche Ansätze denkbar. Einerseits kann der arithmetische Mittelwert zweier benachbarter Siebdurchmesser gebildet und der Fraktion i dieser Korngröße der jeweilige prozentuale Anteil zugeordnet werden. Andererseits kann der charakteristische Durchmesser einer Kornfraktion statt der arithmetischen Mittelung auch über den Ansatz

$$D_i^* = \sqrt{d_i \cdot d_{i+1}}$$

berechnet werden, um die logarithmische Skalierung des Siebliendiagramms genauer zu erfassen (geometrisches Mittel). Beide Verfahren sind in Tabelle 15 aufgeführt.

Siebdurchmesser d_i [mm]	Siebdurchgang [%]	D_i (arithmetisches Mittel) [mm]	D_i^* (geometrisches Mittel) [mm]	Anteil der Fraktionen i [%]
8	100	6	5,66	0,9
4	99,1	3	2,83	16,55
2	82,55	1,5	1,41	35,3
1	47,25	0,75	0,71	19,85
0,5	27,4	0,35	0,32	17,7
0,2	9,7	0,15	0,14	6,15
0,1	3,55	0,075	0,07	2,55
0,05	1	0,025	0,01	1
0	0,0			

Tab. 15: Korndurchmesser der verwendeten Fraktionen.

Dargestellt im logarithmisch skalierten Siebliendiagramm (Abb. 35) ergeben sich folgende Kurven, wobei es sich bei der fraktionsweisen Darstellung genau genommen um Balkendiagramme handelt. Die prozentualen Anteile sind aufsummiert, um insgesamt 100 % zu erhalten.

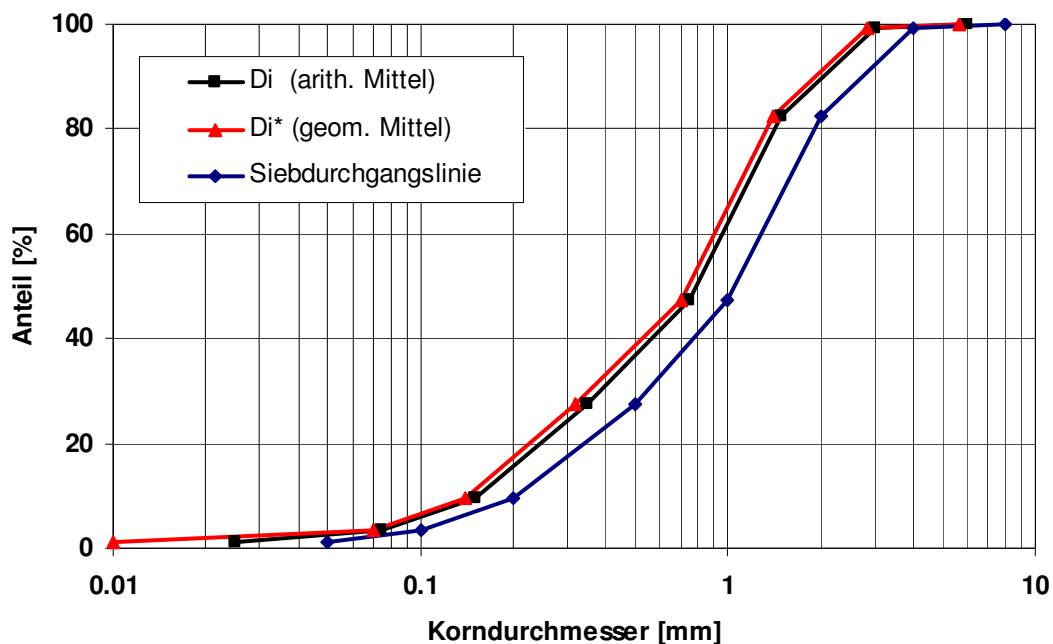


Abb. 35: Siebdurchgangslinie des verwendeten Ausgangssohlmaterials (Sand 0-3) und die Abbildung in BASEMENT.

Um die für die numerische Simulation erforderlichen Informationen über die Sohlbeschaffenheit zu vervollständigen, ist eine geeignete Austausch- und Unterschichtdicke festzulegen. Diese kann im Zuge der Kalibrierung noch angepasst werden, bis die berechnete Sohlveränderung mit der des Versuchs übereinstimmt. Die Dicke des Active-Layers (AL), der Austauschschicht, wurde zu Beginn mit einem Zentimeter angegeben, was in etwa dem dreifachen des d_{90} (ca. 2,8 mm) des Sohlmaterials entspricht. Die Unterschicht bekam eine Höhe von zehn Zentimetern zugewiesen, was den Versuchsaufbau widerspiegelt. Der

Porenanteil des Sohlmaterials lag bei etwa 37 %, sodass hier der im BASEMENT Manual genannte Defaultwert beibehalten werden konnte.

Einstellungen zur Ergebnisausgabe

Da in der endgültigen Simulation vor allem die Zusammensetzung der Deckschicht nach 24 Stunden Versuchsdauer von Interesse ist, wurde diesbezüglich mit Hilfe der BASEMENT Funktion „*Special Output*“ die Option „*mixtures*“ gewählt, die die prozentuale Zusammensetzung von *Active*- und *Sublayer* in einer separaten Datei ausgibt. Veränderlich ist dabei nur die Zusammensetzung der Austauschschicht, die Unterschicht entspricht dem Ausgangsmaterial, was im zugrunde liegenden Schichtenkonzept begründet ist (vgl. Kap. 3.2.6).

4.4.5 Kalibrierung des Modells

Die Kalibrierung des numerischen Modells erfolgte in drei Schritten. Zuerst mussten die hydraulischen Verhältnisse der Realität angepasst werden. Dies geschah mittels einer Wasserspiegelfixierung. Dabei wurde versucht über eine Eichung der Sohlrauigkeiten eine Fließtiefe zu errechnen, die der gemessenen möglichst genau entspricht. Als Parameter für diese Eichung dienen die Stricklerbeiwerte der Untersuchungsstrecke. Die Berechnungen können prinzipiell auch ohne morphologische Betrachtungen durchgeführt werden.

Nachdem der Wasserspiegel dementsprechend eingestellt worden war, folgten in einem zweiten Schritt morphologische Berechnungen mit dem Ziel, die berechneten Sohlveränderungen mit den gemessenen in Einklang zu bringen. Dies war im Modellversuch in Obernach ein durchschnittlicher Sohlabtrag von neun Millimetern, der annähernd parallel zur ursprünglichen Sohlage verlief. Da sich bei der Deckschichtbildung und Selbststabilisierung der neuen Sohlage auch ein neues Sohlgefälle, das sogenannte Gleichgewichtsgefälle nach *Schöberl (1981)* einstellt, war die Parallelität der Erosion kein Zielkriterium. Im Modellversuch war es schwierig, das neue Sohlgefälle genau zu ermitteln, sodass hierzu keine näheren Angaben vorlagen. Das Erosionsverhalten wird grundsätzlich von mehreren Parametern beeinflusst. Da die Stricklerwerte aber nach der Wasserspiegelfixierung nicht mehr verändert werden sollten, blieb allein die Dicke der Austauschschicht als Kalibriergröße. Bei Verwendung der Formel von Hunziker können in BASEMENT keine weiteren Parameter variiert werden.

Der dritte Schritt war die Ermittlung aller gefragten Ergebnisse, wie der Deckschichtzusammensetzung nach Fraktionen und der Masse des ausgetragenen Materials sowie der Vergleich mit den Versuchsergebnissen. Es sind also eine Reihe von Kontrollmöglichkeiten gegeben, die beste Kalibrierung des numerischen Modells stimmt mit möglichst vielen Ergebniswerten des Modellversuchs überein.

Wahl der Stricklerbeiwerte

Als Erstes musste eine Annahme für die Rauigkeiten des Versuchserinnes getroffen werden. Die Wände des geradlinigen Kanals bestanden aus Plexiglas, wofür in BASEMENT ein Stricklerbeiwert von $150 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ angenommen wurde. Der Stricklerwert des Sohlmaterials wurde aus dem d_{90} der Sieblinie (ca. 2,8 mm) mit folgender Formel abgeschätzt:

$$k_{st} = \frac{21 - 26}{\sqrt[6]{d_{90}}}$$

Damit erhält man je nach verwendetem Faktor einen Wert zwischen 55,9 und 69,3 m^{1/3}/s. Als Startwert für die Simulation wurde 56 gewählt, da dieser Wert für das verwendete Sohlmaterial am realistischsten erschien. Rechenläufe mit diesen Rauigkeiten ergaben aber nicht die im Modellversuch gemessene Fließtiefe von 5,9 cm, sondern eine etwas höhere von ungefähr 6,5 cm. Um die im Versuch gemessene Wassertiefe von 5,9 cm zu erreichen, war eine Erhöhung der Stricklerwerte auf 65 für die Sohle und 190 für die Ränder des Gerinnes erforderlich. Diese Werte schienen sehr hoch, es wurden daher beide Varianten kalibriert und berechnet um die Ergebnisse einander gegenüberstellen zu können. Außerdem wurde einmal mit den arithmetisch gemittelten Fraktionsdurchmessern D_i und einmal mit den etwas kleineren, geometrisch gemittelten Durchmessern D_i^* gerechnet, um auch hier die Sensitivität des numerischen Modells beurteilen zu können. Nachstehende Tabelle 16 gibt eine Übersicht der berechneten Szenarien.

Szenario-Nr.	k_{st} Sohle [m ^{1/3} /s]	k_{st} Wände [m ^{1/3} /s]	Verwendete Kornfraktionen	Berechnete Fließtiefe	Kalibrierte AL-Dicke
1	56	150	D_i	6,5 cm	0,010 m
2	56	150	D_i^*	6,5 cm	0,007 m
3	65	190	D_i	5,9 cm	0,015 m
4	65	190	D_i^*	5,9 cm	0,010 m

Tab. 16.: Berechnete Szenarien und kalibrierte Active-Layer (AL) Dicken.

Wahl der Initialbedingung

Da es sich im Modellversuch um stationäre Fließverhältnisse handelte, d.h. Abfluss und Fließtiefe über die gesamte Versuchszeit konstant waren, war die Initialbedingung „Backwater Calculation“ die am Besten geeignete. Hier wurde der konstante Abfluss von 14 l/s und eine Initial-Fließtiefe von sechs Zentimetern für das letzte Querprofil vorgegeben. Damit konnte die Berechnung direkt gestartet werden und es musste nicht erst eine Initialdatei erstellt werden. Der Abfluss im letzten Querprofil wurde über die gesamte Simulationsdauer bei konstant 14 l/s festgehalten, was den Bedingungen des Modellversuchs entsprach. Die Fließtiefe von 5,4 Zentimetern (auf Höhenkote 1,05 m, vgl. Abb. 37) war lediglich ein Startwert, mit dem BASEMENT den tatsächlichen Wasserspiegel berechnete. Dieser lag dann je nach gewählter Kalibrierung der Sohlrauheiten bei 6,5 bzw. 5,9 cm.

Eine Berechnung mit der Initialbedingung „Fileinput“ ist ebenfalls möglich und liefert die gleichen Ergebnisse, wie Kontrollrechnungen belegten.

Tabelle 17 gibt einen Überblick über die gewählten Eingabeparameter zur numerischen Modellierung des Modellversuchs.

Programmversion	Basement V 1.3.3
Geometrie	
Anzahl der Querprofile	20
Querprofile mit beweglicher Sohle	17
Gesamtlänge der Simulationsstrecke	9,74 m
Vorlaufstrecke	1 m
Nachlaufstrecke	3 m
Stricklerbeiwert der Sohle	56 / 65 m ^{1/3} /s
Stricklerbeiwert der Ränder	150 / 190 m ^{1/3} /s
Hydraulische Randbedingungen	
Oberstrom	Konstanter Abfluss Q = 14 l/s
Unterstrom	Normalwassertiefe
Initialbedingung	Backwater Calculation / Fileinput
Simulationsdauer	86400 s = 24 h
Morphologische Randbedingungen	
Oberstrom	Wall (kein Geschiebeeintrag)
Unterstrom	IO Down (Gleichgewicht)
Transportformel	MPM-H
Morphologische Parameter	
Kornfraktionen	8 (D_i bzw. D_i^*)
Active Layer Dicke	Variabel (Kalibriergröße), Startwert 1 cm
Sublayer Dicke	10 cm

Tab. 17: Übersicht der verwendeten Eingabeparameter.

Mit diesen Eingangsgrößen konnten erste Rechenläufe durchgeführt werden. Dabei ergab sich auf Anhieb ein sauberes Erosionsbild (Abb. 36). Somit konnte die Kalibrierung auf die Sohlabsenkung von neun Millimetern erfolgen. Der Startwert für die Active-Layer-Dicke von einem Zentimeter lieferte beim ersten Szenario bereits eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Zum Vergleich sind nachfolgend noch die Ergebnisse für zwei andere Austauschschichtdicken dargestellt. Bei den anderen drei berechneten Szenarien sah das Erosionsbild qualitativ gleich aus, allerdings ergaben sich für den angestrebten Sohlabtrag andere Active-Layer-Dicken von sieben bis 15 Millimetern (siehe Tab. 16), die aber alle innerhalb des vertretbaren Bereichs lagen.

Mit den auf den beobachteten Sohlabtrag kalibrierten Modellen wurde nun weitergearbeitet. Betrachtet man für diese Konfigurationen den berechneten Wasserspiegel (Abb. 37) im Endzustand nach 24 Stunden Versuchsdauer, so fällt auf, dass dieser bei Beginn der Sohlabsenkung leicht ansteigt, es stellt sich hier eine Fließtiefe von etwa 6,2 cm (für die Szenarien-Nr. 3 und 4) ein. Die leichte Erhöhung des Wasserspiegels ist auf die unterstromigen Randbedingung Normalwassertiefe zurückzuführen, die im letzten Querprofil eingehalten werden muss, während die morphologische Randbedingung (Gleichgewicht) die Höhenlage des letzten Querprofils fixiert. Dies führt zu einer Reduktion der Fließgeschwindigkeit im erodierten Bereich. Im Modellversuch erfolgte die Abflussregelung über ein festes Wehr, sodass hier der Wasserspiegel über den Versuchszeitraum konstant gehalten werden konnte. Diese Randbedingung ist im numerischen Modell ausreichend genau wiedergegeben.

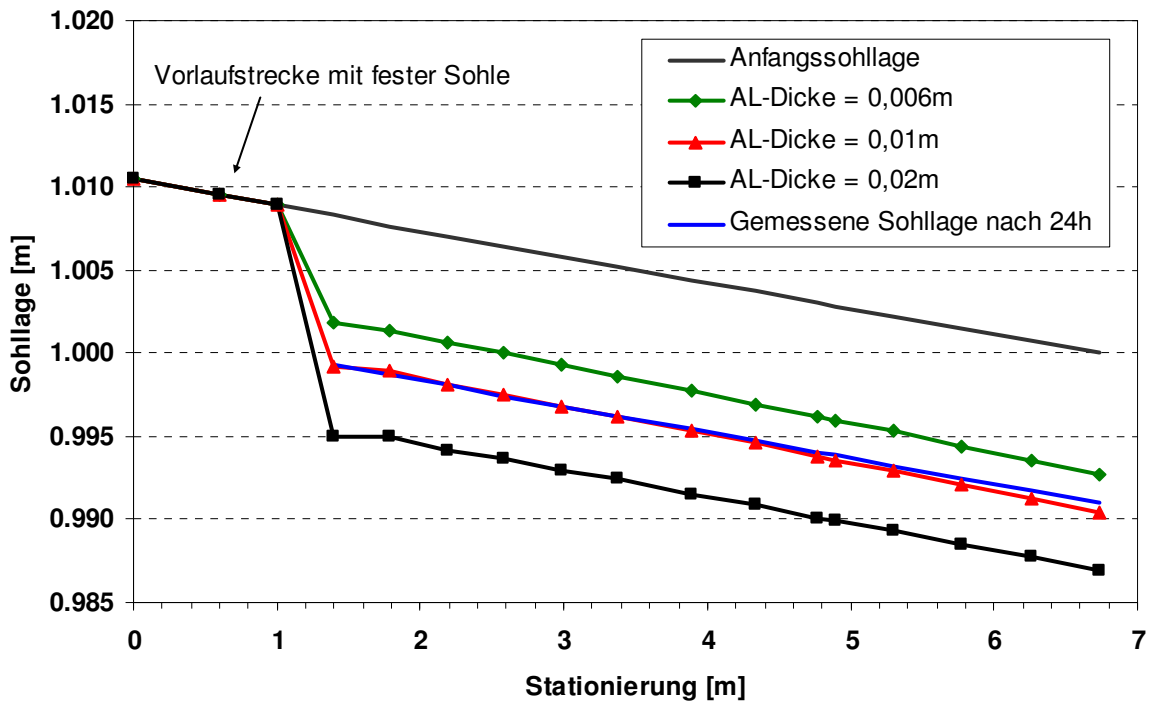


Abb. 36: Berechnete Sohllagen nach 24 h mit verschiedenen Active-Layer (AL) Dicken, Szenario 1 mit arithmetisch gemittelten Kornfraktionen D_i und Stricklerwerten von 56 und 150 $m^{1/3}/s$.

