

Licca Liber - Weiterführende Untersuchungen

Anlage 5.1 Morphologisches Modell — Modellkonzept

Stand: 30. März 2017
Version: 03

1	Veranlassung und Inhalt des Berichts.....	2
2	2D-Feststofftransportmodell.....	2
2.1	Kurzbeschreibung und verwendete Version der Software.....	2
2.2	Modellparameter.....	3
2.3	Anfangs- und Randbedingungen.....	4
3	Modellgrundlagen.....	5
3.1	Hydrologische Daten.....	5
3.2	Vorhandenes 2D-Modell.....	5
3.3	Querprofilaufnahmen und Airborne LiDAR Bathymetrie (ALB) Daten.....	6
3.4	Tertiärschicht.....	9
3.5	Kornzusammensetzung des Sohlenmaterials.....	9
4	Modellaufbau.....	16
4.1	Berechnungsnetze.....	16
4.2	Modellspezifische Parameter und Anfangsbedingungen.....	18
4.3	Wahl der Kornklassen.....	19
4.4	Korngrößenverteilung der Gewässersohle.....	21
4.5	Randbedingungen.....	22
5	Vorgehensweise bei der Modellierung.....	22
5.1	Maßnahmen zur Verringerung der Rechenzeit.....	23
5.2	Kalibrierung.....	26
5.3	Validierung.....	29
5.4	Sensitivitätsanalyse.....	30
	Literaturverzeichnis.....	31

1 Veranlassung und Inhalt des Berichts

Die Ausgangsbasis der weiterführenden morphologischen Untersuchungen im Projekt Licca Liber stellt das 2D-Modell der Oberflächenwasserhydraulik dar. Der vorliegende Bericht leitet Vorgaben für das daraus zu erstellende morphodynamische 2D-Modell ab und erläutert das grundlegende Modellkonzept. Dabei werden die wichtigsten Kenngrößen des verwendeten 2D-Feststofftransportmodells (Kapitel 2), die Modellgrundlagen (Kapitel 3) und der Aufbau des morphodynamischen 2D-Modells (Kapitel 4) beschrieben. Die Kalibrierung erfolgt für einen mehrjährigen Zeitraum mit guter Datengrundlage. In einer Serie von Rechenläufen werden die vermessene der jeweils berechneten Sohlentwicklung gegenübergestellt und daraus durch geeignete Ansätze verbesserte Modellparameter abgeleitet. Der Zielparametersatz zeichnet sich durch möglichst geringe Sohldifferenzen zur erwarteten Zielsohle am Ende des Kalibrierungszeitraums aus und wird mittels der Simulation eines weiteren mehrjährigen Zeitraums validiert. Die Konzepte der Kalibrierung und Validierung werden in Kapitel 5 erklärt. Zur Abrundung der Untersuchung werden in einer Sensitivitätsanalyse (Kapitel 5.4) modell- und gewässerspezifische Parametern variiert. Ziel dieser Untersuchung ist die Ermittlung von Restunsicherheiten, die Beurteilung der erzielbaren Prognosegüte und insbesondere die Darlegung, ob der kalibrierte und validierte Parametersatz allgemein und daher auch für den Modelleinsatz zur Simulation von Planungszuständen anwendbar ist.

2 2D-Feststofftransportmodell

2.1 Kurzbeschreibung und verwendete Version der Software

Das zweidimensionale Feststofftransport-Simulationsmodell HYDRO_FT-2D ist eine Erweiterung der 2D-numerischen Strömungssimulationssoftware HYDRO_AS-2D von Dr. Marinko Nujić um Transport-Module zur Simulation

- des Geschiebetransports (Modul HYDRO_GS-2D),
- des Schweb- und Schadstofftransport (Modul HYDRO_ST-2D) und
- des Wärmetransports (Modul HYDRO_WT-2D).

Für die morphodynamischen Untersuchungen des vorliegenden Projektes werden die Module HYDRO_AS-2D Version 4.2 (für reine Strömungsberechnungen) und HYDRO_FT-2D Version 3.2 (Strömung und Geschiebetransport) verwendet.

Beide Softwareversionen sind auf dem letzten Stand der Entwicklung. Die UIBK verfügt über einen Wartungsvertrag mit der Software-Entwicklerfirma Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, sodass von Softwareupdates im Zuge des Projekts und insbesondere von dadurch zu erwartenden Rechenlaufbeschleunigungen profitiert werden kann.

Das Modell berechnet die Strömungsgrößen durch die Lösung der vollständigen 2D-Flachwassergleichungen. Die räumliche Diskretisierung des Modellgebiets erfolgt mit der Methode der Finite-Volumen. HYDRO_FT-2D verwendet ein aus Vierecks- und Dreieckselementen zusammengesetztes lineares Berechnungsnetz, welches die Topographie und die Bathymetrie eines bestimmten Zeitpunktes approximiert. Für die Berechnung des Stofftransports wird ein Ansatz von *Meyer-Peter und Müller* (1948) mit einer Erweiterung nach *Hunziker* (1995) für den fraktionierten Transport (Transportformel MPM/Hunziker) verwendet. Für diesen Mehrkornansatz ist die Definition von bis zu 12 Kornklassen erlaubt.

Durch die vertikale Diskretisierung der Sohle in mehrere Schichten und einem darauf abgestimmten Schichtenmanagement lassen sich Erosions- und Auflandungsprozesse sowie die Deckschichtbildung nachvollziehen. HYDRO_FT-2D berücksichtigt den Einfluss der Flusskrümmung sowie der Längs- und Querneigung der Gewässersohle über empirische Teilmodelle. Für Details zur Software sowie der zugrundeliegenden Modellvorstellungen wird auf die Benutzerhandbücher *Nujić und Hydrotec* (2015) bzw. *Nujić, Hydrotec und Hunziker* (2015) und der ausführlichen Beschreibung in *Klar* (2016) Kapitel 2.7 verwiesen.

2.2 Modellparameter

Die Steuerung der mathematisch-numerischen Teilmodelle, aus denen sich HYDRO_FT-2D zusammensetzt, wird über hydraulische und Geschiebetransport-Modellparameter realisiert. Diese wirken sich jeweils global auf das gesamte Modell aus. Die wichtigsten Parameter, die einen wesentlichen Einfluss auf das Berechnungsergebnis ausüben bzw. für die eine Sensitivitätsanalyse geplant ist, sind in folgender Tabelle 2.1 sowie ausführlich in *Klar* (2016) beschrieben.

Tabelle 2.1: ausgewählte Modellparameter der Software HYDRO_FT-2D

Parameter	Kurzbeschreibung
SCF	Parameter zur Beschleunigung des Rechenlaufs [-]: Bei hochinstationären Prozessen führt eine Beschleunigung des Rechenlaufes zur Beeinflussung der Ergebnisse und im Extremfall zu Oszillationen und Instabilitäten in der Numerik.
θ_{cr}	dimensionslose kritische Sohlschubspannung nach Shields $\theta_{cr} = \theta_{ce}$
SCF_{Formel}	Faktor k_F zur Korrektur des Vorfaktors der Geschiebetransportformeln MPM und MPM/Hunziker
$SCFG$	Morphodynamischer Skalierfaktor zur Beschleunigung der Berechnung [-]
pal und pul	Parameter zur Steuerung der Schichtdicken des vertikalen Sohlaufbaus
$d_{i,m}$	mittlere Korngröße der Kornklasse bzw. Fraktion i in [mm]

2.3 Anfangs- und Randbedingungen

Aus mathematischer Sicht sind zur Lösung des numerischen Gleichungssystems Anfangs- und Randbedingungen erforderlich. Randbedingungen müssen prinzipiell für den gesamten Rand eines Berechnungsnetzes vorgegeben werden. Das Modell HYDRO_FT-2D unterscheidet zwei Typen. Bei geschlossenen Rändern verläuft die Strömung parallel zum Rand und ruft keine tangentialen Schubspannungen hervor (sogenannte *slip-velocity*-Randbedingung). Der zweite Typ wird als offener Rand bezeichnet. Ränder dieses Typs werden im Gegensatz zu den geschlossenen Rändern durchströmt. Unter diese Kategorie fallen insbesondere die Zulauf- und die Auslaufränder. An Zulaufändern können u. a. Abflussganglinien bzw. Hydrographen [m^3/s] spezifiziert werden. Ebenso können Geschiebeeinträge als Zeitreihen bzw. Sedigraphen über die Definition der zeitlich variablen Stoffmenge [kg/s] und der Fraktionsanteile p_i [%] jeder Kornklasse i vorgegeben werden. Am Auslaufrand kann entweder eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung oder alternativ ein Energieliniengefälle definiert werden. Die Sohle am Auslaufrand ist fixiert und kann nicht erodieren.