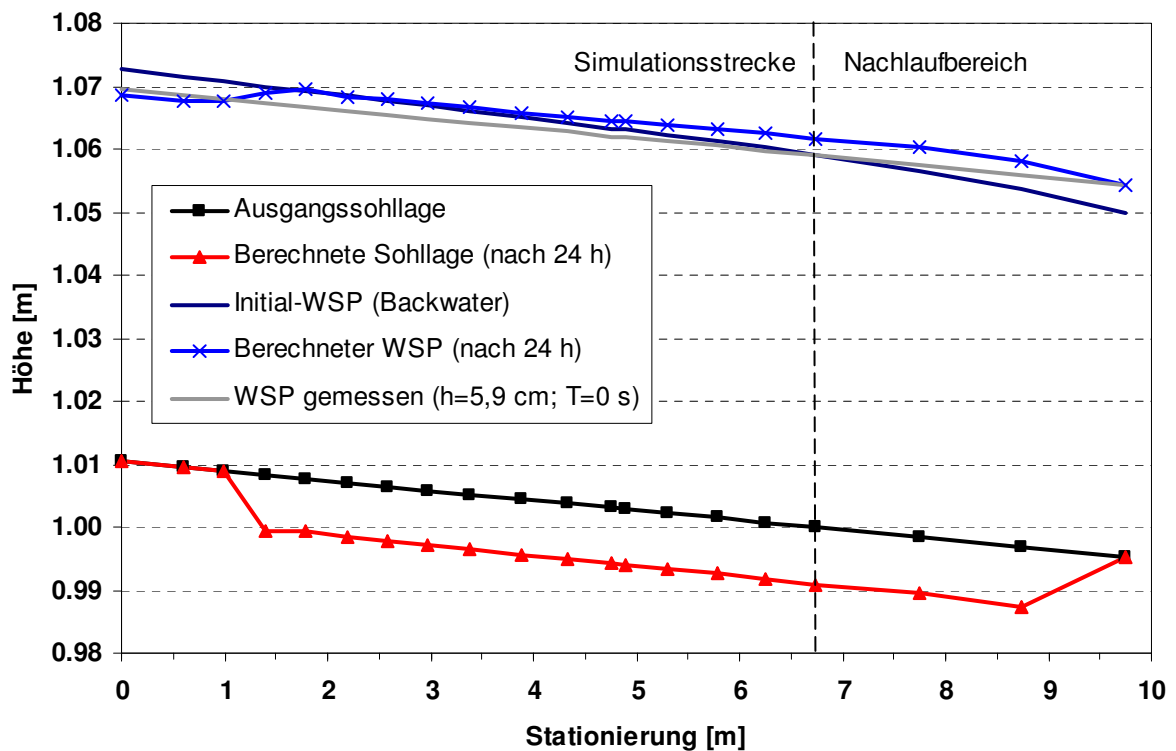


Abb. 37: Veränderte Wasserspiegellage nach 24 h (Szenario 3, vgl. Tab. 16).

4.4.6 Ergebnisse

Es genügt jedoch nicht, das numerische Modell lediglich so zu kalibrieren, dass sich in der gewählten Simulationsdauer ein bestimmter Sohlabtrag einstellt, vielmehr gilt es zu prüfen, ob die Kriterien für eine Deckschichtbildung erfüllt und im Modell richtig erfasst worden sind. Eine Deckschicht kann sich nur unter bestimmten Abflussvoraussetzungen bilden. Wird der sogenannte kritische Abfluss überschritten, ist das Erosionspotential an der Sohle so groß, dass sich diese nicht mehr selbst stabilisieren kann. Die Erosion würde in diesem Fall linear fortschreiten, bis bei entsprechend langer Versuchsdauer das gesamte bewegliche Sohlmaterial ausgetragen ist. Bei der Deckschichtbildung kommt die Erosion aber nach einiger Zeit zum Erliegen, nämlich dann, wenn die Oberfläche sich entsprechend vergrößert hat und die vorhandenen Schubspannungen nicht mehr ausreichen, um dieses Material weiter zu transportieren. Außerdem verändert sich die Lage der Körner zueinander derart, dass die groben Körner einen Abschirmeffekt auf feinere Fraktionen ausüben. Ist die Deckschichtbildung abgeschlossen, befindet sich die Flusssohle für den vorhandenen Abfluss in einem Gleichgewichtszustand, bei dem sich auch ein neues Sohlgefälle einstellt.

Es galt also zunächst zu prüfen, ob diese Kriterien in den Simulationsergebnissen wiederzuerkennen waren. Dies ist am Besten ersichtlich, wenn man die Entwicklung der Sohle eines charakteristischen Querprofils aus der erodierten Strecke über den gesamten Simulationszeitraum betrachtet (siehe Abb. 38). Man kann erkennen, dass die Erosion zu Beginn der Simulation sehr stark fortschreitet und nach etwa einem Drittel der Simulationszeit weitgehend abgeschlossen ist. Danach ändert sich das Sohlniveau nur noch kaum, was auf die Ausbildung einer stabilen Deckschicht zurückzuführen ist. Bei einer verlängerten Simulationsdauer von 48 Stunden wurde die gleiche Sohlage wie nach 24 Stunden berechnet, die Erosion ist also vollständig abgeschlossen.

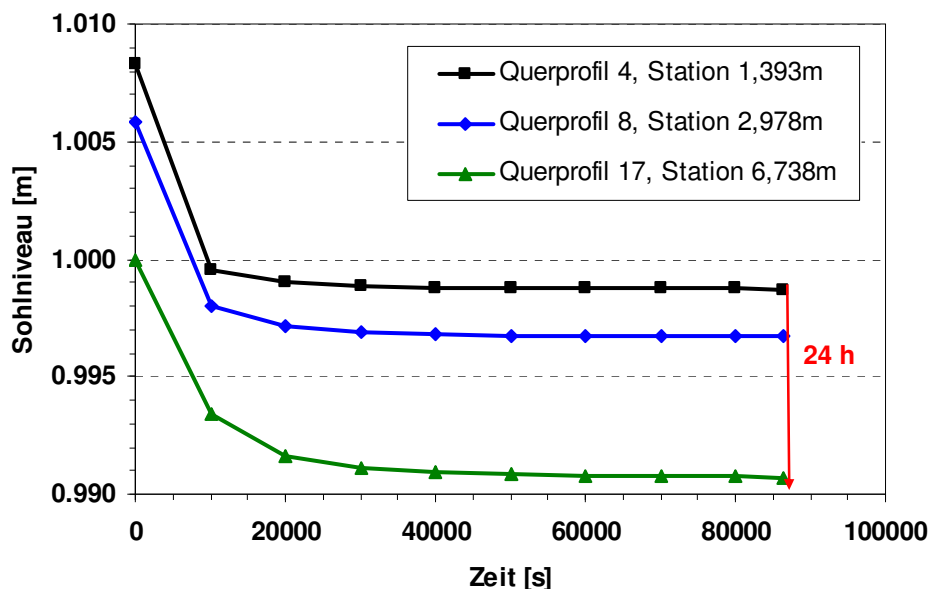


Abb. 38: Veränderung des Sohl-niveaus über die Simulationsdauer von 24 Stunden, Szenario 3 (k_{st} : 65 / 190; AL-Dicke = 15 mm; arithmetisch gemittelte Korndurchmesser D_i).

Im nächsten Schritt mussten nun die berechneten Deckschichtzusammensetzungen der einzelnen kalibrierten Modelle (vgl. Tab. 16) untersucht werden. Die Ausgabe der prozentualen Anteile der einzelnen verwendeten Kornfraktionen kann entweder in der *Sedimentout*-Datei oder – in etwas übersichtlicherer Form – in der *Tecplot*-Datei eingesehen werden. Das Diagramm Abb. 39 zeigt die mit den verschiedenen Konfigurationen errechneten Deckschichtzusammensetzungen nach 24 Stunden.

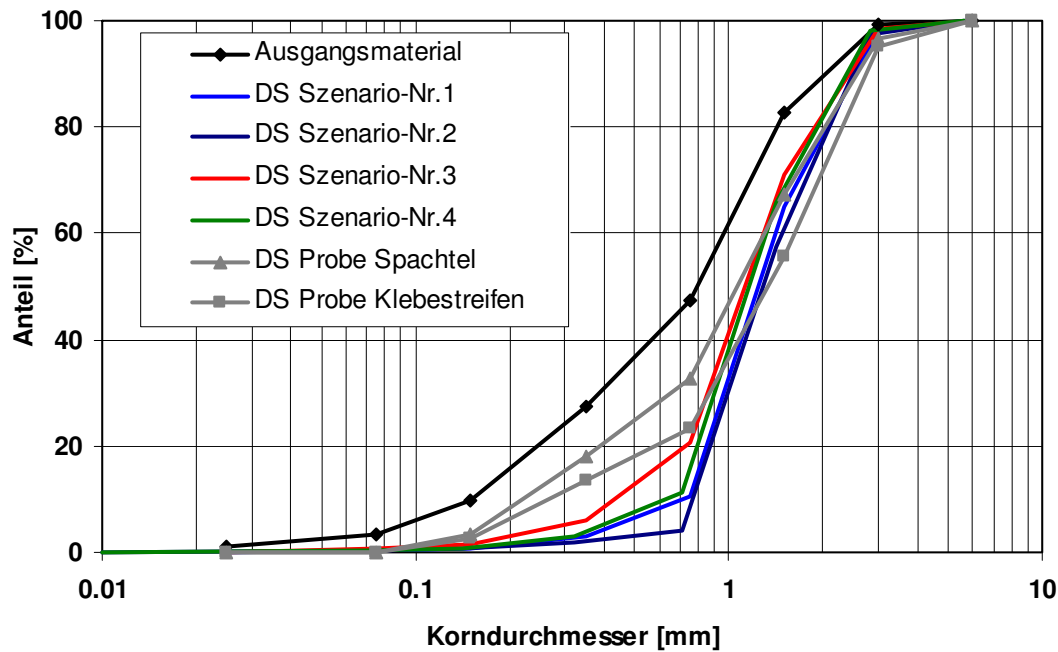


Abb. 39: Berechnete Deckschichtzusammensetzungen (DS) nach 24 h für die vier kalibrierten Szenarien (siehe Tab. 16).

Die Vergrößerung gegenüber dem Ausgangsmaterial ist in allen vier Szenarien gut ersichtlich, im Feinkornbereich weichen die Linien aber deutlich von den entnommenen Proben ab. Bei beiden Verfahren der Probenahme (Spachtel und Klebestreifen) handelt es sich um Flächenproben, die im Gegensatz zu Volumenproben stärkeren Streuungen unterliegen. Bei der mit der Spachtel genommenen Probe ist es wahrscheinlich, dass auch feineres Unterschichtmaterial mitentnommen wurde. Die Klebestreifenprobe fällt insgesamt gröber aus. Das Ergebnis von Szenario 3 (Fließtiefe 5,9 cm, arith. gemittelte Korndurchmesser D_i , AL-Dicke 15 mm) liegt insgesamt am nächsten an den Versuchsergebnissen. Szenario 2 (Fließtiefe 6,5 cm, geom. gem. Kornfraktionen D_i^* , AL-Dicke 7 mm) weicht am stärksten von den Proben ab.

Die Kalibrierungen mit der größeren Fließtiefe von 6,5 cm (Szenarien-Nr. 1 und 2) führten zu gröberer Deckschichtzusammensetzungen als die mit der korrekten Fließtiefe von 5,9 cm. Ebenso wurden mit den etwas feineren, geometrisch gemittelten Kornfraktionen (Szenarien-Nr. 2 und 4) gröbere Deckschichten berechnet. D.h. Material unter einem Millimeter Durchmesser war weniger vorhanden, was angesichts des feineren Ausgangsmaterials plausibel ist. Die größte kalibrierte Active-Layer-Dicke von 15 Millimetern in Szenario-Nr. 3 ergab den höchsten Feinkornanteil in der Deckschicht, die kleinste von 7 Millimetern in Szenario-Nr. 2 führte zur deutlichsten Auswaschung von Feinkorn.

Anhand des Rechenlaufs von Szenario-Nr. 3 wurden weitere Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung der Deckschichtbildung durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 40 dargestellt.

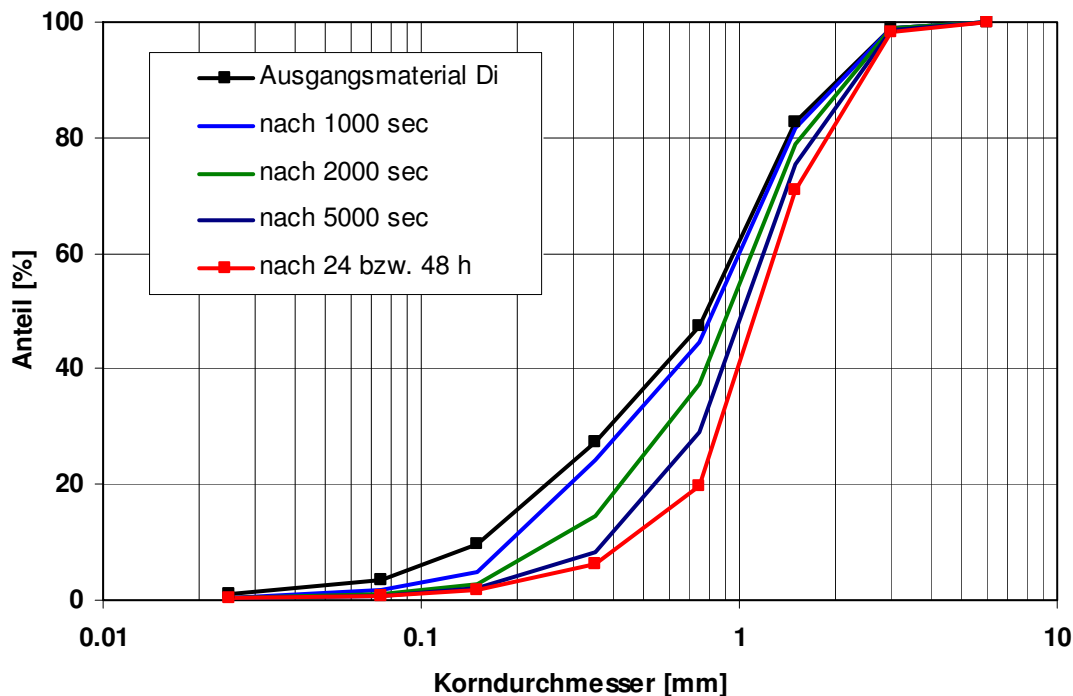


Abb. 40: Zeitliche Entwicklung der Deckschichtzusammensetzung in Szenario-Nr. 3 (CS 8).

Die Kornzusammensetzung in der Deckschicht entwickelt sich analog zum Sohlniveau (vgl. Abb. 38). Die großen Sohländerungen zu Simulationsbeginn führen zu einer raschen Vergrößerung der Deckschicht während der ersten Stunden. Nach einer Simulationszeit von 20000 Sekunden (im Diagramm zwecks der Übersichtlichkeit nicht dargestellt) entspricht die Deckschichtzusammensetzung fast dem Endzustand nach 24 Stunden. Ist ein stabiler Zustand erreicht, kann theoretisch unendlich lange weitergerechnet werden. So ergaben sich nach einer Simulationsdauer von 48 Stunden keine Änderungen sowohl in der Sohlage als auch in der Deckschichtzusammensetzung.

Die berechneten Deckschichtzusammensetzungen der vier kalibrierten Szenarien sind qualitativ ähnlich zueinander, die Abweichungen sind, auf Grund der unterschiedlichen Annahmen in den Eingangsdaten, nachvollziehbar. Die Zusammensetzung des ausgetragenen Materials ergibt sich aus der Differenz der Sieblinien des Ausgangsmaterials und der Deckschicht. Das ausgetragene Material muss demnach feiner als das Ausgangsmaterial sein. Dies ist bei allen berechneten Kornverteilungen der Fall, allerdings nicht in den im Versuch ermittelten Daten (siehe Abb. 41). Das ausgetragene Material wurde dort am Ende der Versuchsstrecke auf einer Tellerwaage aufgefangen und gewogen. Feinanteile setzten sich aber nicht am Tellergrund ab, sondern wurden in Suspension weitertransportiert. Damit wurde durch diese Auffangkonstruktion vermutlich nur das rollende Geschiebe von der Sohloberfläche erfasst. Die große Menge an nicht berücksichtigtem Feinkorn dokumentiert sich auch in der gewogenen Masse von 22 kg an ausgetragenen Sediment. Berechnet man überschlägig das Volumen des ausgetragenen Material ($0,9 \text{ cm} \cdot 52 \text{ cm} \cdot 574 \text{ cm}$) und multipliziert es mit der Dichte (2650 kg/m^3) abzüglich des Porenanteils (30 – 40 %) erhält man einen deutlich höhere Masse von 40 bis 50 kg. Das in BASEMENT berechnete

ausgetragene Sedimentvolumen stimmt mit dieser Abschätzung größenordnungsmäßig überein. Abbildung 41 zeigt das im Versuch ermittelte ausgetragene Material, das weniger Feinkornanteile als das Ausgangsmaterial enthält und die berechnete, qualitativ korrekte, Zusammensetzung des ausgetragenen Materials.

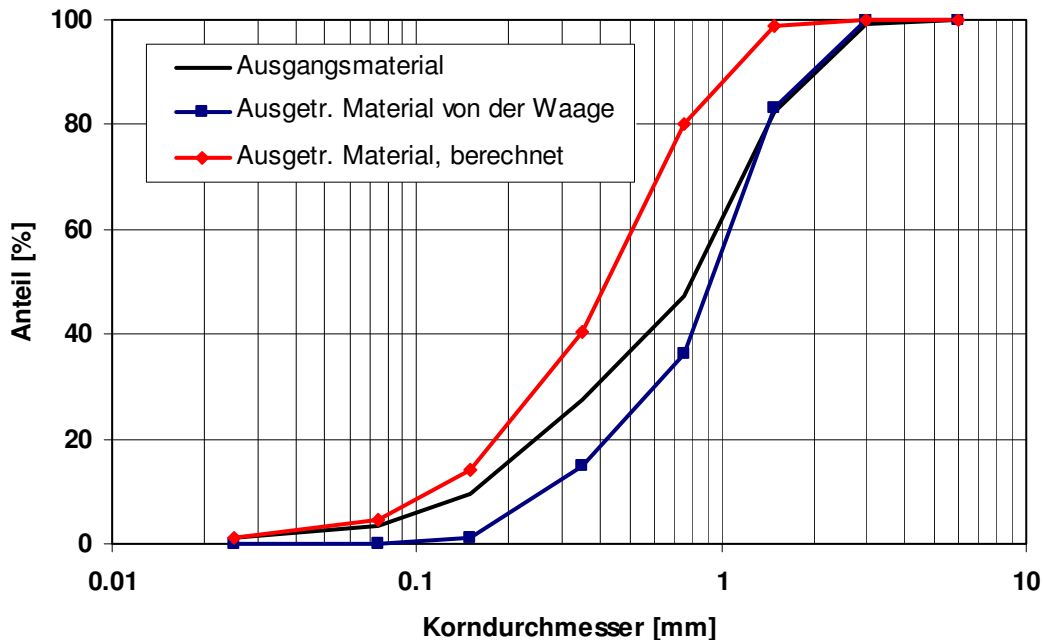


Abb. 41: Zusammensetzung des ausgetragenen Materials, Szenario 1 ($k_{st} = 56 / 150$; AL-Dicke = 10 mm; arithmetisch gemittelte Korndurchmesser D_i).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die berechneten Ergebnisse für alle vier Szenarien zufriedenstellend ausfielen. Die Rechenzeiten betragen für dieses Beispiel ca. 20 Minuten, was ein zügiges Arbeiten ermöglichte. Bei der Kalibrierung musste jedoch ein Kompromiss eingegangen werden. Entweder man fixierte den Wasserspiegel auf die Fließtiefe von 5,9 cm und nahm die dafür erforderlichen hohen Stricklerwerte in Kauf, oder man wählte die plausibler erscheinenden Rauigkeiten und rechnete dafür mit einem etwas höheren Wasserspiegel, der wiederum einen Einfluss auf das Transportverhalten der kleineren Kornfraktionen hatte. Bei der Eingabe der Sieblinien waren arithmetisch gemittelte Korndurchmesser ein gangbarer Weg, die kalibrierten Austauschschichtdicken bewegten sich zwischen sieben und fünfzehn Millimetern, was realistisch ist. Bei dünneren Austauschschichten wurden feine Kornfraktionen schneller und in höherem Maße ausgewaschen, wie man den Deckschichtkornverteilungen entnehmen kann. Das Ergebnis von Szenario 3 ($k_{st} = 65 / 190$; AL-Dicke = 15 mm; D_i) lag den im Modellversuch ermittelten Deckschichtzusammensetzungen am nächsten.

4.5 Beispiel 5: Wertachhochwasser 2005

Im fünften Beispiel soll die Ebene der akademischen Beispiele und Laborversuche verlassen und ein reales Szenario im numerischen Modell erfasst und kalibriert werden. Dafür wurde ein Hochwasserereignis am bayerischen Lechzufluss Wertach im Stadtgebiet von Augsburg ausgewählt, das Ende August des Jahres 2005 stattfand. Im Rahmen des Projektes Wertach Vital, das Renaturierungsmaßnahmen kombiniert mit einem verbesserten Hochwasserschutz an diesem Flussabschnitt beinhaltet, wurden für diesen Bereich zahlreiche Daten ermittelt, die die Grundlage für das numerische Modell und die erforderliche Kalibrierung bilden. So lag eine Geschiebeanalyse des bayerischen Landesamtes für Umwelt vor. Außerdem wurde die Strecke kurze Zeit vor und nach dem Hochwasserereignis vermessen, sodass die durch den Hochwasserabfluss entstandenen Sohlveränderungen bekannt waren. Darüber hinaus wurden zu diesem Beispiel bereits numerische Untersuchungen von der TU München durchgeführt, womit eine weitere Vergleichsmöglichkeit bestand.

4.5.1 Beschreibung der Ausgangssituation

Neben der Einsicht in die Vermessungsdaten war es zunächst erforderlich, sich ein genaues Bild der zu simulierenden Flussstrecke zu machen. Dabei war vor allem die Lage von Bauwerken wie Wehranlagen, Brücken, Stufen oder Rampen von Interesse. Daneben waren die Querprofile auf Unregelmäßigkeiten hinsichtlich der Geometrie zu prüfen. Dies können Aufweitungen, Engstellen oder starke Änderungen des Sohlgefälles sein. Nachdem dieser Überblick gewonnen war, konnte eine geeignete Untersuchungsstrecke festgelegt werden. Dabei spielt die Modellierung der Randbedingungen eine entscheidende Rolle.

Die Vermessungsdaten der Querprofile (Abb. 43) lagen von Flusskilometer (Fkm) 5,8 bis 8,4 in einem Abstand von jeweils 200 Metern vor. Bei Fkm 0 mündet die Wertach in den Lech. Innerhalb dieser Strecke befindet sich das Ackermann-Wehr (bei Fkm 8,250) und eine raue Rampe (Fkm 5,878 – 5,850) im Anschluss an den Mühlbach-Düker, der bei Fkm 5,878 die Wertach unterquert. Der Düker (Abb. 45 und 46) stellt eine Sohlschwelle mit einer Höhe von einem Meter dar. Der befestigte Vorboden befindet sich auf einer Höhe von 476,73 m ü. NN, die Höhe der Schwellenkronen ist somit bei 477,73 m ü. NN.

Anhand dieser Informationen konnte eine Untersuchungsstrecke festgelegt werden. Diese beginnt bei Fkm 8,2, also ca. 50 Meter nach dem Ackermann-Wehr und endet bei Fkm 5,878, dem Mühlbach-Düker. Das Flussbett der Wertach verläuft in diesem Bereich weitgehend geradlinig und weist keine starken Kurven oder Mäandrierungen auf, was eine Erfassung im 1D Modell zulässt. Abbildung 42 gibt einen Überblick über die Simulationsstrecke, in Abbildung 43 ist der Längsschnitt der Strecke dargestellt. Der Längsschnitt zeigt das aus den Querprofilen berechnete mittlere Sohlniveau. Die Rampe bei Fkm 5,878 wurde nur in der zweiten Vermessung am 26.09.2005 aufgenommen.



Abb. 42: Lageplan der Untersuchungsstrecke (Luftbild, Quelle: Google Earth).

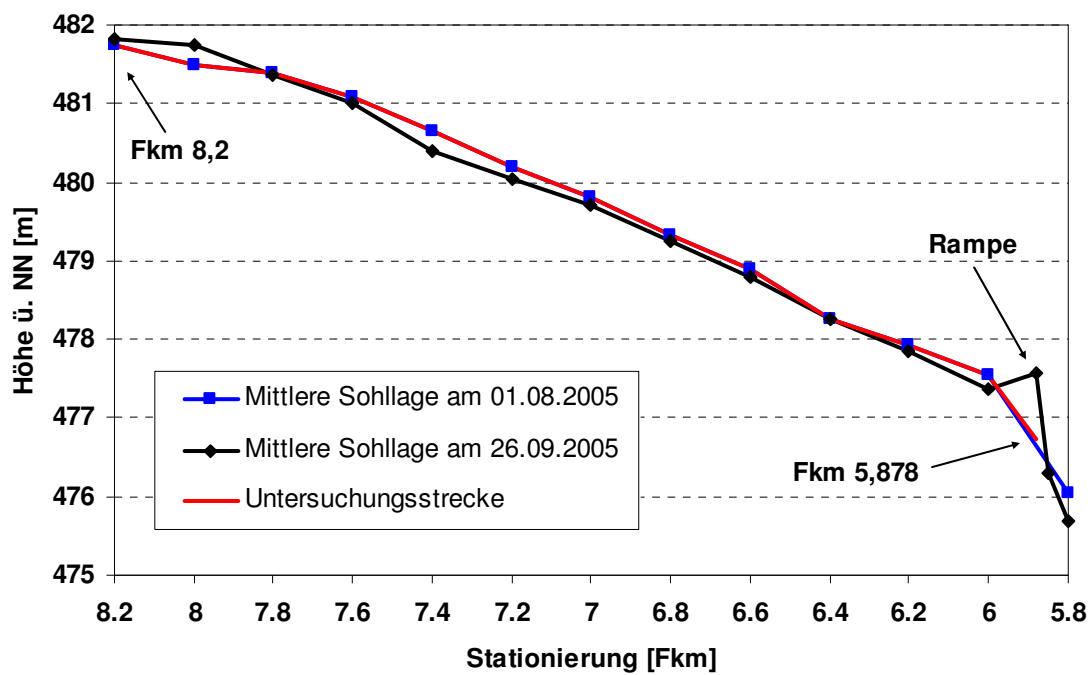


Abb. 43: Längsschnitt der Untersuchungsstrecke (mittlere Sohlagen).

Als Ziel der Berechnungen soll versucht werden, die bekannten Sohlveränderungen innerhalb der Strecke im numerischen Modell möglichst genau zu erfassen, bei einer gleichzeitigen Eichung des Geschiebeeintrags in den betrachteten Abschnitt. Dieser war mit rund 10200 m³ während des Untersuchungszeitraumes gegeben. Abbildung 44 zeigt die Sohlveränderungen in Talweg und mittlerer Sohlage, die während des Hochwassers stattfanden. Die Volumenbilanz für das transportierte Geschiebe ergibt sich näherungsweise aus dem Produkt der mittleren Sohländerungen, der zugehörigen Gerinnebreite und dem Abstand der Querprofile. Die Volumenbilanz ist somit proportional zur Änderung der mittleren Sohlagen. Da sich Erosionen und Anlandungen im 1D-Modell gleichmäßig über den Querschnitt verteilen, kann die gemessene Änderung des Talwegs nicht als Grundlage zur Kalibrierung herangezogen werden. Sie dient nur als Vergleichswert, der Referenzwert für die Berechnungen ist die gemessene mittlere Sohländerung.

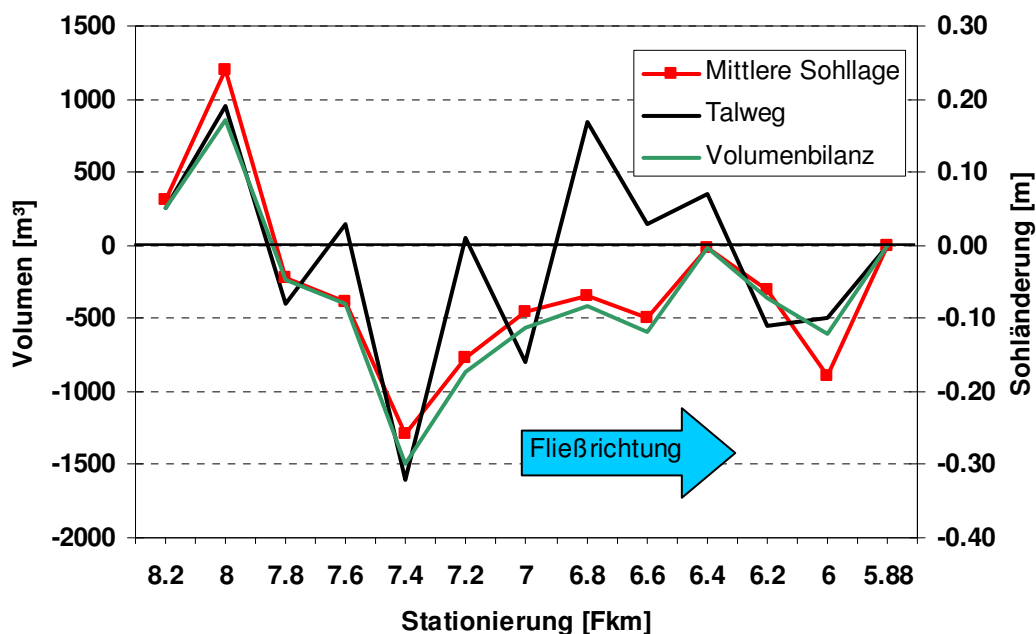


Abb. 44: Volumenbilanz und gemessenen Sohländerungen der Wertach, Hochwasser 2005.

4.5.2 Abbildung der Geometrie

Bis die Simulation gestartet werden kann sind eine Reihe vorbereitender Arbeitsschritte nötig. So müssen zunächst die geometrischen Gegebenheiten der Untersuchungsstrecke in BASEMENT erfasst werden.

In den Querprofilen waren für alle Punkte Zuordnungen zu Kategorien, wie bewegliche Sohle oder bewachsenes Vorland, vermerkt, sodass die Konvertierung der Daten ins FLORIS-Format geschehen konnte. Das letzte Querprofil bei Fkm 5,878 war in den Daten vom August allerdings nicht enthalten und wurde deshalb anhand eines Planes (Mühlbadücker, Abb. 46) und der Vermessungsdaten vom 26.09.2005 rekonstruiert. Dabei wurden die Uferböschungen aus der Vermessung übernommen, die Sohle allerdings waagrecht auf der Höhe 476,73 m ü. NN fixiert. Die Sohle wurde in diesem Querprofil (unmittelbar vor der Schwelle)

als unbeweglich angenommen. Die Geometrie dieses Querprofils ist in Abbildung 48 dargestellt.

Die Modellierung der Sohlschwelle am Ende der Untersuchungsstrecke kann entweder durch ein zusätzliches Querprofil in der Geometrie erfolgen, das die Schwellenkronen darstellt, oder die Geometrie kann mit dem Querprofil unmittelbar vor der Schwelle enden und die Fließtiefe als Randbedingung vorgegeben werden. Diese Fließtiefe entspricht der Summe von Schwellenhöhe und kritischer Fließtiefe, die auf der Schwelle angenommen wurde.

Die geometrische Modellierung der Unterstrom-Randbedingung unter Verwendung der Rampengeometrie hatte eine starke Anlandung vor der Schwelle zur Folge. Deshalb wurde die Untersuchungsstrecke verkürzt und endete nun unmittelbar vor der Schwelle.



Abb. 45: Mühlbachdüker (Sohlschwelle) bei Fkm 5,878 (Quelle: Fotodokumentation BCE, aus Präsentation Wertach Vital, M. Grünzner, TUM).

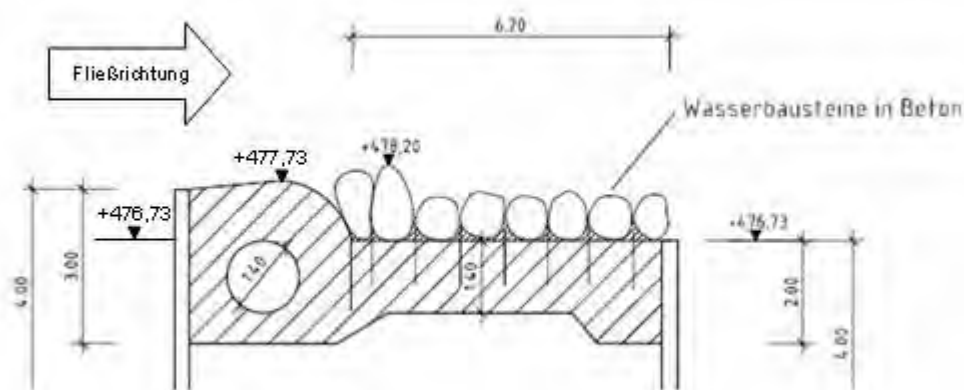


Abb. 46: Längsschnitt des Dükers (Grünzner et al. 2007).

Analog zu den Untersuchungen, die von der TU München im Rahmen des Projekts Wertach Vital mit dem Programm 1D – SEP durchgeführt wurden, wurde die morphologische Schwelle auf Höhe 476,73 m ü. NN und die hydraulische Schwelle einen Meter höher fixiert. Mit dieser Annahme war die beste Übereinstimmung mit dem Geschiebehaushalt der Strecke erzielt worden (Grünzner 2007). Die Kalibrierung erfolgte anhand von Volumenbilanzen.

4.5.3 Randbedingungen

Neben der korrekten Abbildung der Geometrie ist eine möglichst genaue Erfassung der Randbedingungen entscheidend für die Güte des numerischen Modells.

Hydraulische Randbedingungen

Als hydraulische Oberstrom-Randbedingung dient die Ganglinie des Hochwasserereignisses. Diese konnte anhand von Abflussmessungen der Pegelstation Türkheim (Lage bei Fkm 45,4) rekonstruiert werden. Untersuchungen im Vorfeld ergaben, dass die Pegelwerte um 15 % erhöht werden müssen, um den Zufluss im Zwischeneinzugsgebiet zu berücksichtigen. Die Abflusswerte lagen als Tagesmittelwerte und Terminwerte mit Messintervallen von 15 bis 60 Minuten vor.

Die Simulationsdauer war durch das Datum der beiden Streckenvermessungen vorgegeben. Folglich wurden die Abflussdaten für den Zeitraum vom 01.08. bis zum 26.09.2005 als Ganglinie verwendet. Während des Hochwasserabflusses (22.–25.08) wurde mit den Terminwerten gearbeitet, da sie die besonders geschiebewirksamen Abflussspitzen beinhalten. Für den übrigen Zeitraum wurden die Tagesmittelwerte benutzt. Abbildung 47 zeigt die Ganglinie für die BASEMENT-Simulationsdauer in Sekunden.

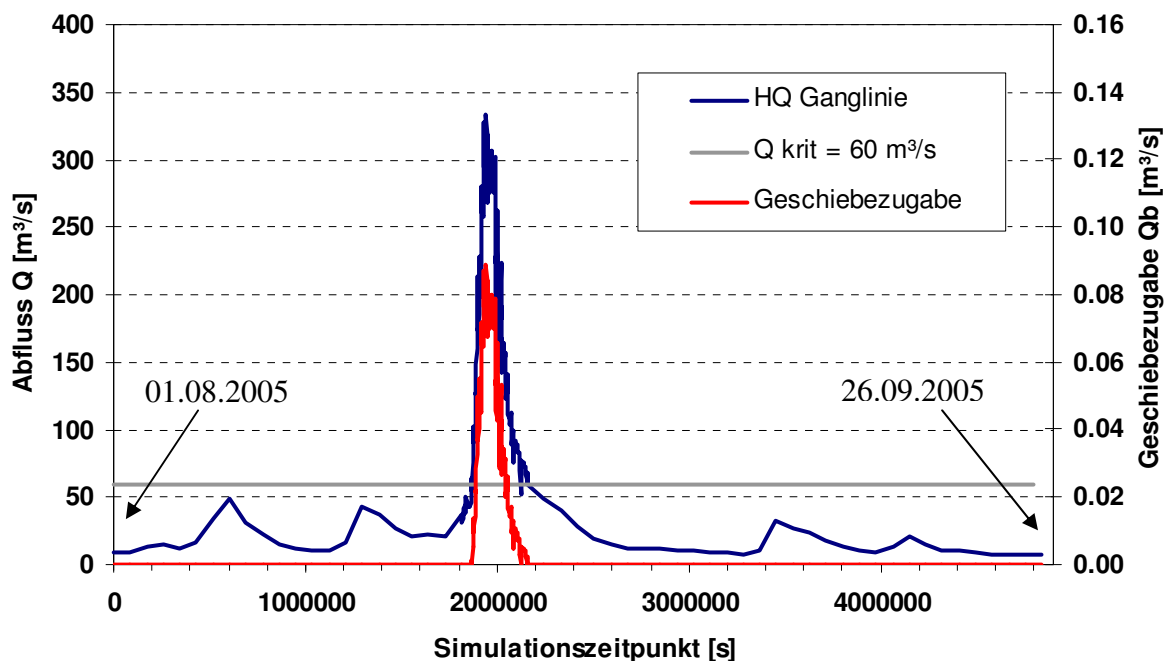


Abb. 47: Abflussganglinie und Geschiebeeintrag in die Untersuchungsstrecke über die Simulationsdauer.