Als hydraulische Anfangsbedingung können optional Wasserspiegelhöhen und Strömungsgeschwindigkeiten im gesamten Berechnungsgebiet zum Startzeitpunkt der Simulation definiert werden. Die Verteilung der Rauheitsbeiwerte k_{St} und $k_{St,r}$ nach *Strickler* sowie der konstanten Wirbelviskosität ν_0 erfolgt in HYDRO_FT-2D über sogenannte Materialtypen. Diese werden als Anfangsbedingung jedem Element des Berechnungsnetzes zugeordnet. Häufig werden dazu Materialzonen (geschlossene

Bereiche gleichen Materialtyps) definiert.

Die Korngrößenverteilung der Gewässersohle wird über die Fraktionsanteile p_i der einzelnen Kornklassen i gesondert für jeden Knoten des Berechnungsnetzes und jede der drei Schichten (Austauschschicht AS, Unterschicht US und Grundschicht GS) definiert. Wichtig ist die Vorgabe der maximal erodierbaren Tiefe der Sohle als anfängliche Differenz Δz_{GG} der Kote der Sohloberfläche z_B und der Kote des Grundgesteins z_{GG} . Diese kann ebenso wie die Korngrößenverteilung für jeden Knoten gesondert definiert werden. Bereiche, für die $\Delta z_{GG} = 0$ gesetzt wird, gelten im Modell als nicht erodierbar bzw. sind fixiert.

3 Modellgrundlagen

Die Modellgrundlagen stützen sich auf die Untersuchungen der Oberflächenwasserhydraulik (siehe Anlage 4.1, Bericht Hydraulik – Modellaufbau und –anpassung), bisherige vom Auftraggeber Wasserwirtschaftsamt Donauwörth zur Verfügung gestellte Studien und insbesondere auf die Morphologische Studie der TUM (Rutschmann, Grünzner & Liepert, 2012). In den folgenden Unterkapiteln werden jene Grundlagen zusammengefasst, die für den Modellaufbau (Kapitel 4) Verwendung finden.

3.1 Hydrologische Daten

Im Projektgebiet befinden sich der Pegel „Haunstetten“ zwischen der Lechstaustufe 23 und dem Hochablass und der Pegel „Augsburg u. d. Wertachmündung“. Über das Internet-Angebot des Gewässerkundlichen Diensts Bayern (<http://www.gkd.bayern.de/>) können jeweils die Abflussdaten beginnend mit dem Jahr 1976 sowie die Hauptwerte, die höchsten Abflüsse und die Hochwasser mit verschiedenen Jährlichkeiten abgerufen werden.

3.2 Vorhandenes 2D-Modell

Für das Geschiebetransportmodell stellt das hydraulisch kalibrierte 2d-Modell der Oberflächenwasserhydraulik die Ausgangsbasis dar. Dieses Modell wurde ursprünglich im Zuge der Hochwassergefahrenflächenermittlung im Auftrag des LfU von der RMD-Consult erstellt und für hydraulische Kalibrierung entsprechend angepasst. Weitere wesentlichen Merkmale des bestehenden Modells sind im Bericht Hydraulik – Modellaufbau und –anpassung in Anlage 4.1 beschrieben

3.3 Querprofilaufnahmen und Airborne LiDAR Bathymetrie (ALB) Daten

Zur Untersuchung der Sohleintiefung stehen Querprofilaufnahmen des Wasserwirtschaftsamtes und der Uniper ab dem Jahre 1976 zu Verfügung. Die Auswertung dieser Daten ermöglicht eine Abschätzung der Erosion bzw. Auflandung zwischen den Querprofilen für unterschiedliche Zeitabschnitte und damit des Geschiebetransports für Kalibrier- und Validierzeiträume.

Eine Möglichkeit zur Abschätzung ist eine Vorgangsweise analog zu jener, die bereits bei der Morphologischen Grundlagenstudie der TUM (Rutschmann et al., 2012) angewandt wurde. Je Querprofil werden zwei Begrenzungslotrechte der Sohle und ein Bezugshorizont definiert. Damit kann eine Querschnittsfläche, eine mittlere Sohlhöhe und über die Anwendung der Obeliskformel ein Volumen zwischen zwei Querprofilen berechnet werden. Die Differenzvolumina zweier Zeitpunkte der Querprofilen ergeben die Sohlenveränderungen und es lassen sich Auflandungs- oder Eintiefungstendenzen quantifizieren. Die einzelnen Änderungsvolumina der Reihe nach entlang der Flussachse aufsummiert ergeben entsprechend eine Geschiebe- bzw. Massensummenlinie.

Zum anderen kann aus den Querprofilen (QP) direkt ein Geländemodell der Flusssohle gewonnen werden. Dazu werden die einzelnen Querprofile eines Zeitraumes (z. B. Aufnahmejahr 1986) entlang der Gewässer-Achse „extrudiert“ d. h. ineinander übergeführt. Abbildung 3.1 zeigt beispielhaft eine Ansicht dreier Querprofile und der aus ihrem Verzug entstehenden Bathymetrie. Die Flusssohlenbegrenzung wird aus dem vorhandenen 2D-Modell der Oberflächenwasserhydraulik (Kapitel 3.2) übernommen. Deren Höhenverlauf wird allerdings linear zwischen den Anschlusspunkten an die jeweiligen Querprofile interpoliert. Anschließend werden die Querprofile entlang des Flusssohlenrandes auf die folgenden Querprofile verzogen (z. B. QP Fkm 56,0 auf QP Fkm 55,8). Die so erstellten Geländemodelle stellen die rekonstruierte Soll-Bathymetrie eines bestimmten Zeitpunktes dar (z. B. Jahr 1986). Die Differenz zwischen zwei Soll-Bathymetrien gibt Auskunft über die Sohlenveränderung in einem Zeitraum.

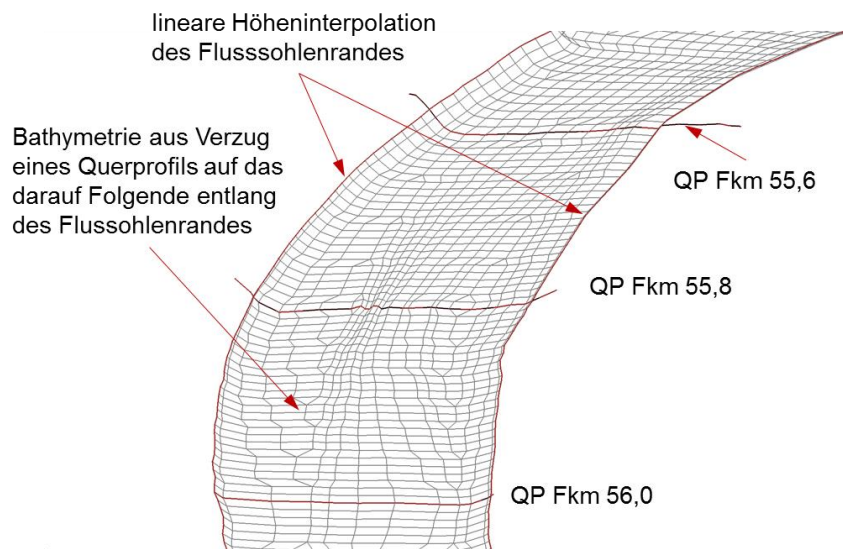


Abbildung 3.1: Erstellung der Soll-Bathymetrie aus Querprofilen Fkm 56,0, Fkm 55,8 und Fkm 55,6

Die Soll-Bathymetrien werden für das Jahr 1986, 1993 und 2010 erstellt, da hier eine ausreichend dichte Datengrundlage (Anzahl an Querprofilen) zur Verfügung steht. Deren Sohlhöhe im Sohlenbereich kann durch lineare Interpolation auf die Gitterstruktur des vorhandenen 2D-Modells übertragen werden. Bauwerke (Sohlstufen, Wehre) können bei fehlender Querprofile aus dem 2d-Modell der RMD-Consult übernommen werden. Damit lassen sich 2D-Modelle mit der Bathymetrie zum Startzeitpunkt von bestimmten Simulationszeiträumen (Kalibrierung, Validierung) rekonstruieren und berechnete Sohlhöhen knoten- oder abschnittsweise mit gemessenen Sohlhöhen (aus dem QP Verzug) direkt vergleichen.

Im Jahr 2013 wurde eine Befliegung des Lechs durch die Firma AHM (AirborneHydroMapping GmbH) durchgeführt und Airborne LiDAR Bathymetrie (ALB) Daten aufgenommen. Damit stehen erstmalig für diesen Lech-Abschnitt flächige Topographie- und Bathymetrie-Daten sowie eine Aufnahme des Wasserspiegels zum Befliegungszeitpunkt zur Verfügung. Weißwasserbereiche und tiefe Kolke können mit der ALB Technik nicht erfasst werden. Diese Lücken in der Sohle (Abbildung 3.1) werden durch die Höheninformation des vorhandenen 2D-Modells (Höhenbasis: Querprofilenaufnahmen des Jahres 2010) gefüllt. Damit steht eine weitere Soll-Bathymetrie für den direkten Vergleich mit Berechnungsergebnissen bereit.

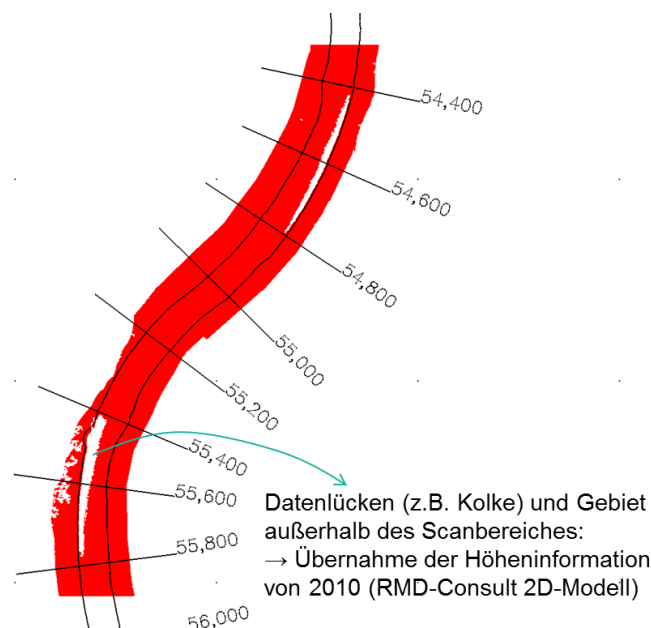


Abbildung 3.2: Datenbereich der AHM Vermessung (rot), Begrenzung der Flusssohle und Lech-Querprofilenaufnahmen

Die folgende Abbildung 3.3 illustriert die Unterschiede der Sohlmorphologie vor allem zwischen den Querprofilspuren. Die Technik des Verzugs eines Querprofils auf ein anderes zur Generierung der Bathymetrie (Abbildung 3.3, linke Seite) kann die tatsächliche Morphologie (Abbildung 3.3, rechte Seite, ALB-Daten) nur näherungsweise erfassen. Dies ist bei der Auswertung und dem Vergleich der berechneten und vermessenen Sohlhöhendifferenzen und der Beurteilung der Kalibrierqualität entsprechend zu berücksichtigen.

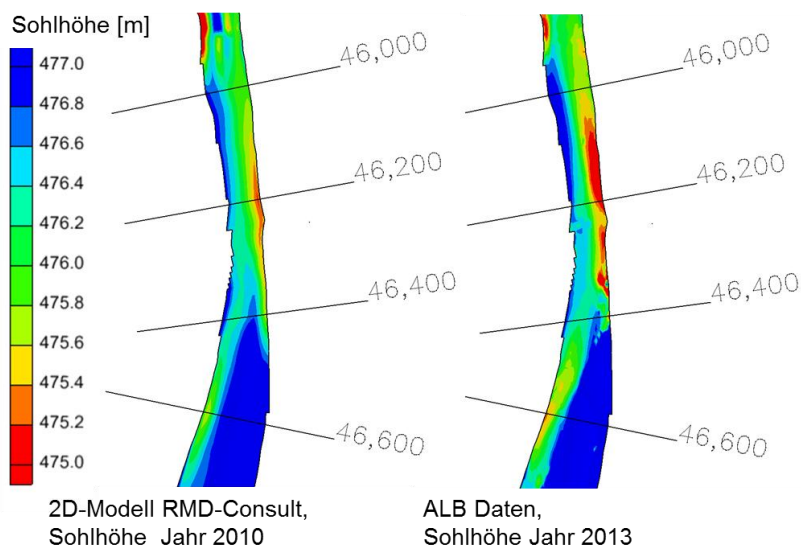


Abbildung 3.3: Teilabschnitt des Lechs, (links) 2D-Modell RMD-Consult mit der Sohlhöhe des Jahres 2010, (rechts) ALB-Daten, Sohlhöhe 2013

3.4 Tertiärschicht

Im Projektgebiet erreicht die schützende quartäre Sohlschicht (Restkiesauflage) an manchen Stellen ein kritisches Maß, sodass die tertiäre Schicht erreicht wird. Für die morphodynamische Modellierung ist die Kenntnis der Lage der tertiären Schicht von großer Bedeutung, da im Erosionsfall an diesen Stellen mit einer massiven Zunahme der Erosionsrate zu rechnen ist. Als Datengrundlage dienen Informationen aus einem Längenschnitt von Fkm 36,43 bis Fkm 56,81 aus dem Jahr 1966 und aus einem Längsschnitt von Fkm 47,00 bis Fkm 56,40 aus dem Jahr 1933. Diese enthalten die Flusskilometrierung und die Höhenlage der tertiären Schicht. Vereinfachend wird angenommen, dass sich die Höhenlage der tertiären Schicht normal auf die Flussachse links- und rechtsufrig fortsetzt. Abbildung 3.4 zeigt ein Längsprofil mit eingezeichneter Flusssohle im Jahr 2010 und dem sogenannten DZG-Layer, welcher die Höhenlage des Tertiärs markiert.