Die Unterstrom-Randbedingung (Fließtiefe auf der Sohlschwelle) kann auf mehrere Arten vorgegeben werden. Sie soll gleich der kritischen Fließtiefe sein. Dieser Ansatz überschätzt die Stützwirkung der Schwelle nach oberstrom nicht und liegt damit auf der sicheren Seite. Bei höheren Fließtiefen ergeben sich kleinere Strömungsgeschwindigkeiten und das Erosionspotential wird geringer.

Als Randbedingung kann diese Fließtiefe entweder über eine H-Q Beziehung oder über ein Wehr vorgegeben werden. Die beste Lösung schien eine H-Q Datei zu sein, da diese Randbedingung in der OV 1.3 aber nicht funktionierte, wurde zunächst ein Wehr verwendet. Hier berechnet BASEMENT die Überfallhöhe nach Poleni. Um diese Überfallhöhe gleich der kritischen Fließtiefe werden zu lassen war allerdings ein unrealistisch hoher Polenibeiwert von 1,1 erforderlich. Mit diesen Einstellungen stimmten die Wasserspiegellagen im letzten Querprofil aber mit den angestrebten Fließtiefen überein. Abbildung 48 zeigt das trapezförmige Wehrprofil, das als Randbedingung zur Modellierung der Schwelle verwendet wurde.

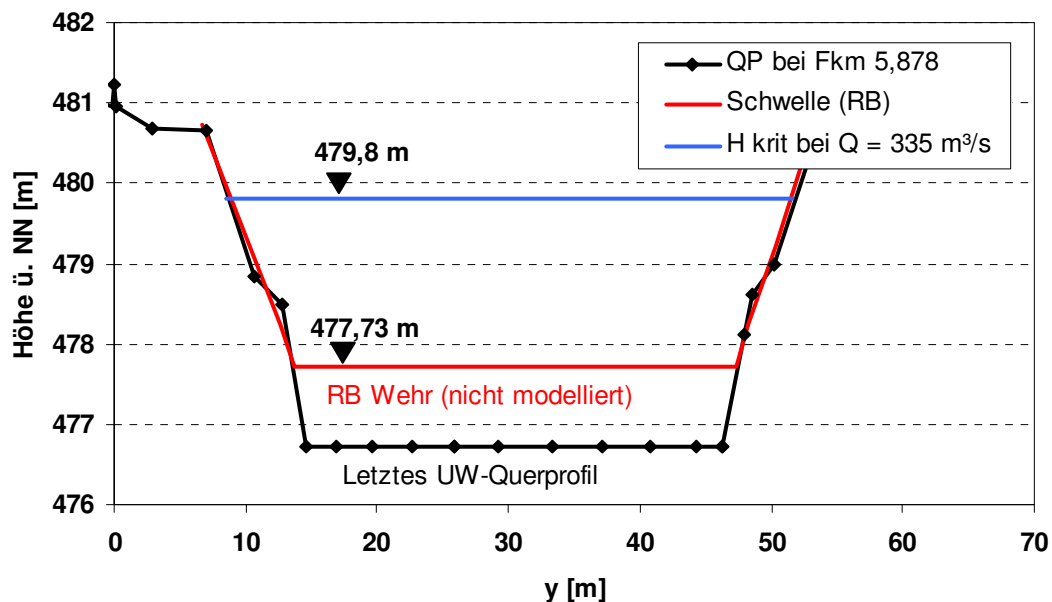


Abb. 48: Unterstrom-RB Wehr und vorgegebene kritische Fließtiefe bei Q_{max} .

Die Kenngrößen der Unterstrom-Randbedingung Wehr sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

Randbedingung Wehr	
Wehrhöhe	1,0 m
Kronenbreite	33,63 m
Böschungsneigung	1 : 2
Polenibeiwert	1,1 (für kritische Fließtiefe)

Tab. 18: Geometrie und Abflussbeiwert des Wehres.

Das Beispiel wurde später noch mit der Randbedingung H-Q Beziehung berechnet, die in der korrigierten BASEMENT Version 1.3.1 zur Verfügung stand. In dieser Datei wurde die kritische Fließtiefe für verschiedene Abflüsse plus einen Meter Schwellenhöhe vorgegeben.

Morphologische Randbedingungen

Auf der Oberstromseite erfolgte während des Hochwassers Geschiebeeintrag in die Untersuchungsstrecke. Dieser wurde über die Randbedingung „*Sediment Discharge*“ vorgegeben. Dabei war eine Datei mit der zeitabhängigen Geschiebezugabe in m^3/s anzulegen.

In den untersuchten Streckenabschnitt fand ein Geschiebeeintrag von rund 10200 m^3 während der Simulationsdauer statt. Der höchste Geschiebezufluss während des Hochwasserspitzenabflusses von $335 \text{ m}^3/\text{s}$ war mit 185 kg/s gegeben. Der kritische Abfluss, bei dem Geschiebebewegung einsetzt, sollte bei $60 \text{ m}^3/\text{s}$ liegen, dazwischen wurde ein linearer Zusammenhang angenommen.

Um die Geschiebezugabe möglichst genau mit der Hochwasserganglinie zu synchronisieren wurden ebenfalls Terminwerte verwendet. Die zur Abflussganglinie korrespondierende Geschiebezugabe ist in Abbildung 47 dargestellt. Dabei wurde eine Dichte von 2650 kg/m^3 für das Geschiebe angenommen.

Integrierte man die so berechnete Geschiebezugabe über die Simulationszeit, erhielt man ein Volumen von 8033 m^3 . Um die Zugabefunktion auf die gegebenen 10200 m^3 Geschiebeeintrag zu eichen, wurden die Werte mit dem Faktor 1,27 multipliziert. Die Summenfunktion im BASEMENT-Block „*Special Output*“ erlaubt eine Kontrolle des eingetragenen Geschiebevolumens. Dabei wurde ein Geschiebeeintrag von 10163 m^3 in das erste Querprofil berechnet.

Da der Geschiebezufluss von 185 kg/s gegeben war und nicht erhöht werden sollte, wurde davon ausgegangen, dass das Gewicht der eingetragenen Geschiebemenge unverändert blieb. Rechnerisch ergab dies einen Porenanteil von $21,25 \%$ bei der angenommenen Dichte von 2650 kg/m^3 . Diese Parameter wurden in BASEMENT angegeben.

4.5.4 Einkorn- oder Mehrkornmodell?

Für die morphologische Simulation sind verschiedene Berechnungsansätze möglich. Der einfachste Weg ist ein Einkornmodell, das mit der Formel von Meyer-Peter und Müller berechnet wird. Hierfür ist der mittlere Korndurchmesser des Geschiebes zu bestimmen.

Das Zweikornmodell von Günter berücksichtigt die vorhandene Deckschicht, in dem die kritische Schubspannung an der Sohle über den Günterfaktor erhöht wird. Dafür werden die mittleren Korndurchmesser von Deckschicht und Unterschicht benötigt.

Den komplexesten Ansatz zur Erfassung des Transportgeschehens stellt eine fraktionsweise Berechnung, beispielsweise mit der Formel von Hunziker, dar. Sie ist in Bezug auf die benötigten Eingangsdaten am anspruchvollsten. Außerdem benötigt sie längere Rechenzeiten und ist anfällig in Bezug auf numerische Instabilitäten. Um die Rolle der Deckschicht zu berücksichtigen, sollte auch dieser Weg versucht werden.

Die relevanten Korndurchmesser für die verschiedenen Transportmodelle wurden aus einer Siebanalyse des Bayerischen Landesamts für Umwelt vom April 2007 ermittelt. Die einzelnen Sohlproben wurden darin in Deckschicht- (D), Unterschicht- (I) und Mischproben (M) unterschieden. Bei den Deckschichtproben handelt es sich um Flächenproben, während die anderen Proben Volumenproben waren. Die Unterschichtproben wurden aus dem Kiesbank-

inneren entnommen. Im Gutachten wurde insgesamt der Bereich von Fkm 11,8 bis zur Wertachmündung in den Lech (Fkm 0) untersucht. Innerhalb der Simulationsstrecke von Fkm 8,2 bis 5,8 wurden keine Proben genommen, aber davor und danach, sodass von einer ähnlichen Sohlbeschaffenheit innerhalb der Strecke ausgegangen werden kann. Die Analyse kommt zu folgendem Ergebnis (*Schaipp 2007*):

- d_m der Deckschichtproben von 33 – 70 mm, Mittelwert 52,1 mm
- d_{90} der Deckschichtproben von 54 – 126 mm
- d_m der Unterschichtproben von 17 – 25 mm, Mittelwert 19,5 mm
- d_{90} der Unterschichtproben von 30 – 68 mm
- Empfehlung für das transportierte Material $d_{Zugabe} = 17 \pm 2$ mm

Ein älteres Gutachten aus dem Jahr 2002 ergab folgende Korngrößen (arithmetische Mittelwerte; *Grünzner 2007*):

- d_m Unterschicht = 23 mm
- d_{90} Unterschicht = 46 mm

Nachfolgendes Diagramm (Abb. 49) gibt einen Überblick über die ausgewerteten Sohlproben.

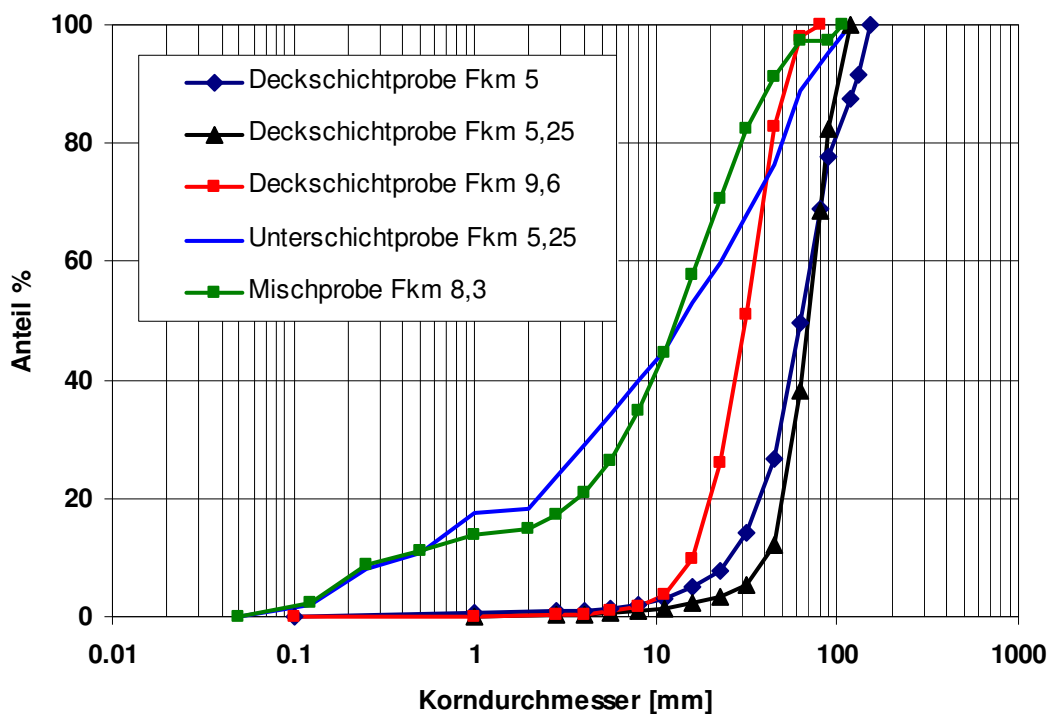


Abb. 49: Verschiedene Sohlproben aus der Siebanalyse des LfU, April 2007.

Da es sich bei den Deckschichtproben um Flächenproben handelt, deren Anteil an der Gesamtzusammensetzung der Sohle gering ist, sind sie für die Einkornsimulation zu vernachlässigen. Grobe Körner bewegen sich zudem erst bei höheren Abflussraten, weshalb das Zugabematerial dem Unterschichtmaterial entsprechen sollte. Für die Einkornsimulation wurde ein mittlerer Korndurchmesser von 20 mm gewählt. Dieser Wert liegt zwischen dem Mittelwert aller Proben von etwa 21 mm und der Obergrenze der Empfehlung für das eingetragene Sediment von 19 mm.

In der Berechnung mit Günter muss für die Deckschicht mindestens ein Korndurchmesser von 30 mm angesetzt werden, da dieser Wert die absolute Untergrenze aus allen Proben darstellt. Diese Annahme führte in der Berechnung mit BASEMENT allerdings zu keiner Erosion der Sohle, es traten nur Anlandungen auf. Um im Modell Erosionen zuzulassen hätten die Korndurchmesser wesentlich kleiner gewählt werden müssen, was angesichts der Naturdaten nicht gerechtfertigt schien. Berechnete man die kritische Schubspannung für das gewählte Material und verglich diese durch den Günterfaktor erhöhte Schubspannung mit den im Beispiel während des Hochwasserabflusses tatsächlich vorhandenen Schubspannungen, hätte es eigentlich zu Erosionen kommen müssen. Die überschlägige Berechnung ist im Anhang A.7 zu finden.

Für die fraktionsweise Berechnung kamen mehrere Ansätze in Frage. Entweder man wählt einen homogenen Sohlaufbau aus einer für die Strecke repräsentativen Mischprobe (M), beispielsweise die Probe von Fkm 8,3, oder man versucht auch die Deckschicht im Modell nachzubilden und gibt dem Active-Layer eine gröbere Zusammensetzung als der Unterschicht. Das eingetragene Geschiebe kann ebenfalls aus mehreren Kornfraktionen bestehen oder es kann Einheitskorn verwendet werden. Tabelle 19 gibt eine Übersicht der verwendeten Ansätze und Korngrößen.

Ansatz	Formel	Unterschicht	Deckschicht	Zugabe
Einkornmodell	MPM	20 mm	-	20 mm
Zweikornmodell	Günter	20 mm	30 – 70 mm Mittel: 46 mm	20 mm
Fraktionierte Berechnung	MPM-H	Fkm 8,3 M	Fkm 9,6 D	17 mm
		Fkm 8,3 M	-	17 mm
		Fkm 8,3 M	-	Fkm 8,3 M
		Gemittelte SL	Gemittelte SL	17 mm

Tab. 19: Gewählte Korngrößen für verschiedene Berechnungsansätze.

Für alle fraktionierten Berechnungen mit MPM-H wurden keine stabilen Rechenläufe erzielt. Während des Hochwassers bildete sich hier stets eine numerische Schwingung, die sich in starken Wellen in der berechneten Sohllage äußerte. Das Problem blieb auch bei der Einkorn-Geschiebezugabe, der Verwendung eines homogenen Sohlaufbaus und einer gemittelten Sieblinie, die aus weniger Fraktionen bestand, erhalten. Stabil waren lediglich Rechenläufe für konstante, stationäre Abflussverhältnisse ohne Geschiebezugabe.

4.5.5 Kalibrierung und Ergebnisse

Da sich die fraktionierten Berechnungen bei Beginn der Hochwasserwelle stets numerisch instabil verhielten und die Berechnungen mit Günters Zweikornmodell keine Modellierung der Erosion erlaubten, blieb die Einkornsimulation mit der MPM-Formel die einzige Variante, die plausible Ergebnisse lieferte. Dabei wurde mit der Originalversion BASEMENT V 1.3 und der (mit OV 1.3 identischen) Version V 1.3.1 gerechnet, in der die Randbedingung H-Q Datei korrigiert worden war.

Rauhigkeiten

Berechnet man den Stricklerbeiwert für die maßgeblichen Korndurchmesser aus den Deckschichtproben, kann dieser in einem Bereich von 30 bis 40 liegen. Gewählt wurde ein Stricklerbeiwert von 35 für die Gerinnesohle und von 30 für die Vorländer (bewachsene Böschungen). Die Sohlrauheit von $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ entspricht dem in der TUM-Simulation mit dem Programm 1D-SEP verwendeten Wert und wurde damals aus der hydraulischen Kalibrierung mit HEC-RAS über eine Wasserspiegelfixierung erhalten. Damals wurde jedoch mit einer globalen Rauigkeit über den gesamten Querschnitt gerechnet und nicht zwischen Vorland und Hauptgerinne unterschieden. Der Einfluss der Vorländer ist in diesem Beispiel aber sehr gering. Die mit einer einheitlichen Rauheit von 35 berechneten Ergebnisse fielen identisch aus. Tabelle 20 zeigt die gewählten Einstellungen für die Einkornsimulation mit MPM.

Programmversion	Basement V 1.3 und V 1.3.1
Geometrie	
Anzahl der Querprofile	13, Abstand 200 m / (47, Abstand 50 m)
Querprofile mit beweglicher Sohle	12 / (46)
Morphologische (geometrische) Schwelle	476,73 m ü. NN
Hydraulische Schwelle	477,73 m ü. NN
Stricklerbeiwert der Sohle	$35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
Stricklerbeiwert der Vorländer	$30 / 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
Hydraulische Randbedingungen	
Oberstrom	HQ Ganglinie
Unterstrom	Wehr / H-Q Datei (kritische Fließtiefe + 1 m)
Initialbedingung	Fileinput
Simulationsdauer	4838400 s (vom 01.08 – 26.09.2005)
Morphologische Randbedingungen	
Oberstrom	Sediment Discharge
Unterstrom	IO Down (Gleichgewicht)
Transportformel	MPM , Faktor 5 (Startwert)
Morphologische Parameter	
Korndurchmesser	20 mm
Sublayer Dicke	1,0 m
Upwind	1

Tab. 20: Übersicht der Simulationsparameter.

Mit diesen Eingangsdaten wurde eine gute Übereinstimmung zu den gemessenen mittleren Sohlveränderungen erzielt. Abbildung 50 zeigt die Ergebnisse der Rechenläufe mit Randbedingung Wehr und H-Q Datei. Dargestellt ist die Differenz der mittleren Sohlagen. Das Querprofil bei Fkm 5,878 wurde durch die morphologische Unterstrom-Randbedingung fixiert und deshalb nicht abgebildet.