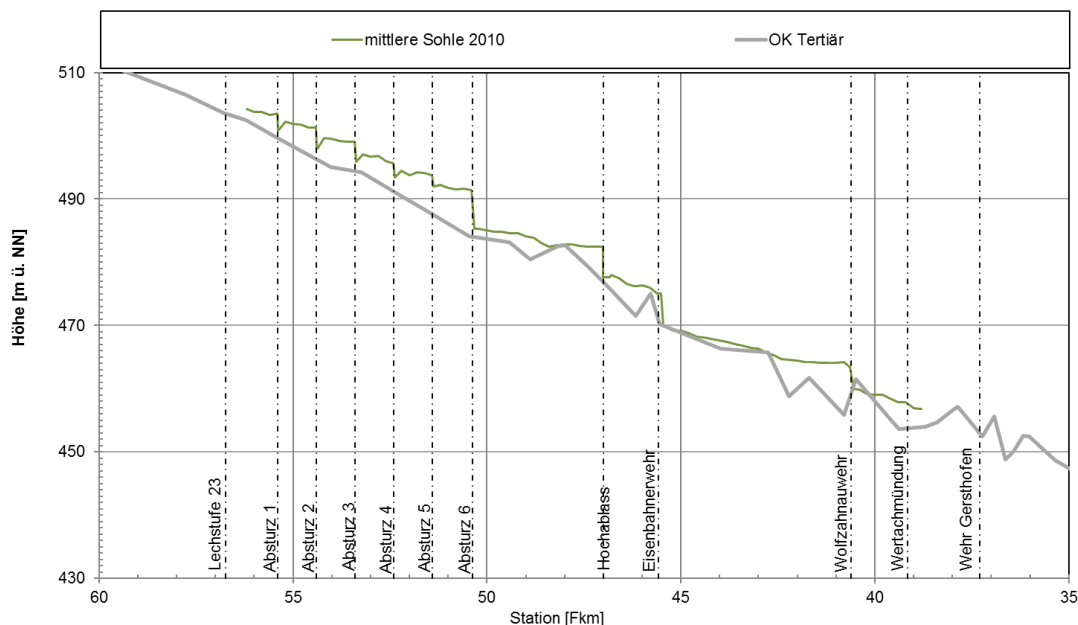


Abbildung 3.4: Längsprofil mit Flusssohle und Höhenlage des Tertiärs

3.5 Kornzusammensetzung des Sohlenmaterials

Für die Durchführung der morphologischen Untersuchungen stellen Informationen über die Kornzusammensetzung (a) des Sohlenmaterials (Unterschicht, Deckschicht, Vorland) sowie (b) der Vorländer (potenzielle Sedimentquellen), wichtige gewässerspezifische Parameter dar. Diese dienen als Eingangsparameter für Parametersensitivitätsanalysen und den Schichtenaufbau im Mehrkornmodell HYDRO_FT-2D. In der Vergangenheit sind verschiedene Untersuchungen zur Flusssohle/Vorländer vorgenommen worden.

Es stehen Siebanalysen aus den Jahren 1965, 1987 und 1999 zur Verfügung. Im Zuge der morphologischen Grundlagenstudie der TUM (Rutschmann et al., 2012) im Jahr 2011 wurden Mischproben, Deckschichtproben, Vorlandproben und Proben in einer Kiesgrube südlich und nördlich von Augsburg entnommen und analysiert. Bereits aus dieser Studie geht hervor, dass ein Datendefizit im Stichprobenumfang besteht. Dieses Datendefizit wirkt sich besonders im Stadtbereich von Augsburg aus, da im Jahr 2011 keine Untersuchungen durchgeführt wurden.



Abbildung 3.5: Volumenprobeentnahme mittels Baggerschurf

Aus diesem Grund wurde ein gemeinsamer Ortstermin (Arge und WWA Donauwörth) zur Geschiebeprobeentnahme am 25.10.2016 vereinbart. Die im Voraus abgestimmten Feststoffprobestellen wurden in Abhängigkeit der Sohlenbeschaffenheit definiert. Gleichzeitig wurde der aktuelle Zustand mit Fotos dokumentiert. Die Lage der entnommenen Proben ist in Abbildung 3.9 ersichtlich. Zusätzlich zu den Baggerschürfen (Abbildung 3.5) wurden Kornverteilungen mittels Linienzahlanalyse bzw. händische Volumenproben (Abbildung 3.8) aufgenommen. Mit dieser Methode kann eine bessere Aussage über die Kornzusammensetzung entlang der gesamten Gewässerstrecke erreicht werden. Insgesamt konnten acht Baggerschürfe, drei Linienzahlanalysen und vier händische Volumenproben erfasst werden.



Abbildung 3.6: Probeentnahmestellen; (links) Vorlandprobe mit Bodenprofil
Fkm 53,60; (rechts) Kiesbank, Fkm 45,40

Eine Probeentnahme erfolgte planmäßig im Vorland (linksufrig Fkm 53,6). Der Oberboden (Humusauflage) wurde abgetragen und die darunterliegende Kiesablagerung in zwei Schichten entnommen (Abbildung 3.6). Die Probe zeigte, dass das Untergrundmaterial aus den Kiesablagerungen der historischen Flusslandschaft besteht.

Bei der Besichtigung des Gewässerabschnittes wurde deutlich, dass in manchen Bereichen keine ausgeprägte Deckschicht mehr vorhanden ist. Für die Probenentnahmen wurde die Deckschicht (ca. 5 cm) mit einer Baggerschaufelbreite (\approx 1,40 m) abgezogen und in einen Behälter gefüllt (Abbildung 3.7). Für die darunterliegende Unterschicht wurde Material bis zu einer Tiefe von ca. einem Meter entnommen und zur Siebanalyse in die dafür vorgesehenen Wannen gefüllt.



Abbildung 3.7: (links) typische Entnahme einer Deckschicht, (rechts) typische Entnahme der Unterschicht

Zwischen Staustufe 23 und dem Hochablass wurden die vorhandenen Siebanalysen durch weitere drei Proben ergänzt (Abbildung 3.9). Für die Proben bei Fkm 55,10 und 51,20 wurde eine repräsentative Stelle auf einer Kiesbank ausgewählt und in zwei Schichten entnommen. Bei der Probenentnahme Fkm 47,20 handelt es sich um den Stauraum vor dem Hochablass. Hier war es nicht möglich Sohlenmaterial im Uferbereich zu entnehmen. Um eine charakteristische Kornzusammensetzung dafür zu erhalten, musste der Bagger eine Mischprobe in Flussmitte entnehmen.

Im Augsburger Stadtbereich wurde die Anzahl der Probenentnahmen auf vier Standorte begrenzt, da eine Zufahrt schwer möglich war. Dennoch konnten charakteristische Stellen ausgewählt werden. Die erste Probestelle liegt ca. 100 m unterstrom des Eisenbahnerwehrs. In diesem Bereich wurde in den letzten Jahren ein offenes Deckwerk zur Sohlstabilisierung aufgebracht, um die geringe tertiäre Überdeckung zu schützen. Die Probeentnahme erfolgte linksufrig auf der Kiesbank.

Für die Probe bei Fkm 52,65 zeigte sich die Möglichkeit einer Entnahme in Flussmitte (Nassbaggerung). Mit dieser Probe können Vergleiche zwischen dem Ufer und der Gewässermittle gemacht werden. Unterhalb des Wolfzahnuwehrs wurden zwei weitere Proben (Deckschicht und Unterschicht) genommen.

Die Kiesproben wurden in weiterer Folge an die Technische Universität München (Geotechnik) überführt, welche mittels Siebanalysen im Labor die Korngrößenverteilung bestimmten. Nach Übermittlung der Daten Ende des Jahres 2016 wurden im ersten Schritt die Sieblinien aus den unterschiedlichen Jahren miteinander verglichen. Des Weiteren erfolgte eine Gegenüberstellung der Kennwerte der händisch entnommenen Proben mit jenen der Baggerschürfe (siehe Tabelle 3.1).



Abbildung 3.8: (links) Linienzahlanalyse, (rechts) händische Volumenprobenentnahme

Für die Bestimmung der Kornverteilungskurven der Unterschicht aus den Linienzahlanalysen wird angenommen, dass die Feianteile unterschätzt werden. Daher werden diese mit Hilfe einer Fuller-Kurve gemäß *Fehr* (1987) ergänzt. Die Ergebnisse der Linienzahlanalysen ergeben Kornverteilungskurven sowohl für die Deck- als auch für die Unterschicht.

Im Anschluss werden die Sieblinien statistisch aufbereitet und deren charakteristische Korndurchmesser (d_{30} , d_{50} , d_{90} , d_m) bestimmt. Der mittlere Korndurchmesser d_m einer Kornverteilung bzw. -mischung wird aus den Fraktionsanteilen p_i (mit i der Anzahl an Fraktionen) gemäß Gleichung 3.1 nach *Müller* (1943) bestimmt

$$d_m = \sum_i p_i \cdot d_{i,m} \quad (3.1)$$

Tabelle 3.1 bietet einen Überblick der Auswertung aller gemessenen Kornkenngrößen sowohl der vorhanden (Jahr 2011) als auch der neu gewonnen Proben (Jahr 2016).

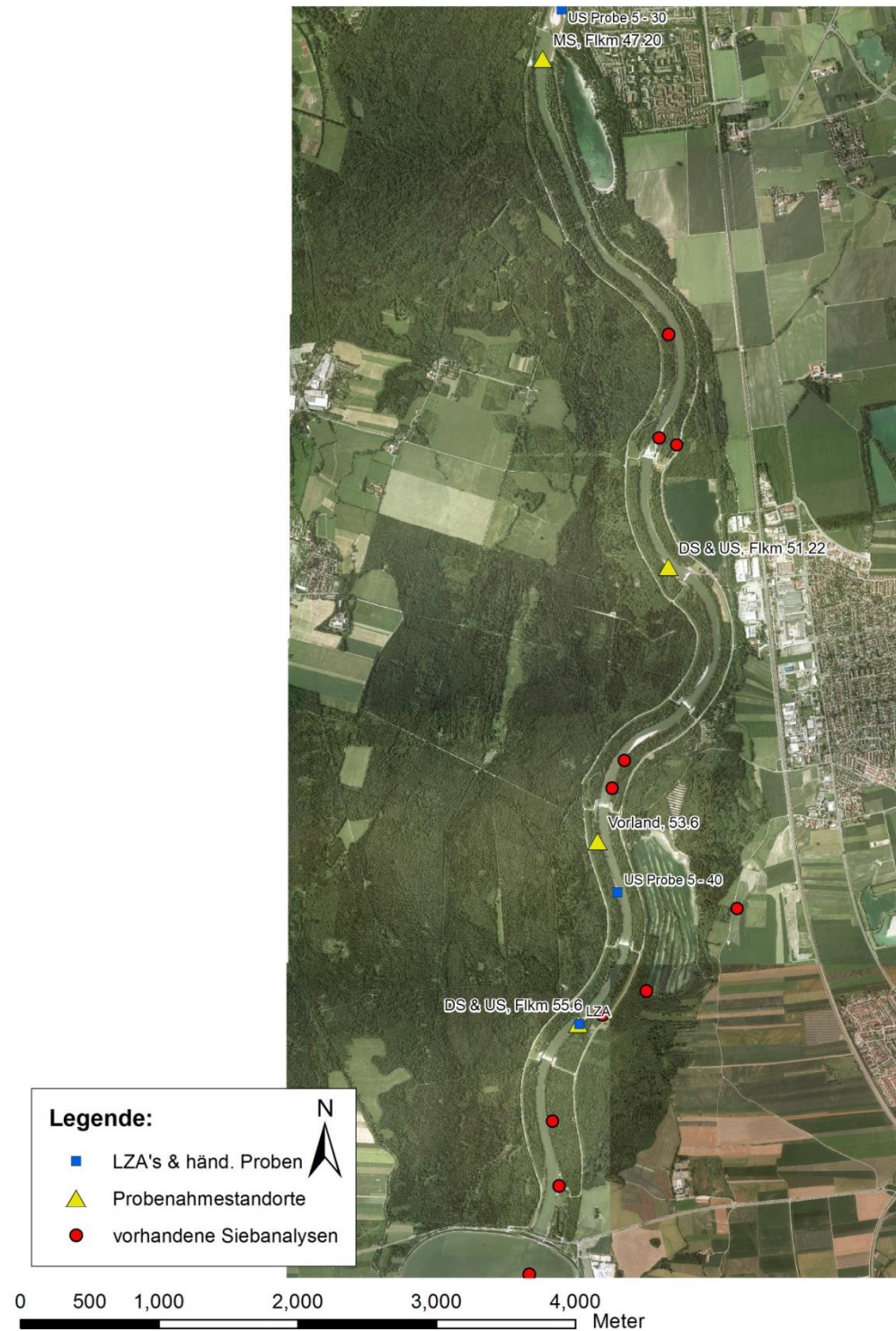


Abbildung 3.9: Übersicht aller Geschiebeprobenentnahme Punkte im Bereich zwischen Fkm 56,00 – Fkm 47,20 im Jahr 2011 und 2016



Abbildung 3.10: Übersicht aller Geschiebeprobenentnahme Punkte im Bereich zwischen Fkm 47,20 – Fkm 38,00 im Jahr 2011 und 2016

Tabelle 3.1: Übersicht der Kornkenngrößen aller Proben der Jahre 2011 bis 2016

Bezeichnung	Jahr	Fkm	charakteristische Korndurchmesser				
			d_{30} [mm]	d_{50} [mm]	d_m [mm]	d_{90} [mm]	d_{max} [mm]
Hochablass - Lechstaustufe 23							
Unterschicht:							
S_2011_MS2	2011	56,40	8,52	15,33	20,51	43,78	99,67
S_2011_MS3	2011	55,90	9,31	17,79	24,58	58,46	100,67
82171_2016_US	2016	55,00	10,03	17,45	25,13	55,09	157,00
S_2011_MS4	2011	54,90	10,10	17,79	21,95	45,62	92,00
SA_2016_US	2016	54,00	10,94	17,89	21,03	42,74	80,00
S_2011_US7b	2011	53,30	9,05	19,50	25,33	58,49	90,33
S_2011_US8b	2011	53,20	8,68	15,37	20,15	43,84	88,33
82167_2016_US	2016	51,22	9,04	17,14	26,49	56,26	194,00
S_2011_MS9	2011	50,20	6,57	11,06	14,95	32,42	68,67
S_2011_MS11	2011	49,50	9,43	16,88	21,59	44,67	103,00
82166_2016_MS	2016	47,20	10,33	18,46	26,33	57,15	143,00
Deckschicht:							
82172_2016_DS	2016	55,00	9,49	25,68	33,92	82,98	132,00
LZA_2016_DS	2016	55,00	42,13	61,49	62,01	112,49	150,00
S_2011_DS7a	2011	53,30	50,75	65,92	65,07	91,20	92,00
S_2011_DS8a	2011	53,20	41,17	51,53	52,82	84,88	104,33
82168_2016_DS	2016	51,22	5,61	12,93	22,79	56,23	128,00
Vorland:							
82169_2016_DS	2016	53,60	7,35	16,37	20,65	49,98	100,00
82170_2016_US	2016	53,60	1,02	10,32	14,81	38,55	63,00
S_2011_V5	2011	54,90	9,35	14,17	17,30	34,84	85,00
S_2011_V10	2011	50,20	10,01	17,26	22,47	51,17	87,00
Stadtbereich Augsburg							
Unterschicht:							
S_2011_MS12a	2011	46,90	0,83	7,82	12,57	32,00	77,33
SA_2016_US	2016	46,81	7,55	15,14	20,98	51,79	80,00
S_2011_MS12b	2011	46,82	6,17	11,73	14,26	30,10	99,00
S_2011_MS12c	2011	46,83	6,93	12,27	18,46	45,88	104,67
82164_2016_US	2016	45,45	5,58	11,15	15,55	32,97	98,00
SA_2016_US	2016	44,00	13,77	25,28	32,67	82,36	100,00
LZA_2016_US	2016	43,20	8,52	23,38	31,78	75,29	120,00
SA_2016_US	2016	43,20	8,33	13,66	17,83	34,24	80,00
82163_2016_MS	2016	42,65	14,16	24,02	31,44	66,67	121,00
82161_2016_US	2016	40,50	10,75	17,18	20,72	44,53	97,00
82159_2016_US	2016	39,70	6,80	14,36	21,10	52,94	103,00
LZA_2016_US	2016	39,70	11,52	31,49	37,75	80,88	150,00
Deckschicht:							
82165_2016_DS	2016	45,45	14,41	26,14	37,37	94,41	137,00
LZA_2016_DS	2016	43,20	32,89	52,73	51,40	94,41	120,00
82162_2016_DS	2016	40,50	10,54	30,21	35,05	81,94	114,00
82160_2016_DS	2016	39,70	25,61	42,84	48,17	101,91	125,00