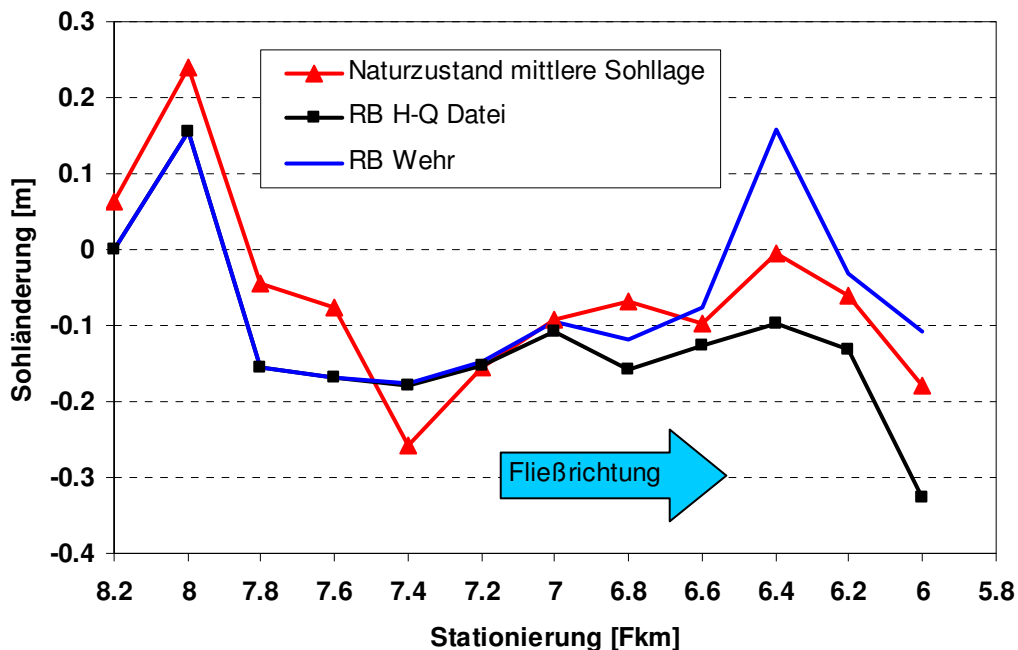


Abb. 50: Mit unterschiedlichen Randbedingungen berechnete mittlere Sohlveränderungen.

Das Querprofil bei Fkm 8,2 blieb wegen des gewählten Upwindfaktors von 1 unverändert. Um die Anlandung in diesem Querprofil nachvollziehen zu können muss ein Upwindfaktor von ca. 0,8 gewählt werden. Die Einkornsimulation kann die Anlandung bei Fkm 8 und die anschließende Eintiefung wiedergeben. Bis Fkm 7 liegen die mit den unterschiedlichen Randbedingungen erzielten Ergebnisse gleichauf. Danach macht sich der Einfluss der Unterstrom-Randbedingung bemerkbar. Randbedingung Wehr berechnet eine Anlandung bei Fkm 6,4, während der Rechenlauf mit der H-Q Datei stärkere Eintiefungen ergibt. Die starke Abweichung zwischen den verschiedenen Randbedingungen ist überraschend, da in beiden Fällen die gleiche Fließtiefe im letzten Querprofil eingestellt und kontrolliert wurde.

Abbildung 51 zeigt die berechneten Wasserspiegellagen und Schubspannungen für den Bereich mit der Abweichung ab Fkm 7. Verglichen werden die Ergebnisse für die beiden verschiedenen Randbedingungen während des Hochwassers bei den Ausgabezeitschritten von 1,9 und zwei Millionen Sekunden. Dort herrschen Abflüsse von rund 195 bzw. 240 m³/s. Vergleicht man die Wasserspiegellagen, die beide Randbedingungen in diesem Bereich berechnen, fällt auf, dass sie zwar im letzten Querprofil übereinstimmen, davor jedoch deutlich voneinander abweichen. Die Randbedingung Wehr bewirkt beim Einsetzen des Hochwassers einen Rückstau, der zu einem höheren Wasserspiegel führt. Das geringere Energieliniengefälle hat geringere Sohlschubspannungen zur Folge, wodurch die berechnete Eintiefung der Gerinnesohle kleiner ausfällt als mit der Randbedingung H-Q Datei.

Vergleicht man die Ergebnisse beider Randbedingungen miteinander, kommt man zu der Folgerung, dass ein Mittelweg aus beiden Situationen die beste Nachbildung der realen Verhältnisse zulassen würde. Hier wären weitere Optionen zu untersuchen. Für die

Randbedingung H-Q Datei wäre eine leichte Erhöhung der Fließtiefen denkbar, um im Modell eine optimale Anpassung an den Naturzustand zu erreichen.

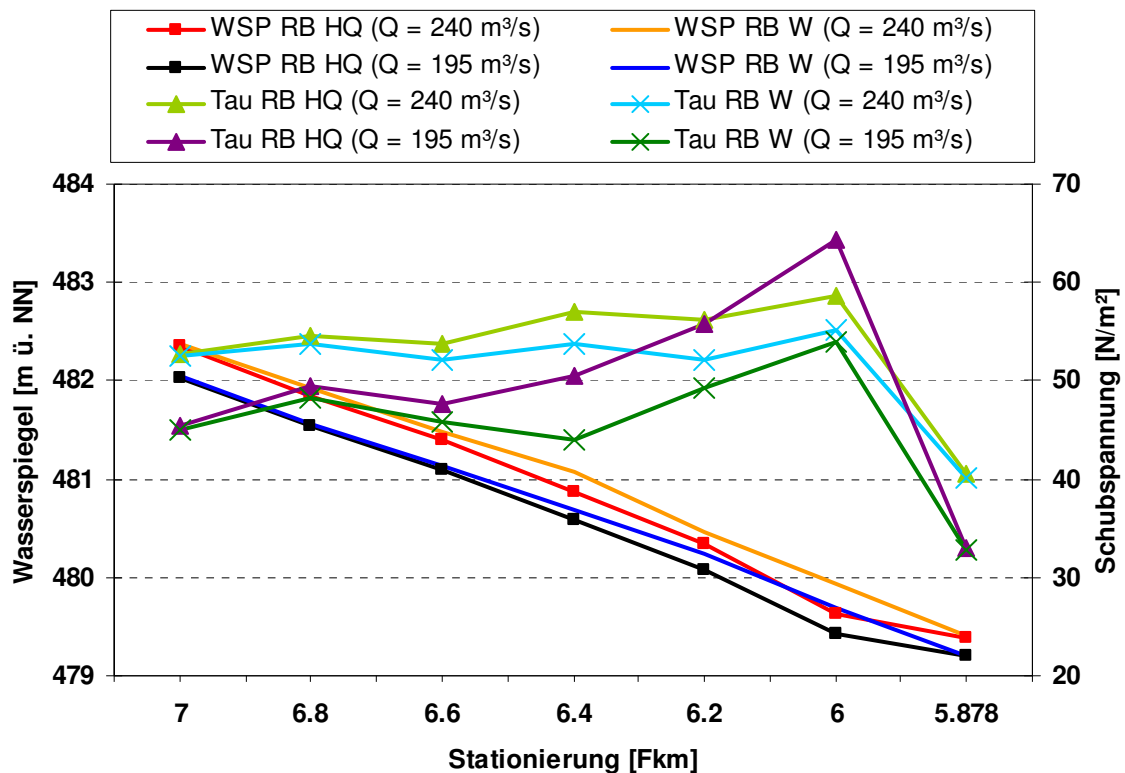


Abb. 51: Unterschiedliche Wasserspiegellagen mit den Randbedingungen H-Q Datei (HQ) und Wehr (W).

Bei der Randbedingung Wehr führen realistischere Annahmen für den Überfallbeiwert, z.B. ein Polenifaktor von 0,65, zu höheren Fließtiefen mit denen sich der Erosionsbereich vor der Schwelle (Fkm 6,0) nicht mehr nachbilden lässt. Die kritische Fließtiefe auf der Schwelle ist hier bereits die beste Annahme für die Unterwasserrandbedingung. Sie bewirkt jedoch im Vergleich zu den Naturdaten etwas zu geringe Erosionen. Um die Ergebnisse weiter an den Naturzustand anzupassen, wäre eine Verringerung der Schwellenhöhe und die Veränderung des Überfallbeiwerts erforderlich. Da solche Maßnahmen aber eine Abweichung von den Vorgaben (kritische Fließtiefe, Schwellenhöhe 1,0 Meter) darstellen würden, wurde mit den bestehenden Randbedingungen weitergearbeitet. Die weitere Kalibrierung der Modelle sollte anhand anderer Parameter erfolgen.

Hierfür kommen z.B. der Vorfaktor in der MPM-Formel, der Upwind-Faktor, der mittlere Korndurchmesser und der Stricklerwert der Gerinnesohle (in einem angemessenen Rahmen) in Frage. Großen Einfluss auf die Ergebnisse haben der Vorfaktor der MPM-Formel und der Stricklerwert der Gerinnesohle. Zur Feinabstimmung des Modells können der Upwind-Faktor und die Korndurchmesser variiert werden.

Für das Beispiel mit Randbedingung Wehr konnte mit einem Upwind-Faktor von 0,8 die Anlandung im ersten Querprofil nachgebildet werden. Außerdem wurde der Einfluss leicht veränderter Sohlrauheiten untersucht. Eine gute Übereinstimmung mit dem Naturzustand der mittleren Sohländerungen wurde mit einer rauer werdenden Untersuchungsstrecke erzielt. Angesichts der größer werdenden Deckschichtproben in der Siebanalyse des LfU ist diese

Annahme vertretbar. Abbildung 52 zeigt das berechnete Ergebnis für dieses Szenario. Es wurde mit einem Stricklerwert von 36 begonnen und dieser allmählich bis 33 reduziert.

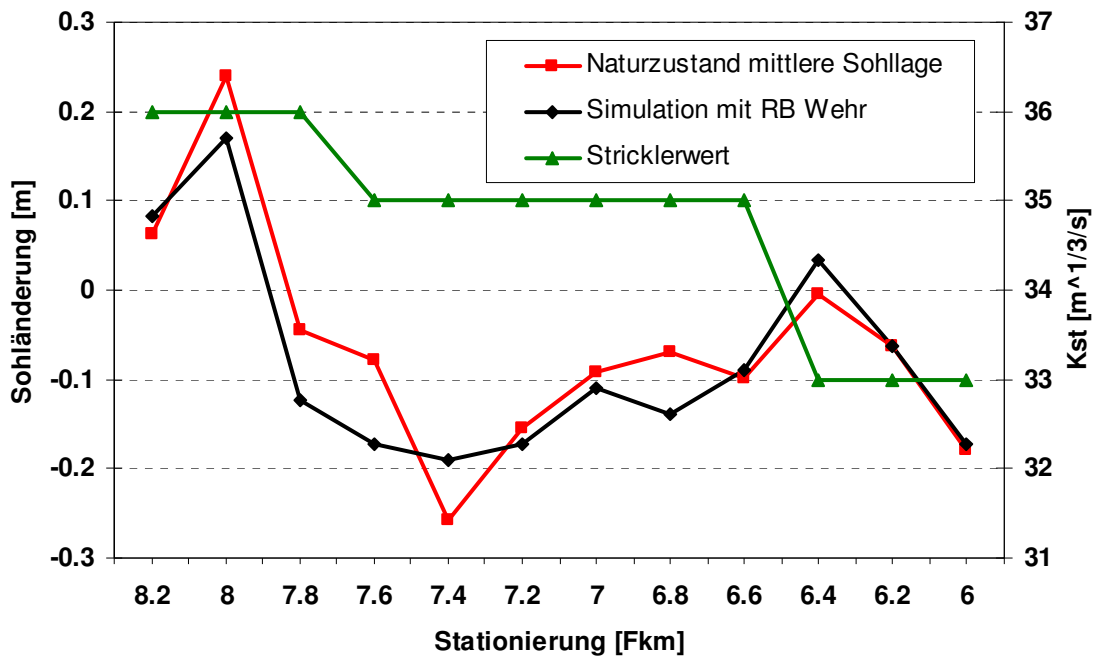


Abb. 52: Berechnung mit rauer werdender Strecke und RB Wehr (Upwind-Faktor = 0,8).

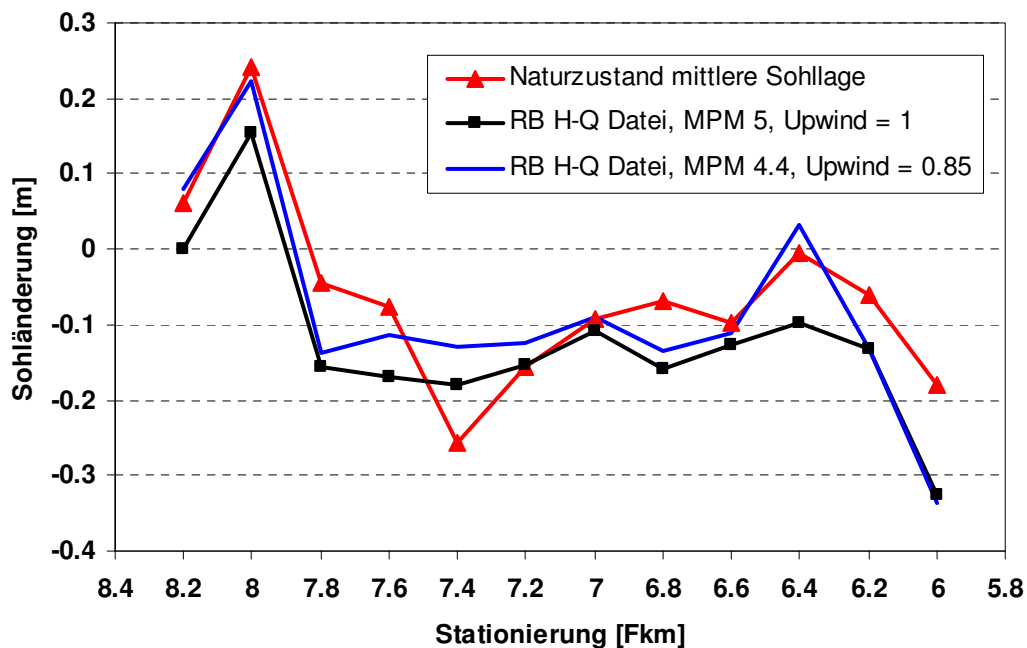


Abb. 53: Kalibrierung über MPM-Faktor und Upwind mit RB H-Q Datei.

Abbildung 53 zeigt einen Kalibrierungsversuch mit der Randbedingung H-Q Datei. Die Anlandung zu Beginn der Strecke (Fkm 8,0) wurde mit einem Upwind-Faktor von 0,85 und einer Verringerung des Vorfaktors in der MPM-Formel auf 4,4 nachgebildet. Damit wurde allerdings von der empfohlenen Untergrenze für diesen Faktor von 5 (BASEMENT Handbuch) leicht abgewichen. Im restlichen Streckenverlauf ergaben sich daher geringere Eintiefungen,

die starke Eintiefung bei Fkm 6,0 blieb aber erhalten. Die Rauheit der Untersuchungsstrecke wurde nicht verändert und lag bei konstant $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ für den Hauptkanal und $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ für die Vorländer.

Berechnung mit interpolierten Querprofilen

Um die Auswirkung einer höheren geometrischen Auflösung der Untersuchungsstrecke zu untersuchen, wurden weitere Querprofile interpoliert. Die Interpolation erfolgte mittels des Programms HEC-RAS, der Abstand zwischen den Querprofilen betrug nun 50 statt 200 Meter. Abbildungen 54 zeigt die mit dieser Geometrie berechneten mittleren Sohländerungen.

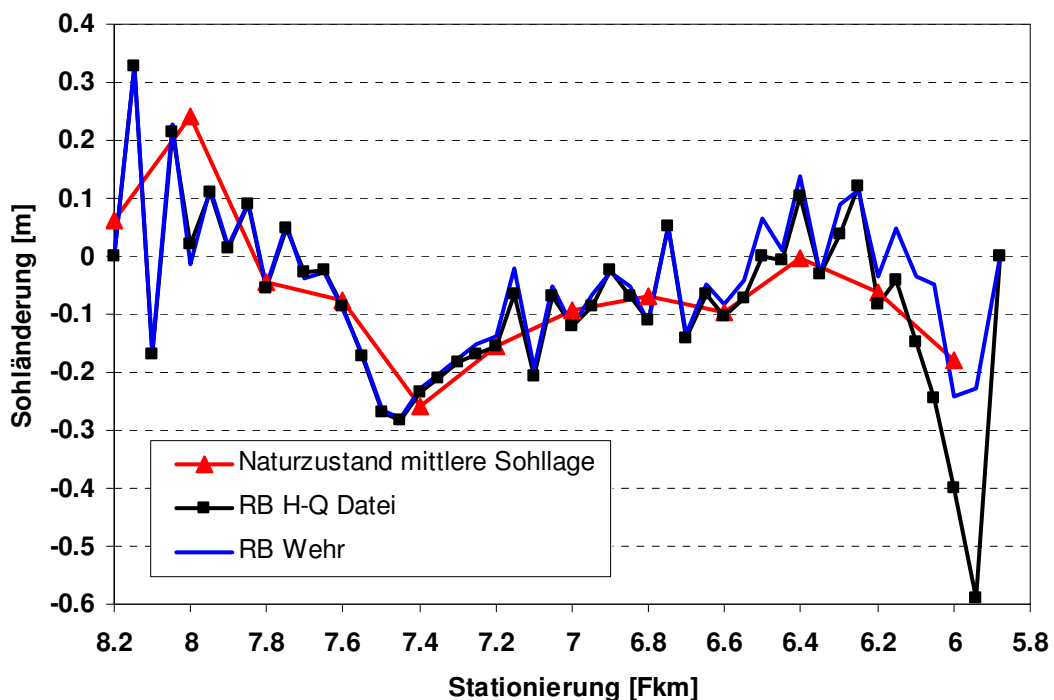


Abb. 54: Berechnete mittlere Sohländerungen mit interpolierten Querprofilen.