4 Modellaufbau

4.1 Berechnungsnetze

Das aus Vierecks- und Dreieckselementen zusammengesetzte lineare Berechnungsnetz der Oberflächenwasserhydraulik (siehe Anlage 4.1, Bericht Hydraulik – Modellaufbau und –anpassung) wird für das Geschiebetransportmodell als Basis übernommen. Die Sohlhöhen des Flussschlauchnetzes werden allerdings an den Startzeitpunkt des Kalibrierungszeitraums angepasst. Diese Anpassung erfolgt unter Verwendung der Querprofilaufnahmen und der daraus abgeleiteten Bathymetrie (Kapitel 3.3). Bauwerke (Sohlstufen, Wehre) werden aufgrund fehlender Querprofile aus dem vorhandenen 2D-Modell übernommen (Kapitel 3.2). Zwischen der Querprofil-Bathymetrie und den übernommenen Bauwerksnetzteilen sind kurze Übergangsbereiche in Form von Verzugsstrecken vorgesehen, um un stetige und abrupte Höhensprünge in der Sohlage zu vermeiden.

Bei 2D-numerischen Geschiebetransport-Simulationen steigen die Rechenzeiten im Vergleich zu Reinwasserbetrachtungen erheblich an. Damit die Rechenzeit im Rahmen bleibt, wird das Berechnungsnetz verkleinert (siehe Kapitel 5.1). Als laterale Begrenzung beiderseits der Flussachse dienen die Dammkronen. Das Gesamtgebiet wird zudem in zwei Teilgebiete aufgeteilt:

- Teilgebiet 1 „Auwald“ von Fkm 56,20 bis Fkm 47,20
- Teilgebiet 2 „Stadtbereich Augsburg“ von Fkm 47,20 bis Fkm 39,00

Die Materialbelegung im Modell bleibt mit Ausnahme der Gewässersohle unverändert. Diese wird in Sohlabschnitte unterteilt, die sich an der Lage der Querprofilaufnahmen orientieren und die Bauwerke (Sohlstufen, Wehre) aussparen (Abbildung 4.1).

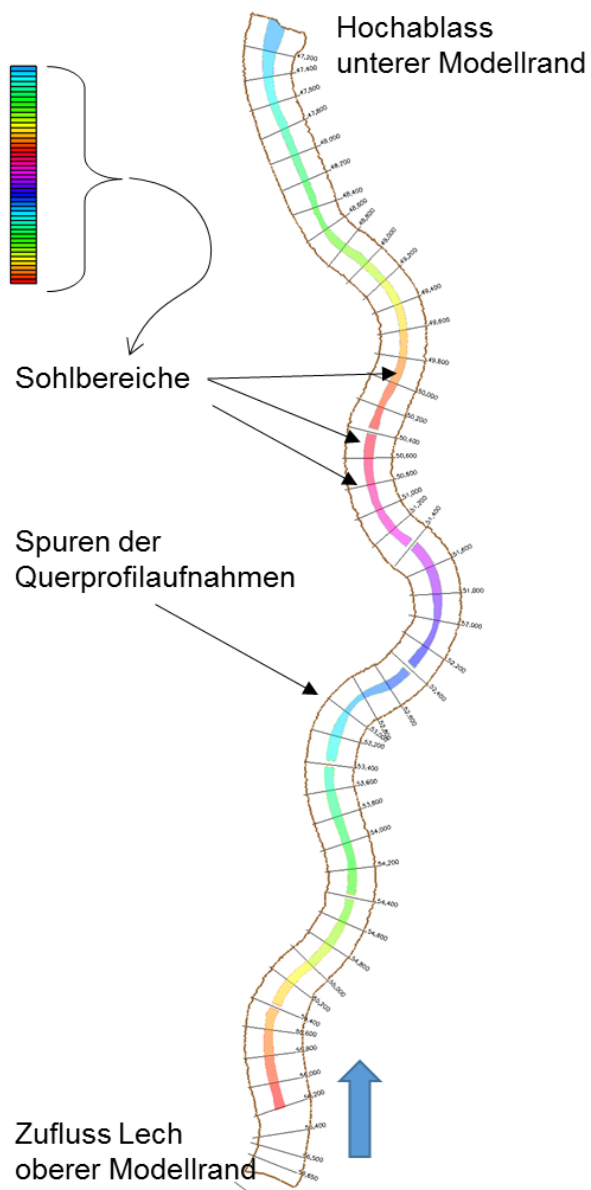


Abbildung 4.1: Sohlabschnitte im Teilgebiete 1 „Auwald“ von Fkm 56,20 bis Fkm 47,20

4.2 Modellspezifische Parameter und Anfangsbedingungen

In der folgenden Tabelle 4.1 sind alle wesentlichen modellspezifischen Parameter angegeben, welche zum Kalibrierungsstart gesetzt werden. Die im Rahmen der geplanten Sensitivitätsanalyse (Kapitel 5.4) zu variierenden Parameter sind in roter Schriftfarbe hervorgehoben. Die Wahl der Kornklassen bzw. Fraktionen ist gesondert in Kapitel 4.3 beschrieben.

Tabelle 4.1: Modellparameter (Bezeichnungen gemäß HYDRO_FT-2D Definition)

HYDRO_AS-2d Global Parameter:			
Zeitintervall SMS [s]	43200		
Zeitintervall Q-Strg [s]	3600		
H _{min} [m]	0,01		
VELMAX [m/s]	15,0		
Amin	10		
CMUVISC	0,6		
SCF	3		
HYDRO_AS-2d Global Parameter:			
Rauheitsermittlung	" θ_{cr} & k_{St} : nach Vorgabe aus SMS"	Parameters / Kohäsive Sedimente:	""
SCF _{ks} Koeff. zur Bestimmung der Rauheitsgröße $k_s = SCF_{ks} * d_m$ [-]	2	τ_{cd} krit. Schubspannung für Ablagerungen [N/m ²]	0,09
Stofftransportformel	"Meyer-Peter und Müller (MPM)"	τ_{ce} krit. Schubspannung für die Erosion [N/m ²]	0,11
Transport nur als Geschiebe ?	Ja		
Schubspannungsschwankungen (MPM)	"AUS"	Er _{Koeff} Erosionskoeffizient [kg/m ² /s]	0,00002
θ_{cr} (MPM) [-]	0,047	Sedimenteigenschaften:	""
SCF – Formelskalierfaktor (k_F) [-]	0,625	ρ_s Dichte des Sediments [kg/m ³]	2650
CF Quergefälle – Koeffizient [-]	0,85	Porosität – Luftanteil n_p im Sediment [-]	0,37
A _r (Krümmungskoeffizient) [-]	8	φ_i – innerer Reibungswinkel d. wasserbenetzten Sohle [°]	37
SCFG – Skalierfaktor zur Beschleunigung [-]	3	γ_{cr} - innerer Reibungswinkel der trockenen Sohle [°]	37
DZ _{max} – max. erlaubte Sohländerung [m]	0,1	Anzahl Fraktionen	6
τ_{max} - max. erlaubte Sohlschubspannung [N/m ²]	500	$d_{i,m}$ [mm] / 1. Fraktion	2
Max. erlaubte Konzentration C _{max} [kg/m ³]	100	$d_{i,m}$ [mm] / 2. Fraktion	10
Turbulente Schmidt-Zahl (Sc _t) [-]	0,70	$d_{i,m}$ [mm] / 3. Fraktion	24
Parameter Dicke Austauschschicht (pal) [-]	0,3279	$d_{i,m}$ [mm] / 4. Fraktion	47,5
Parameter Dicke Unterschicht (pul) [-]	38,00	$d_{i,m}$ [mm] / 5. Fraktion	87
		$d_{i,m}$ [mm] / 6. Fraktion	152,5

Als Anfangsbedingung muss für das Modell HYDRO_FT-2D eine ganze Reihe an Vorgaben definiert werden (siehe Kapitel 2.3). Folgende Liste fasst diese zusammen:

- **Hydraulische Anfangsbedingungen:**
Die Kalibrierungsberechnungen starten trocken, d. h. es wird weder ein Anfangswasserspiegel noch eine anfängliche Fließgeschwindigkeit je Netzknoten vorgegeben.
- **Rauheitsbeiwerte:** Die anfänglichen Rauheitsbeiwerte (Gesamt- k_{St} und Kornrauheit $k_{St,r}$ nach *Strickler (1923)* für jeden Netzknoten) im Sohl- und Böschungsbereich sowie im Vorland werden analog zum 2D-Modell der Oberflächenwasserhydraulik (siehe Anlage 4.1, Bericht Hydraulik – Modellaufbau und –anpassung) belegt.
- **Korngrößenverteilung:** Die Vorgangsweise zur Festlegung des vertikalen Sohlaufbaus wird in Kapitel 4.4 gesondert beschrieben.
- **Festlegung der morphologisch aktiven Bereiche:**
Alle Netzbereiche bzw. Knoten mit Ausnahme der Sohle werden als nicht erodierbar gesetzt bzw. fixiert ($\Delta z_{GG} = 0$). Ebenso werden Bauwerksbereiche (Sohlstufen, Abstürze, Wehre) fixiert. Eine Auflandung bzw. der Transport von Geschiebe über diese Bereiche ist dennoch stets möglich.
- **Vorgabe der maximal erodierbaren Tiefe der Sohle:**
Eine Modellierung der lokalen Erosion ist ab dem Erreichen des Tertiärs nicht mehr sinnvoll möglich, da sich die Korngrößen der Sohle schlagartig verringern und die auftretenden Transportprozesse mit Geschiebetransportansätzen für Kies nicht erfasst werden können. Daher wird die maximal erodierbare Tiefe der Sohle als anfängliche Differenz Δz_{GG} der Kote der Sohloberfläche z_B und der Kote des Tertiärs z_{GG} modelliert (siehe Kapitel 3.4). Das Modell gibt somit Auskunft über das Erreichen des Tertiär-Niveaus. Geschiebetransportprozesse finden ab diesem Zeitpunkt über ein fixiertes Höhenniveau statt, wobei Auflandungen (Selbsteilung des Flusses durch Verfüllmaterial) möglich sind.

4.3 Wahl der Kornklassen

Die Wahl der Kornklassen und deren Anzahl n beeinflusst die Qualität und die Rechenzeit numerischer Berechnungen in erheblichem Maße. Die Software HYDRO_FT-2D ermöglicht die Definition von bis zu 12 Kornklassen. *Umach (2013)* untersucht in seiner Arbeit diesen Aspekt umfassend. Seinen Empfehlungen folgend, sind acht Kornklassen unabhängig von den hydraulischen und morphologischen Randbedingungen ausreichend. Wenn abschätzbar ist, dass Auflandungs- oder Umlagerungsprozesse eine dominierende Rolle spielen, kann die Anzahl der Klassen

auf drei reduziert werden. Laufen vorrangig Erosionsprozesse ab, werden vier Kornklassen empfohlen.

Für die Definition von Kornklassen können allgemein entweder die mittleren Korndurchmesser $d_{i,m}$, die maximalen Korndurchmesser d_i oder die Klassenbreiten Δd_i vorgegeben werden. Die fehlenden anderen Größen ergeben sich dann aus den Gleichungen 4.1 und 4.2. Mit der Kornklasse bzw. Fraktion i wird das Korngrößenintervall i mit der Klassenbreite

$$\Delta d_i = \begin{cases} d_i - d_{i-1} & \text{für } i > 1 \\ d_i & \text{für } i = 1 \end{cases} \quad (4.1)$$

und dem mittleren Korndurchmesser

$$d_{i,m} = \begin{cases} (d_i + d_{i-1})/2 & \text{für } i > 1 \\ d_i/2 & \text{für } i = 1 \end{cases} \quad (4.2)$$

als arithmetisches Mittel im entsprechenden Intervall bezeichnet.

Für die numerische Modellierungen werden die Massenanteile der einzelnen Kornklassen (=Fraktionen) p_i benötigt. Über die Kornklassen und ihre Massenanteile lassen sich beliebige gemessene Sieblinien/Kornverteilung approximieren (siehe z. B. Abbildung 4.2). Der mittlere Korndurchmesser d_m einer approximierten Kornverteilung wird gemäß Gleichung 3.1 berechnet und entspricht in der Regel nicht jenem der gemessenen Sieblinie. Bei guter Wahl der Kornklassen ist die Abweichung gering.

Bei den Sohlproben (Kapitel 3.5) am Lech handelt es sich sowohl um weit- als auch um enggestufte Korngrößenverteilungen. Alle sollen jedoch in guter Qualität durch die gewählten Kornklassen abgebildet werden können. Die Auswertung der zur Verfügung stehenden Linienzahlanalysen ergibt als maximalen Korndurchmesser $d_{max} = 194$ mm. Dieser wird als obere Grenze $d_{i=n}$ der größten Kornfraktion $i = n$ festgelegt. Durch eine Verringerung der Klassenbreiten Δd_i im Bereich der kleineren Korngrößen soll zudem die Modellierung des meist feinen transportierten Geschiebes möglichst gut gelingen.

Es wurden verschiedene Anzahlen n an Kornklassen und Definitionen von Klassenbreiten Δd_i getestet. Die Ermittlung der besten Kornklassenvariante erfolgte durch einen visuellen Vergleich der gemessenen (Kapitel 3.5) und approximierten Korngrößenverteilungen (siehe z. B. Abbildung 4.2) und einer Beurteilung der Abweichung ihrer charakteristischen Korndurchmesser (d_{30} , d_{50} , d_{90} , d_m gemäß Gleichung 3.1). Die Wahl der Kornklassen (Tabelle 4.2) ist das Resultat vielfältiger Überlegungen und Tests unter Einbezug der fachlichen Erfahrung.