Dabei kam es zu Beginn der Simulationsstrecke zu Schwingungen, deren Amplitude aber nach einigen Querprofilen abklang. Dieses Verhalten deutet auf numerische Instabilität hin, die Berechnung lief jedoch zu Ende. Dass die Eintiefung bei Fkm 7,4 exakt nachvollzogen wurde, kann daher auch Zufall sein. Danach treten wieder Schwankungen auf, die sich aber in einem Bereich von etwa 10 Zentimetern um die Naturlinie bewegen. Bei Fkm 6,0 macht sich wieder die Abweichung auf Grund der unterschiedlichen Randbedingungen bemerkbar. Abgesehen von den Rändern folgt die berechnete Sohländerung dem Verlauf der Naturlinie, wenn auch oszillierend. Der Einfluss der Unterstrom-Randbedingung zeigt nur mehr eine Rückwirkung bis Fkm 6,2 statt bis Fkm 7,0 im Beispiel mit 13 Querprofilen im Abstand von 200 Meter.

4.5.6 Fazit

Beim Beispiel Wertach führte der Weg über das Einkornmodell zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Schwierig war die korrekte Modellierung der Unterwasser-Randbedingung, da hier unterschiedliche Annahmen zu großen Abweichungen führten. Die Kalibrierung über verschiedene Sohlrauheiten lässt eine Nachbildung der gemessenen Sohlveränderungen zu. Der Einfluss der Korndurchmesser war im Vergleich zur Sohlrauheit gering. Die lineare Geschiebezugabe erwies sich als ausreichend genau. Hier wurden erst 12000 m³ zugegeben, später erfolgte eine Korrektur auf 10200 m³. Mit beiden Geschiebezugaben wurden ähnliche Ergebnisse erzielt, der Unterschied lies sich über andere Modellparameter (MPM-Vorfaktor, Stricklerwert, Upwind) ausgleichen.

Eine Vergleichbarkeit mit der 1D-SEP Simulation der TU München ist nur bedingt gegeben. Dort wurde der Einfluss der Deckschicht mit dem Ansatz von Günter berücksichtigt, was in BASEMENT keine zufriedenstellende Ergebnisse erbrachte.

Eine fraktionsweise Berechnung des Szenarios gelang nicht, die instationären Abflussverhältnisse führten zu numerischer Instabilität der Rechenläufe. Die mit der Formel von Hunziker berechnete Transportkapazität reichte beim Einsetzen des Hochwassers mit entsprechendem Geschiebeeintrag nicht aus, um das gesamte erodierte Material weiterzutransportieren. Die großen Kornfraktionen landeten sich daher im nächsten Querprofil wieder an. So kam es im Streckenverlauf abwechselnd zu Anlandungen und Erosion. Das numerische Verfahren konnte diesen Effekt nicht kompensieren, was sich in extremen Wellen in der berechneten Sohlage äußerte.

Ein ähnlicher Effekt konnte auch bei der Einkornsimulation mit interpolierten Querprofilen beobachtet werden. Die numerische Schwingung wurde hier allerdings gedämpft und klang nach einigen Querprofilen ab. Danach setzte sie zwar wieder ein, jedoch in verminderter Intensität. Die stärksten Ausschläge ergaben sich an den Rändern des Untersuchungsgerinnes, was auf den Einfluss der Randbedingungen zurückzuführen ist.

5. Ergebnisse der Diplomarbeit

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit nocheinmal zusammengetragen und beurteilt werden. Dem potentiellen Anwender von BASEMENT soll eine Hilfestellung gegeben werden, für welche Szenarien der Einsatz des Programms lohnt und wo er eher problematisch sein kann.

5.1 Hydraulische Berechnungen

Das Programm BASEMENT wurde zunächst für stationäre hydraulische Berechnungen an zwei akademischen Beispielen verwendet. Hier war in erster Linie die Wahl geeigneter Rand- und Initialbedingungen von Bedeutung. BASEMENT bietet hier viele Möglichkeiten zur Auswahl, leider fehlt die kritische Fließtiefe als hydraulische Randbedingung, wie sie beispielsweise in HEC-RAS gewählt werden kann. Hier muss eine Datei erstellt werden, was bei einer unregelmäßigen Querschnittsgeometrie recht aufwendig sein kann. Die Berechnung der Normalwassertiefe führte bei komplexeren Geometrien mit Zonen unterschiedlicher Rauigkeit zu Abweichungen unter den einzelnen Querprofilen (Beispiel 2). Diese sind im numerischen Lösungsverfahren von BASEMENT begründet, fallen aber unter praktischen Genauigkeitsanforderungen weniger ins Gewicht. Gravierender fiel der Unterschied zu den mit HEC-RAS berechneten Fließtiefen aus. BASEMENT lag hier gut 5 % höher und somit auf der sicheren Seite.

Die Beispiele machen deutlich, dass die Ergebnisse eines numerischen Modells selbst für hydraulische Berechnungen stark von den zugrunde liegenden Modellvorstellungen (Reibungsansatz, Trennflächenannahme, Streifenmethode oder Berechnung des hydraulischen Radius) und Lösungsverfahren (FV-Methode oder Energiegleichung) abhängen.

Was die Handhabung beider Programme angeht, bietet HEC-RAS durch die graphische Benutzeroberfläche und Ergebnisausgabe mehr Übersichtlichkeit und erlaubt eine raschere Arbeitsweise als BASEMENT, da die Nachbearbeitung der Rechenläufe (Auswertung und graphische Darstellung der Ergebnisdateien) entfällt. Das Programm BASEMENT wiederum hat den Vorteil, dass die Ergebnisausgabe vom Benutzer festgelegt werden kann und somit eine Auswahl erfolgen kann, welche Werte von besonderem Interesse sind und diese in einer eigenen Datei genauer verfolgt werden können. Damit ist die Möglichkeit eines schnellen Datenaustauschs und der Arbeitsteilung beim Erstellen und Auswerten von Datensätzen gegeben.

Die verschiedenen Geometrieformate beider Programme haben jeweils Vor- und Nachteile. Die Eingabe in HEC-RAS ist anschaulicher und kann – je nach Format der Vermessungsdaten – etwas schneller sein. Das BASEMENT-Format FLORIS ermöglicht dafür eine genauere Beschreibung der Querprofile, was Zonen unterschiedlicher Rauigkeiten und den Sohlaufbau betrifft.

Die Verwendung von HEC-RAS Geometrien in BASEMENT ist mit zahlreichen Änderungen verbunden, die sich zeitlich nur lohnen wenn bereits eine fertige Geometrie besteht. Ein neues Projekt kann mindestens ebenso schnell in FLORIS eingegeben werden. Für morphologische Berechnungen ist FLORIS besser geeignet, da hier die Definition der beweglichen Sohle einfacher (keine zusätzliche Sohldatei erforderlich) und übersichtlicher ist.

Das 1D-Modul BASECHAIN ist insgesamt ein brauchbares Werkzeug für hydraulische Berechnungen aller Art. Viele Funktionen konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht näher getestet werden, so wäre beispielsweise eine Speichersimulation oder ein Hochwasserereignis in einem längeren Flusssystem mit mehreren Staustufen interessant gewesen. Die erzielten Ergebnisse sind aber vielversprechend und lassen auch solche Szenarien modellierbar erscheinen. Allerdings stehen für rein hydraulische Berechnungen auch viele Alternativprogramme zur Verfügung, sodass der Einsatz von BASEMENT, gerade im 1D-Bereich, eher für Szenarien mit morphologischen Berechnungen in Betracht kommen wird.

5.2 Morphologische Berechnungen

Nach einem akademischen Beispiel zum Thema Geschiebetransport wurden in dieser Diplomarbeit zwei reale Szenarien kalibriert und berechnet. Dabei wurden alle in BASEMENT implementierten Transportformeln verwendet, sofern sie für die jeweilige Aufgabenstellung adäquat waren. Es wurden sowohl Einkorn- als auch Mehrkornmodelle simuliert. Aufgrund einiger Bugs in der Originalversion von BASEMENT V 1.3 wurde mit mehreren provisorischen Programmversionen gearbeitet.

Die fraktionierte Berechnung eines Modellversuchs zur Deckschichtbildung unter stationären Abflussverhältnissen gelang mit der Version 1.3.3. Als Transportformel wurde der Ansatz von Hunziker (MPM-H) verwendet. Die numerische Simulation führte nach durchgeführter Kalibrierung zu überzeugenden Ergebnissen. Die Sohlerosion über den Versuchszeitraum wurde im 1D-Modell größenordnungsmäßig korrekt wiedergegeben, der Prozess der Deckschichtbildung und Selbststabilisierung der Sohle konnte erfasst werden. Auch die ermittelten Kornzusammensetzungen der Deckschicht und des ausgetragenen Materials lagen in einem plausiblen Rahmen.

Da das Programm BASEMENT anhand des Günterversuchs getestet wurde, in dem vergleichbare Bedingungen wie im Beispiel Modellversuch vorliegen, scheint das Programm solchen Szenarien gewachsen zu sein. Die Randbedingungen waren hier jeweils stationäre Abflussverhältnisse und homogenes Sohlmaterial zu Versuchsbeginn.

Damit eignet sich BASEMENT für 1D-Simulationen, wie sie beispielsweise für hybride Modelle an wasserbaulichen Versuchsanstalten benötigt werden. Grundsätzlich lässt sich der Anwendungsbereich auf den Bereich der 2D-Simulation erweitern, hier kann allerdings keine Bewertung erfolgen, da in dieser Arbeit kein solches Szenario berechnet wurde.

Die numerische Simulation von morphologischen Prozessen in natürlichen Gerinnen unter instationären Abflussbedingungen gelang mit BASEMENT nur als Einkornmodell. Bei fraktionierten Transportberechnungen traten stets numerische Instabilitäten auf, deren Ursache in der hydraulischen Berechnungsweise des Programms zu suchen ist. Unter stationären Abflussbedingungen verhielten sich die Rechenläufe nämlich stets stabil. Mit der Programmversion 1.3.4 traten die Instabilitäten sogar bei der Einkornsimulation (Beispiel Wertach) auf, hier wurden offensichtlich Änderungen bei der Interaktion zwischen Hydraulik und der MPM-Formel vorgenommen. Die berechneten Sohlschubspannungen lagen nun deutlich niedriger als in den Vorversionen. Damit war die Transportkapazität bei einsetzender Geschiebezugabe zu gering, was zu extremen Anlandungen und numerischer Instabilität führte. Überzeugender fielen beim Beispiel Wertach die Ergebnisse mit BASEMENT V 1.3 (bzw. den identischen, korrigierten Versionen 1.3.1 und 1.3.2, vgl. Tab. 6, Seite 39) aus. Die

durch den Ablauf eines Hochwassers in der Untersuchungstrecke hervorgerufenen Veränderungen der Gerinnesohle konnten zufriedenstellend nachvollzogen werden. Dabei wurden jeweils die berechneten und vermessenen mittleren Sohllagen miteinander verglichen, was einer Volumenbilanzierung entspricht. Der Geschiebeeintrag in die Strecke wurde berücksichtigt, wobei die hydraulische Randbedingung an der Unterstromseite großen Einfluss auf die Sohlentwicklung in der zweiten Streckenhälfte zeigte. Weiterführende Betrachtungen zu diesem Szenario sollten hier ansetzen und verschiedene Randbedingungen miteinander vergleichen. So wäre beispielsweise eine geringere Wehrhöhe mit verändertem Überfallbeiwert nach Poleni zu untersuchen.

Die Berücksichtigung einer vorhandenen Deckschicht über den Ansatz von Günter gelang in der Einkornsimulation Wertach nicht. Es ergaben sich auf der gesamten Strecke keine Erosionen, obwohl ein sehr niedriger d_{90} von nur 30 Millimetern verwendet wurde. Die Korngrößen im Modell mussten hier wesentlich kleiner als in der Natur gewählt werden, um die tatsächlichen Sohländerungen nachvollziehen zu können.

Mit den Transportformeln von Parker und Rickenmann wurden ebenfalls keine brauchbaren Resultate erzielt, gleiches gilt für den Ansatz „Power Law“ im Einkornmodell. Dies scheint im Anwendungsrahmen der Formeln begründet zu sein, der mit den Verhältnissen in den Beispielen nicht übereinstimmt.

5.3 Probleme und Bugs

Im Laufe der durchgeführten Rechenläufe und Tests der einzelnen Programmfunktionen konnten einige Bugs, wie sie innerhalb einer neuen Software immer auftreten können, erkannt und von der VAW korrigiert werden. Besonderer Dank gilt hier dem Entwicklerteam in Zürich, die mir stets rasch mit einer Hilfsversion aushalfen. Deshalb wurde die Diplomarbeit mit insgesamt fünf Programmversionen bearbeitet. Alle Korrekturen werden in die nächste Version von BASEMENT (Version 1.4) Eingang finden.

So konnten Probleme bei der Verwendung von HEC-RAS Geometriefiles, einer H-Q Datei als hydraulische Randbedingung und Fehler in der berechneten Deckschichtzusammensetzung bei fraktionierten Berechnungen mit MPM-H behoben werden. Außerdem wurde die Ergebnisausgabe in der Tecplot-Datei korrigiert.

Die Programmfunktion, den Stricklerbeiwert der Sohle selbständig aus den vorhandenen Korngrößen zu berechnen, wofür ein fester Faktor (von 21 – 26) angegeben werden kann, stand noch nicht zur Verfügung. Sie ist unter praktischen Erfordernissen allerdings auch weniger von Bedeutung, da die Streckenrauheit in den meisten Fällen über eine Wasserspiegelfixierung kalibriert und fest vorgegeben werden wird.

Die Option einer variablen Active-Layer-Dicke, die vom Programm errechnet wird, führte in allen berechneten Beispielen zu keiner Sohlerosion, obwohl die Rechenzeit deutlich zunahm. Die Dicke dieser Austauschschicht wurde daher immer konstant vorgegeben.

5.4 Ausblick

Im Rahmen dieser Diplomarbeit konnte nicht auf alle Funktionen eingegangen werden, die BASEMENT beinhaltet, da dies den Umfang der Arbeit gesprengt hätte. Es war deshalb erforderlich, einen Schwerpunkt zu setzen. Hierfür schienen hydraulische und morphologische Berechnungen mit dem 1D-Modul BASECHAIN am besten geeignet. Mit dem 2D-Modul BASEPLANE wurde nicht gearbeitet. BASEPLANE erfordert ein Geometrie-netz im Format 2dm, welches z.B. mit dem Programm SMS erstellt werden kann. Für nähere Informationen zu diesem Modul sei auf das BASEMENT Manual verwiesen. Da die Rechenzeiten für eindimensionale morphologische Berechnungen teilweise auch einige Stunden betragen (z.B. fraktionierte Berechnung des Beispiels Wertach mit 47 Querprofilen), können für 2D-Berechnungen ähnliche Zeitspannen angenommen werden.

Der Weg zu einem geplanten 3D-Modul in BASEMENT wird noch einige Zeit in Anspruch nehmen. Bis dahin bleibt der Verweis auf die neue Version BASEMENT V 1.4, die noch im Jahr 2008 veröffentlicht werden soll. Sie soll neben einigen anderen Änderungen und Verbesserungen auch den Sedimenttransport in Suspension berücksichtigen können.

BASEMENT ist im Vergleich zu anderen numerischen Modellen noch nicht so etabliert und auch noch mit einigen Bugs behaftet. Dafür ist es aber Freeware und kann für viele Fragestellungen erfolgreich eingesetzt werden. Das Entwicklerteam der ETH Zürich besteht nur aus wenigen Mitarbeitern, dennoch wurden meine Anfragen meist am selben Tag beantwortet und Probleme rasch behoben. Diese Unterstützung erhält der Anwender sonst selten, was einen großen Pluspunkt für BASEMENT bedeutet.

6. Literatur

- [01] Aufleger, M., 2003: Wasserwirtschaft I: Flussbau, Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München.
- [02] Bollrich, G., 2000: Technische Hydromechanik, Band 1, Grundlagen, 5. Auflage, Verlag Bauwesen, Berlin.
- [03] Grünzner, M., u.a., 2007: Wertach Vital 2, Morphologische Untersuchung der Wertach – Fkm. 4+500 bis Fkm. 8+250, Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München.
- [04] Hunziker, R.P., 1995: Fraktionsweiser Geschiebetransport, Diss. ETH Nr. 11037, ETH Zürich.
- [05] Kroekenstoel, D.F.; van Velzen, E.H., 2003: Morphologische Berechnungen mit Sedimentmischungen – Zukunftsmusik oder eine realistische Alternative?, Bericht Nr. II-19 der KHR, Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebiets.
- [06] Malcherek, A., 2002: Numerische Methoden der Strömungsmechanik, Vorlesungsskript, Version 5.6, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg.
- [07] Malcherek, A., 2004: Hydromechanik für Bauingenieure, Vorlesungsskript, Version 6.2, Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg.
- [08] Manhart, M., 2006: Numerical Methods for Fluids, Fachgebiet Hydromechanik, Technische Universität München.
- [09] Meyer-Peter, E.; Müller, R., 1949: Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs. Schweizerische Bauzeitung, 67. Jahrgang.
- [10] Parker, G., 2005: Transport of gravel and sediment mixtures, Parker's Chapter 3 for ASCE Manual 54.
- [11] Rickenmann, D., 2007: Modellierung von Murgängen und Sedimenttransport in Wildbächen, Bautechnik und Naturgefahren, Ernst und Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin.
- [12] Schaipp, B., 2007: Geschiebegutachten der Wertach, Geschiebeprobennahme am 16.04.2007 unterhalb Bobingen bis zur Mündung in den Lech. Bericht vom 22.06.2007, 63-4424-8-Wertach, Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- [13] Schindler, M., 2006: Hydrodynamische und Morphologische Berechnung, Skriptum, Ergänzungskurs „Wasserbau und Wasserwirtschaft“, Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München.
- [14] Schöberl, F., 1981: Abpflasterungs- und Selbststabilisierungsvermögen erodierender Gerinne, Österreichische Wasserwirtschaft, Jahrgang 33, Heft 7.

- [15] Sendzik, W., 2003: Fraktionierung von Geschiebetransportraten in morphodynamisch-numerischen Modellen, Institut für Strömungsmechanik und elektronisches Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover.
- [16] Strobl, Th., (Hrsg.) u.a., 2006: Anwendung und Grenzen physikalischer und numerischer Modelle im Wasserbau, Workshop in Wallgau (Oberbayern), 29. – 30.9.2005, Bericht 104, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München.
- [17] US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2002: HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, Version 3.1., US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, USA.
- [18] VAW, ETH Zürich, 2007: System Manuals of BASEMENT, Version 1.3, Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.

Verwendete Dokumente aus dem Internet:

BASEMENT Workshop Präsentationen:

- Einführung in die numerische Modellierung
- Basechain 1D
- Baseplane 2D
- Weitere Entwicklung
- Das Softwaresystem Basement
- Fallbeispiel Thur

Quelle: www.basement.ethz.ch

Anhang

A.1: Stationäre Verhältnisse, Beispiel 1 Rechteckquerschnitt

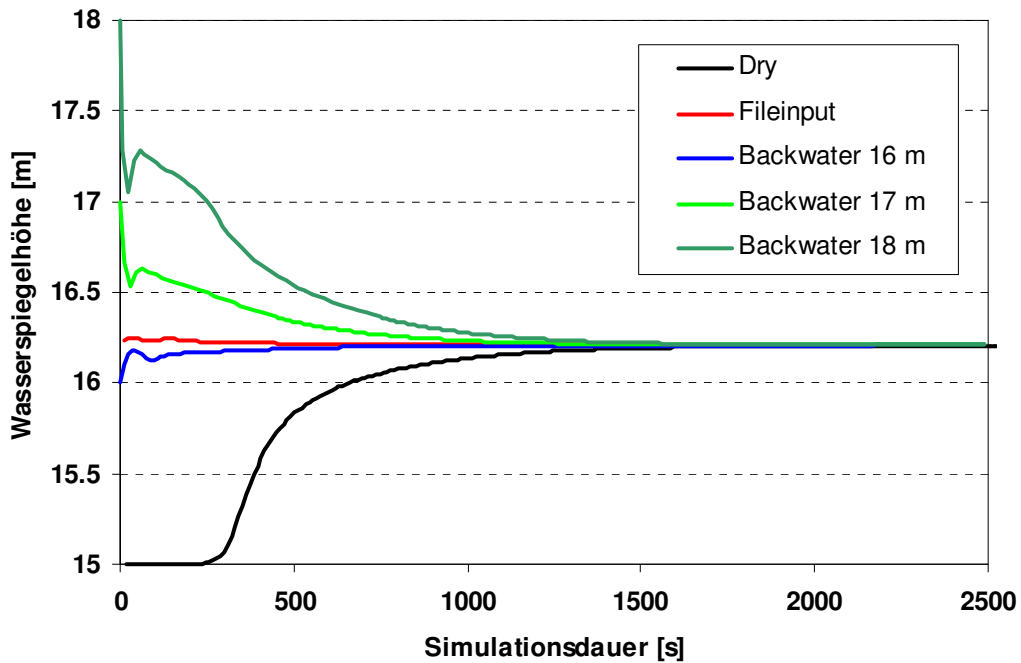


Abb. A-1: Zeitliche Entwicklung der Wasserspiegellage in Querprofil 8, Station 700 m, für unterschiedliche Initialbedingungen.

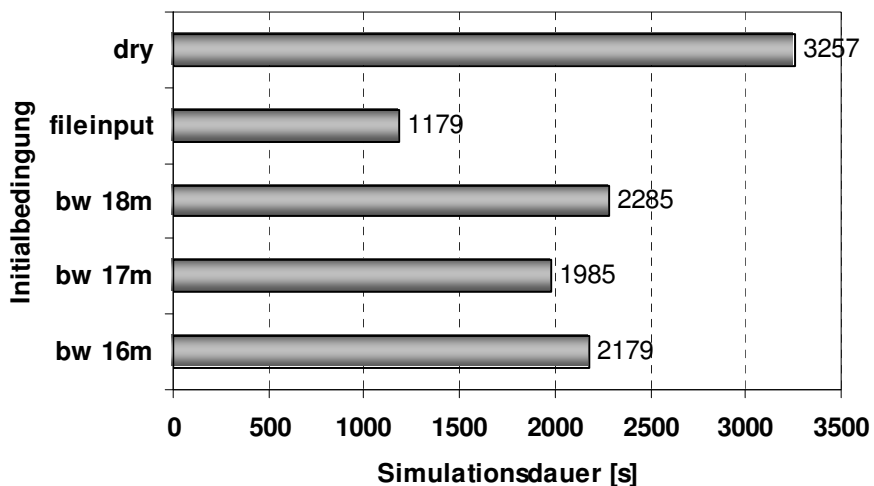


Abb. A-2: Erforderliche Simulationsdauer bis zum Erreichen stationärer Verhältnisse in Querprofil 8, Station 700 m, für verschiedene Initialbedingungen, Beispiel 1, $Q_1 = 15\text{m}^3/\text{s}$.

Gesamter Abfluss über den Querschnitt:

$$Q = 2 * Q_1 + Q_2 = 2 * 11,544 + 65,900 = 88,988 \approx 90 \text{ m}^3/\text{s}$$

Überprüfung des HEC-RAS Ergebnisses von 3,64m:

Querprofil 1: Höhenkote Wasserspiegel $Z = 46,0 \text{ m} + 3,64 \text{ m} = 49,64 \text{ m}$

Trennflächenannahme:

Benetzter Umfang Vorland: $U_1 = 3,589 \text{ m} + 5,001 \text{ m} + \mathbf{1,64} \text{ m} = 10,230 \text{ m}$
(*mit* Trennflächenlänge)

Benetzter Umfang Hauptkanal: $U_2 = 5,0 \text{ m} + 2 * 3,606 \text{ m} = 12,212 \text{ m}$
(*ohne* Trennflächenlänge)

Abfluss über die Vorländer:

Querschnittsfläche $A_1 = 5 * 0,1 / 2 + (8,242 + 5) * 1,54 / 2 = 10,446 \text{ m}^2$

Hydraulischer Radius $R_1 = A_1 / U_1 = 10,446 / 10,230 = 1,021 \text{ m}$

Geschwindigkeit $v_1 = k_{st} \cdot R_1^{2/3} \cdot \sqrt{I} = 25 * (1,021)^{2/3} * (0,001)^{1/2} = 0,802 \text{ m/s}$

Abfluss $Q_1 = v_1 * A_1 = 0,802 * 10,446 = 8,374 \text{ m}^3/\text{s}$

Abfluss im Hauptkanal:

Querschnittsfläche $A_2 = 1,64 * 11 + 2 * (5 + 11) / 2 = 34,040 \text{ m}^2$

Hydraulischer Radius $R_2 = A_2 / U_2 = 34,040 / 12,212 = 2,787 \text{ m}$

Geschwindigkeit $v_2 = k_{st} \cdot R_2^{2/3} \cdot \sqrt{I} = 33,33 * (2,787)^{2/3} * (0,001)^{1/2} = 2,088 \text{ m/s}$

Abfluss $Q_2 = v_2 * A_2 = 2,088 * 34,040 = 71,060 \text{ m}^3/\text{s}$

Gesamter Abfluss über den Querschnitt:

$$Q = 2 * Q_1 + Q_2 = 2 * 8,374 + 71,060 = 87,8 \approx 90 \text{ m}^3/\text{s} \quad \rightarrow \text{ok.}$$

Bei gegenteiliger Trennflächenannahme berechnet man für die beiden Fließtiefen Abflüsse von 99 bzw. 79,5 m³/s.

A.3: Basement Command File

Dargestellt ist der vollständige Aufbau eines BASEMENT Command Files eines Rechenlaufs zu Beispiel 3 (Trapezquerschnitt mit Morphologie).

```
PROJECT
{
    title = Trapezquerschnitt
    author = bu
    date = 15.11.2007
}
DOMAIN
{
    multiregion = Test
    PHYSICAL_PROPERTIES
    {
        gravity = 9.81
        viscosity = 0.000001004
        rho_fluid = 1000
    }
    BASECHAIN_1D
    {
        region_name = Bsp_3_Trapez
        GEOMETRY
        {
            geometry_type = floris
            geofile = Beispiel_3_Topo.txt
            cross_section_order = ( CS1 CS2 CS3 CS4 CS5 CS6 CS7 CS8 CS9 CS10 CS11
                                   CS12 )
        }
        HYDRAULICS
        {
            BOUNDARY
            {
                boundary_type = hydrograph
                boundary_string = upstream
                boundary_file = SteadyHydro.txt
                precision = 0.0001
                number_of_iterations = 100
            }
            BOUNDARY
            {
                boundary_type = hqrelation
                boundary_string = downstream
            }
            INITIAL
            {
                initial_type = backwater
                q_out = 70
                WSE_out = 48
            }
            PARAMETER
            {
                total_run_time = 200000
                initial_time_step = 30
                CFL = 1
                minimum_water_depth = 0.0001
            }
        }
    }
}
```



```

OUTPUT
{
    output_time_step = 10000
    console_time_step = 1000
}
MORPHOLOGY
{
    BEDMATERIAL
    {
        GRAIN_CLASS
        {
            diameters = ( 1 4 16 21 50 ) // Kornfraktionen
        }
        MIXTURE
        {
            mixture_name = mixture1
            volume_fraction = ( 30 20 20 20 10 )
        }
        MIXTURE
        {
            mixture_name = mixture2
            volume_fraction = ( 40 30 20 5 5 )
        }
        SOIL_DEF
        {
            soil_name = fixed
            active_layer_height = 0
            active_layer_mixture = mixture1
        }
        SOIL_DEF
        {
            soil_name = mobile
            active_layer_height = 0.1
            active_layer_mixture = mixture1
            SUBLAYER
            {
                bottom_elevation = -1
                sublayer_mixture = mixture2
            }
        }
        SOIL_ASSIGNMENT
        {
            input_type = index_table
            index = ( 1 2 )
            soil = ( fixed mobile )
        }
    }
    BOUNDARY
    {
        boundary_type = IODown
        boundary_string = downstream
    }
    BOUNDARY
    {
        boundary_type = wall
        boundary_string = upstream
    }
    PARAMETER
    {
        bedload_transport = MPMH
        porosity = 0.37
    }
}

```

```

        upwind = 1
        height_active_layer = 0.1
        critical_angle = 30
        density = 2650
        max_dz_table = 0.005
    }
}
}

```

A.4: Topographie-File im Format FLORIS

Dargestellt ist ein Topographie-File im Format FLORIS, wie es in Beispiel 3 verwendet wurde. Die Bezeichnung des Files lautet: *Beispiel_3_Topo.txt*

```

project
Trapezquerschnitt
zCalculation // Berechnungsmodus Table
table Beispiel_3Table // Bezeichnung der Tabelle zur Interpolation der hydraulischen Parameter
resistance
strickler // Reibungsansatz nach Strickler
values
0.02 0.005 33.33 25 , , 33.33 / // Definition der Table-Intervalle und der Reibungsbeiwerte im Gerinne
20 CS1 0 , , , 1.0 1 / // Eingabe der Koordinaten des ersten Querprofils, Sohlneigung 1 ‰
21 00.00 50.00 /
21 01.00 50.00 /
21 05.00 48.10 /
21 10.00 48.00 , , 12 / // Beginn des Hauptkanals
21 13.00 46.00 , , , 15 / // Beginn der beweglichen Sohle
21 14.00 46.00 , , , 2 / // Bewegliche Sohle Index "2"
21 15.00 46.00 , , , 2 /
21 16.00 46.00 , , , 2 /
21 17.00 46.00 , , , 2 /
21 18.00 46.00 , , , 16 2 / // Ende der beweglichen Sohle
21 21.00 48.00 , , 13 / // Ende Hauptkanal
21 26.00 48.10 /
21 30.00 50.00 /
21 31.00 50.00 , , 32 / // Letzter Punkt des Querprofils 1
99
20 CS2 0.100 , , , 1 / // Querprofil 2, Abstand 100 m (Stationierung) von CS 1
21 00.00 49.90 /
21 01.00 49.90 /
21 05.00 48.00 /
21 10.00 47.90 , , 12 /
21 13.00 45.90 , , , 15 /
21 14.00 45.90 , , , 2 /
21 15.00 45.90 , , , 2 /
21 16.00 45.90 , , , 2 /
21 17.00 45.90 , , , 2 /
21 18.00 45.90 , , , 16 2 /
21 21.00 47.90 , , 13 /
21 26.00 48.00 /
21 30.00 49.90 /

```

```

21 31.00      49.90 , , 32 /
99                                     // Ende der Eingabe für Querprofil 2
20 CS3 0.200 ,,,,, 1 /
21 00.00      49.80 /
21 01.00      49.80 /

usw.

99
end                                     // Abschluss der Topographieeingabe.

```

A.5: Topographieausgabe-File

Topographieausgabedatei zu Beispiel 3, Bezeichnung: *Beispiel_3_Topoout.txt*. Diese Datei wird nach Einlesen der Geometrie zur Kontrolle ausgegeben. Sie enthält außerdem die hydraulischen Parameter, die zur Interpolation von Zwischenwerten berechnet wurden (im Table-Modus). Der Kopf der Datei hat diese Form:

```

- number of cross-sections to treat (input-file): . . . 12
  (from cross-section number 1 to 12)

- input data will be printed on output file

- table of values of the functions will be printed
  on output file

- default values of geometrical input values:

-- max. height difference of control points . . . dh = 0.02
-- min. height difference of control points . . . dm = 0.01
-- k-value for roughness of main-channel . . . . = 33.33000
-- k-value for roughness of flood-planes . . . . = 25.00000
-- slope of riverbed (0/00) . . . . . . . . . . sl = undefined

-- k-value for roughness of river-bed . . . . . = 33.33000

```

Danach folgt die Aufzählung der eingelesenen Geometrie der einzelnen Querprofile und die Tabelle mit den berechneten hydraulischen Parametern (im Table-Modus).

```

cross-section name: CS1      distance: 0.00000
-----
maximum width of the cross-section :          31.00[m]
elevation : minimum: 46.000000 [m.a.s.l]  maximum: 50.000000 [m.a.s.l]

```

table of the cross-section geometry :

number	distance [m]	level [m asl.]	friction [m&.333/s] /[mm]	slice type MC=0/FP=1	bottom true=1/false=0	effectiveness 1 = effective 0 = ineffect.	soil code
1	0.000000	50.000000					
2	1.000000	50.000000	25.00	1	0	1	1
3	5.000000	48.100000	25.00	1	0	1	1
4	10.000000	48.000000	25.00	1	0	1	1
5	13.000000	46.000000	33.33	0	0	1	1
6	14.000000	46.000000	33.33	0	1	1	2
7	15.000000	46.000000	33.33	0	1	1	2
8	16.000000	46.000000	33.33	0	1	1	2
9	17.000000	46.000000	33.33	0	1	1	2
10	18.000000	46.000000	33.33	0	1	1	2
11	21.000000	48.000000	33.33	0	0	1	1
12	26.000000	48.100000	25.00	1	0	1	1
13	30.000000	50.000000	25.00	1	0	1	1
14	31.000000	50.000000	25.00	1	0	1	1

cross-section name: CS1 distance: 0.00

table of the function:

nr	elevat. [m asl.]	area [m&2]	ared [m&2]	conveyance [m&3/s]	width [m]	Hperimeter [m]
1	46.00010	0.00050	0.00050	0.00004	5.00030	5.00036
2	46.02000	0.10060	0.10060	0.24568	5.06000	5.07211
3	46.04000	0.20240	0.20240	0.78038	5.12000	5.14422
4	46.06000	0.30540	0.30540	1.53476	5.18000	5.21633
5	46.08000	0.40960	0.40960	2.48056	5.24000	5.28844
6	46.10000	0.51500	0.51500	3.60059	5.30000	5.36056
7	46.12000	0.62160	0.62160	4.88291	5.36000	5.43267
8	46.14000	0.72940	0.72940	6.31856	5.42000	5.50478
9	46.16000	0.83840	0.83840	7.90059	5.48000	5.57689
10	46.18000	0.94860	0.94860	9.62335	5.54000	5.64900
11	46.20000	1.06000	1.06000	11.48219	5.60000	5.72111
12	46.22000	1.17260	1.17260	13.47323	5.66000	5.79322
13	46.24000	1.28640	1.28640	15.59314	5.72000	5.86533
14	46.26000	1.40140	1.40140	17.83908	5.78000	5.93744
15	46.28000	1.51760	1.51760	20.20859	5.84000	6.00955

usw.

200	49.98000	64.52084	64.52084	3063.63105	28.91579	30.97651
201	50.00000	65.10000	65.10000	3041.61644	31.00000	33.06974
202	50.02000	65.72000	65.72000	3079.46080	31.00000	33.06974

difference of control-points: minimum dm = 0.01, maximum dh = 0.02

slope of riverbed : 1.00 (0/00)

level of thalweg = 46.0000 mean bed = -1.0000 left dam = 50.0000 right dam = 50.0000

A.6: Kritischer Abfluss im Beispiel Wertach

Bestimmung des kritischen Abflusses Q_{krit} , bei dem Geschiebetrieb einsetzt, für die Einkornsimulation mit $d_m = 20$ mm.

Handrechenformel von Meyer-Peter und Müller:

$$\tau_w = \tau_c + \tau_G$$

$$\left(\frac{k_{st}}{k_R}\right)^{3/2} \cdot \rho \cdot g \cdot R_S \cdot I_E = \theta_{crit} \cdot (\rho_S - \rho_W) \cdot g \cdot d_m + 0,25 \cdot \rho_W^{1/3} \cdot [g \cdot (\rho_S - \rho_W) \cdot q_B]^{2/3}$$

Mit: $R = 0,9 \cdot h$ (Näherung für breite Rechteckquerschnitte mit $h \ll b$),
 $q_B = 0$ (bei diesem Abfluss gerade noch keine Geschiebewegung) und
 $I_E = 2\text{‰}$ (angenommenes mittleres Energieliniengefälle) folgt:

$$0,7259 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,9 \cdot h \cdot 0,002 = 0,047 \cdot 1650 \cdot 9,81 \cdot 0,020 + 0$$

$$12,818 \cdot h = 15,21 \text{ N/m}^2 \quad \rightarrow \quad h = 1,187 \text{ m}$$

Geschiebetrieb beginnt bei einer Fließtiefe von $h > 1,187$ m.

Zugehöriger kritischer Abfluss:

$$\text{Formel: } Q = k_{st} \cdot \sqrt{I_E} \cdot \left[\frac{(h \cdot s + h^2 \cdot m)^{5/3}}{s + 2 \cdot \sqrt{h^2 \cdot (1 + m^2)}} \right]^{2/3}$$

Annahme Trapezquerschnitt mit: $m = 2$
 $s = 30$ m
 $k_{st} = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
 $h = 1,18$ m $\rightarrow Q = 63 \text{ m}^3/\text{s}$ ok.

Im Modell wurde ein kritischer Abfluss von $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ für die Geschiebezugabe angesetzt.

A.7: Kritische Schubspannung nach Günter

Mit dem Ansatz von Günter berechnete BASEMENT (V 1.3.1) folgende Sohländerungen (Abb. A-3). Dabei wurde der Ausgangsrechenlauf mit Randbedingung H-Q Datei aus Beispiel 5 verwendet. Variiert wurde nur der d_{90} ($= d_m$ Deckschicht) nach Günter. Der mittlere Korndurchmesser der Unterschicht war konstant gleich 20 mm.

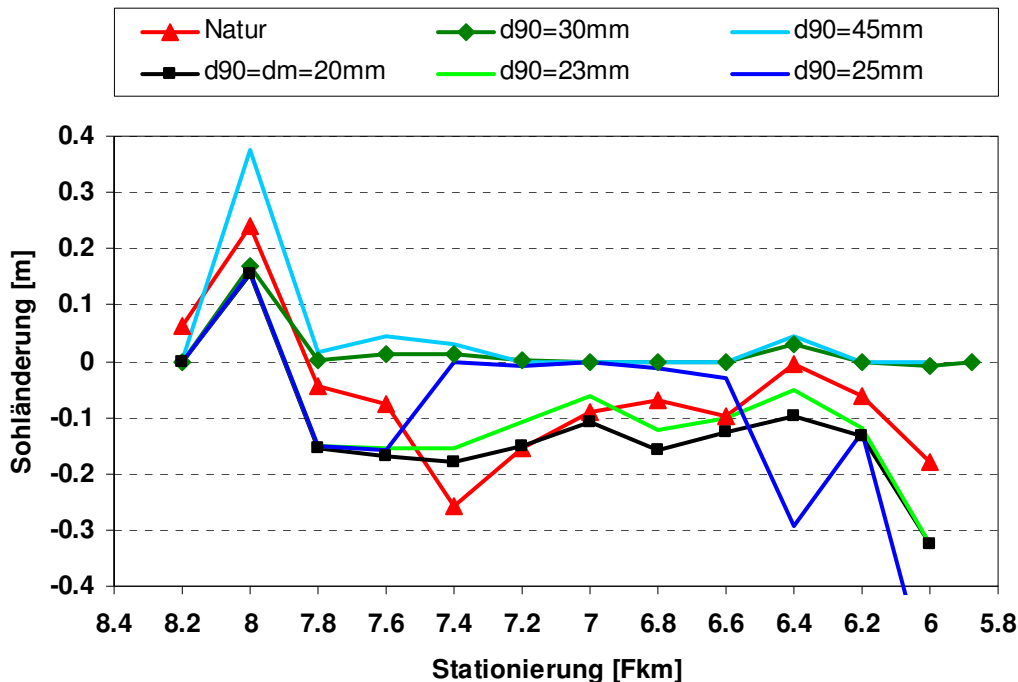


Abb. A-3: Mit der Günter-Formel berechnete Sohländerungen, Ausgangsrechenlauf mit Unterstrom-Randbedingung H-Q Datei.

Das Ergebnis für einen d_{90} von 20 mm entspricht dem MPM-Ergebnis. Bei 25 mm ist die Deckschicht im Mittelbereich der Strecke bereits stabil. Dort wo die Schubspannungen ausreichen um die Deckschicht aufzubrechen, ergeben sich dafür sehr hohe Erosionen (Fkm 6,4 und 6,0). Für einen d_{90} von 30 mm wurden keine Erosionen mehr berechnet.

Zur Bewertung der BASEMENT-Ergebnisse wurde die kritische Sohlschubspannung in Beispiel 5 überschlägig ermittelt.

Aus der BASEMENT Ergebnisdatei kann man während des Hochwassers für einen Abfluss von ca. 240 m³/s eine Fließtiefe von ca. 2,60 m und ein Energieliniengefälle von ca. 2 ‰ ablesen. Damit ergibt sich nach untenstehender Berechnung eine vorhandene Sohlschubspannung von 51 N/m², was in der Größenordnung der von BASEMENT berechneten Schubspannungen liegt. Nimmt man für den mittleren Korndurchmesser der Deckschicht von 45 mm eine Abschätzung der kritischen Schubspannung nach Günter vor, bei der Bewegungsbeginn einsetzt, erhält man einen Wert von 26,1 N/m². Die kritische Schubspannung ist also deutlich überschritten, die Sohle müsste sich in Erosion befinden. BASEMENT ermittelt für den Ansatz von Günter jedoch eine stabile Sohle, es tritt keine Erosion auf. Da das Programm die vorhandene Sohlschubspannung korrekt berechnet und das Ergebnis für $d_{90} = d_m = 20$ mm mit MPM übereinstimmt, könnte das Problem bei der Berechnung der Transportkapazitäten unter Geschiebeeintrag entstehen.

Vorhandene Schubspannung:

$$\tau = \rho_w \cdot g \cdot h \cdot I_E = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2,60 \cdot 0,002 = 51,0 \text{ N/m}^2$$

Kritische Schubspannung (Bewegungsbeginn nach MPM):

$$\tau_{crit} = 0,047 \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot d_m = 0,047 \cdot (2650 - 1000) \cdot 9,81 \cdot 0,045 = 34,2 \text{ N/m}^2$$

Günter:
$$\tau_{crit} = 0,047 \cdot \left(\frac{45}{20}\right)^{2/3} \cdot 1650 \cdot 9,81 \cdot 0,020 = 26,1 \text{ N/m}^2$$

→ Nach Günters Ansatz liegt der Bewegungsbeginn bei 26,1 N/m².

A.8: Weitere Rechenläufe zu Beispiel 5: Wertach

Rechenläufe mit Randbedingung H-Q Datei

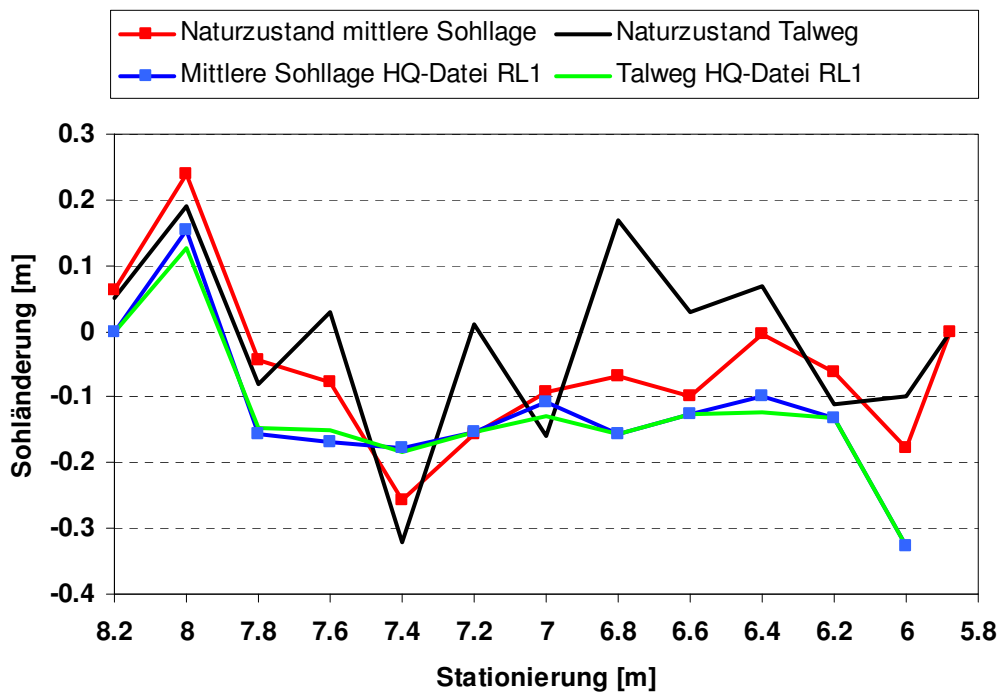


Abb. A-4: Rechenlauf 1: MPM-Faktor 5, Upwind = 1

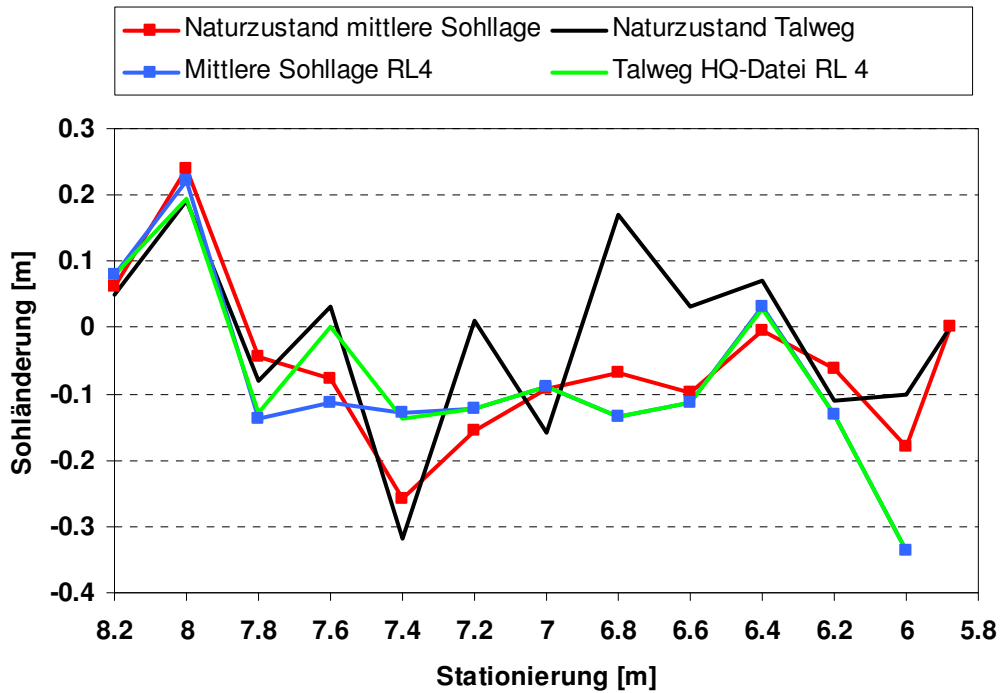


Abb. A-5: Rechenlauf 4: MPM-Faktor 4,4 ; Upwind 0,85

Rechenläufe mit Randbedingung Wehr

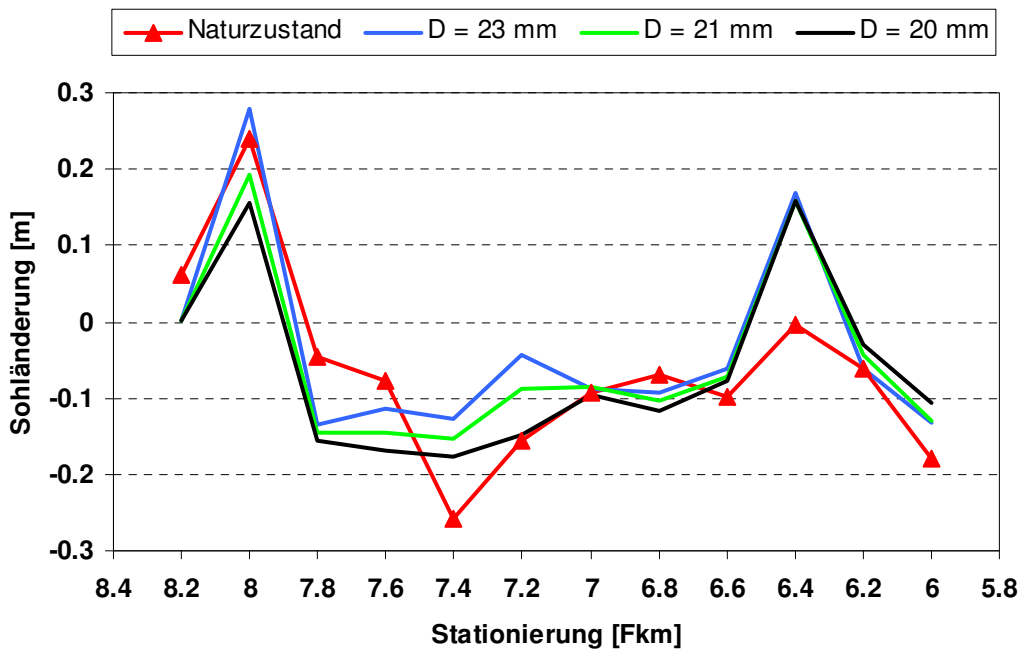


Abb. A-6: Ausgangsrechenlauf*, verschiedene mittlere Korndurchmesser d_m verwendet.

* = Rechenlauf RB Wehr aus Beispiel 5 Wertach, Upwindfaktor = 1, $d_m = 20$ mm, Rauheiten nach Strickler = 35 (Hauptkanal) - 30 (Vorländer), MPM-Faktor = 5.

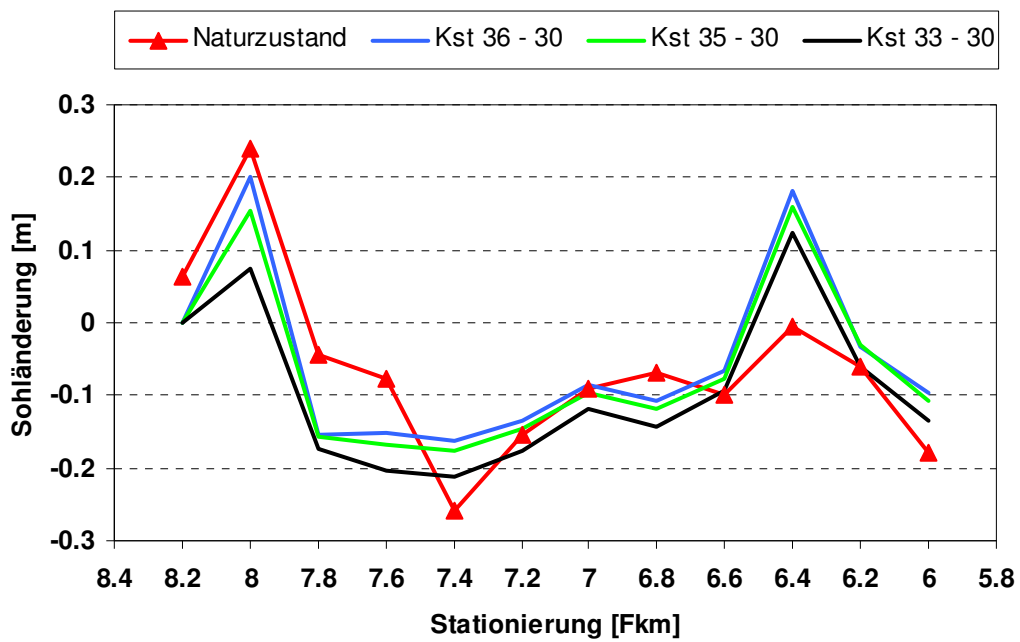


Abb. A-7: Ausgangsrechenlauf*, verschiedene Stricklerwerte für die Gerinnesohle verwendet z.B. $k_{st} = 36 - 30$ (Hauptkanal: 36; Vorländer: 30).

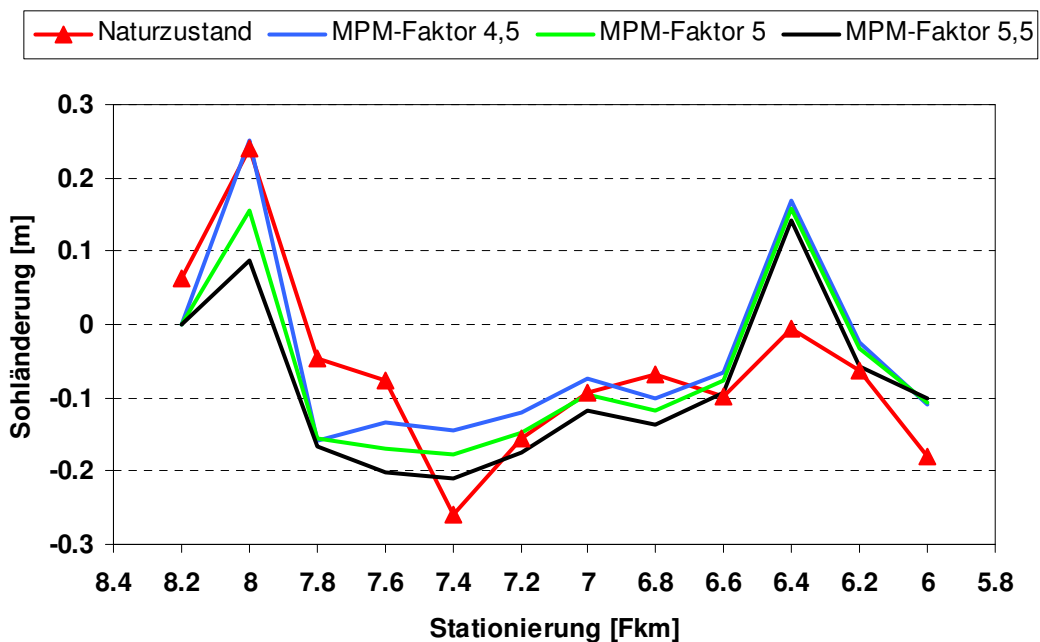


Abb. A-8: Ausgangsrechenlauf*, verschiedene MPM-Faktoren verwendet.

Selbstständigkeitserklärung und Dank

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Diplomarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Ich danke meinen Betreuern Frau Dipl.-Ing. Katharina Fiedler und Herrn Dipl.-Ing. Nikos Efthymiou für die freundliche Unterstützung und gute Zusammenarbeit. Außerdem danke ich Frau Dipl.-Ing. Renata Müller von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, die mir per E-Mail stets freundlich Auskunft gab und neue Programmversionen zur Verfügung stellte.

München, den 07.05.2008

Benjamin Unsin