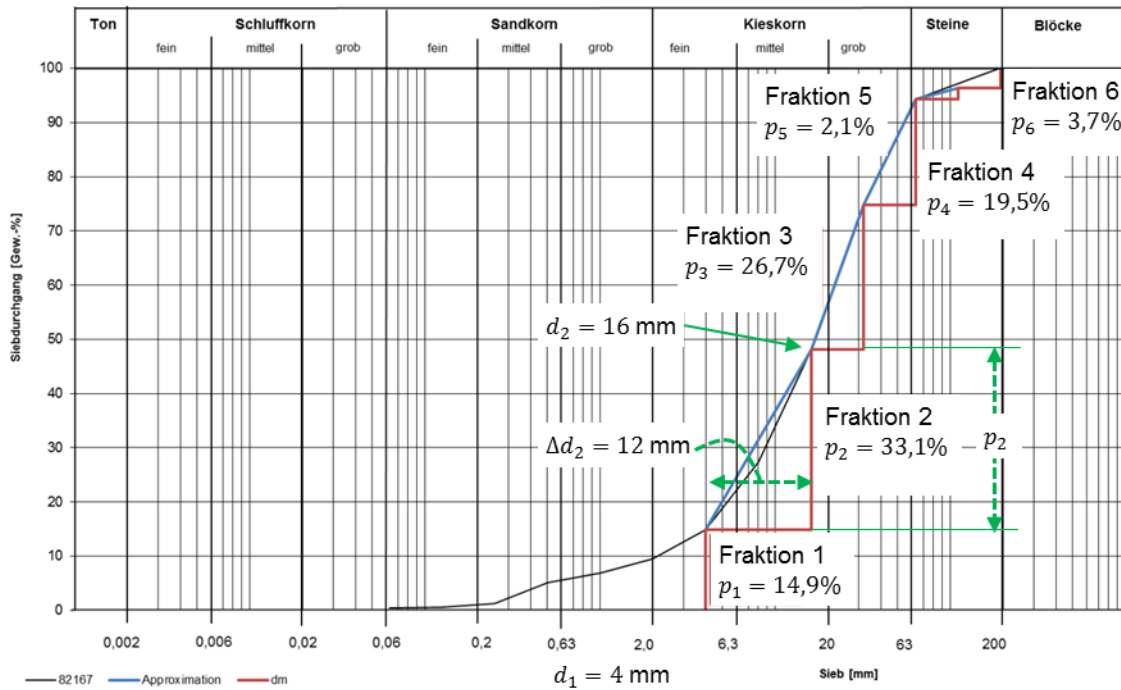


Abbildung 4.2: Probe Nr. 82167 gemessene (schwarz) und approximierte (blau) Korngrößenverteilung und Kornklassen (rot)

Tabelle 4.2 gibt eine Übersicht der resultierenden sechs Kornklassen, welche im numerischen 2D-Modell verwendet werden.

Tabelle 4.2: Wahl der Kornklassen

Kornklasse/Fraktion i	1	2	3	4	5	6
$d_{i,m}$ [mm]	2	10	24	47,5	87	152,5
d_i [mm]	4	16	32	63	111	194
Δd_i [mm]	4	12	16	31	48	83

4.4 Korngrößenverteilung der Gewässersohle

Für das Schichtenmanagement von HYDRO_FT-2D ist die Vorgabe des vertikalen Sohlenaufbaus notwendig (Kapitel 2.3). Am Beginn jeder Simulation muss für jeden Netzknoten und jede vertikale Schicht eine Korngrößenverteilung in Form von Fraktionsanteilen p_i (siehe Tabelle 4.3) gesetzt werden. Dabei wird zwischen Austausch-, Unter- und Grundschicht (AS, US und GS) unterschieden.

Über den gesamten Sohlbereich werden die vorhandenen Korngrößenverteilungen sogenannten Homogenabschnitten mit ähnlichen geomorphologischen Gegebenheiten, Längsgefällen und Sohlenbreiten zugewiesen. Diese setzen sich jeweils aus mehreren Sohlabschnitten, definiert in Kapitel 4.1 und für Teilgebiet 1 „Auwald“ in Abbildung 4.1 dargestellt, zusammen. Für manche Homogenabschnitte sind mehrere Informationen aus unterschiedlichen Probennahmen über die Korngrößenzusammensetzung verfügbar. In solchen Fällen werden diese gemittelt und zusammengefasst. Bei der Mittelung ist darauf zu achten, dass die Summe aller Fraktionsanteile p_i stets 1,0 ergibt. Beispielhaft wird für den Homogenabschnittes von Fkm 57,0 bis Fkm 55,4 der resultierende vertikale Sohlaufbau in Tabelle 4.3 gezeigt.

Tabelle 4.3: Fraktionsanteile des homogenen Sohlabschnitts Fkm 57,0 bis Fkm 55,4

	p_1 [-]	p_2 [-]	p_3 [-]	p_4 [-]	p_5 [-]	p_6 [-]	d_m [mm]
AS (Austauschschicht)	0,0672	0,0704	0,1205	0,3917	0,3116	0,0386	35,37
US (Unterschicht)	0,1667	0,3268	0,2713	0,1779	0,0573	0,0000	23,56
GS (Grundschicht)	0,1667	0,3268	0,2713	0,1779	0,0573	0,0000	23,56

4.5 Randbedingungen

Für die Zuflussganglinie am Lech (oberer Modellrand, Teilgebiet 1 „Auwald“) wird analog zur Oberflächenwasserhydraulik (siehe Anlage 4.1) die Ganglinie am Pegel „Haunstetten“ herangezogen. Die Zuflussganglinie der Wertach wird aus der Differenz der Ganglinie am Pegel „Augsburg u. d. Wertachmündung“ und Pegel "Haunstetten" (ohne zeitliche Verschiebung) ermittelt.

Am Zulauftrand des Teilgebiets 1 „Auwald“ wird kein Geschiebeeintrag angesetzt. Der Abfluss des Teilgebiets 1 „Auwald“ wird dem Lech-Zulauftrand des Teilgebiets 2 „Stadtbereich Augsburg“ zugeordnet, d. h. die Hydro- und Sedigraphen inklusive der Kornverteilung des transportierten Geschiebes (Transferinformation) werden flussabwärts weitergegeben. Als unterstromige Randbedingung wird die Schlüsselkurve, welche in der Reinwassermodellierung (Kapitel 3.2) verwendet wurde, herangezogen.

5 Vorgehensweise bei der Modellierung

Das Modellkonzept zur Kalibrierung und Validierung lehnt sich stark an Methoden an, die in *Klar* (2016) definiert und untersucht wurden. Das Konzept muss Lösungen für unterschiedliche Herausforderungen bieten. Bei der Simulation langjähriger Zeiträume

mit zweidimensionalen Strömungs- und Feststofftransportmodellen treten z. B. große Rechenzeiten auf. Bei der Frage nach der Anzahl an möglichen Rechenläufen, die im Rahmen von Kalibrierung, Validierung und Sensitivitätsanalysen in einem vorhandenen Bearbeitungszeitraum durchgeführt werden können, ist die Rechenzeit sogar der bestimmende Faktor. Darum präsentiert Kapitel 5.1 Verbesserungsmaßnahmen.

Die Kalibrierung hydraulischer Modelle gehört zu den Standardaufgaben. Wie aber lassen sich Geschiebetransportmodelle kalibrieren? Anders als bei einer hydraulischen Kalibrierung, die für einen stationären Abfluss erfolgen kann, muss für eine Kalibrierung von Geschiebetransportprozessen immer eine Zeitperiode betrachtet werden. Man spricht in diesem Zusammenhang daher von einer morphodynamischen Kalibrierung. Die Rauheitsbeiwerte nach Strickler k_{St} und $k_{St,r}$ sind u. a. Funktion der aktuellen Fließtiefe, des Sohlgefälles und der Kornzusammensetzung der Sohle. Die Definition von z. B. wassertiefenabhängigen *Strickler-Rauheitsbeiwerten* wird allerdings erst in den zukünftigen HYDRO_FT-2D Versionen möglich sein. Somit können sie nur zeitlich invariant als abschnittsweise konstante Werte vorgegeben werden. Der Frage wie man unter dieser Voraussetzung einen passenden modellspezifischen Parametersatz finden kann, wird in Kapitel 5.2 nachgegangen.

Die Validierung ist die Anwendung des Strömungs- und Feststofftransportmodells mit allen Parametereinstellungen der Kalibrierung für einen anderen Zeitraum. Kapitel 5.3 definiert den Validierungszeitraum und fasst Modellierungsdetails zusammen. Das Modell gilt als validiert, wenn die gemessenen Sohldifferenzen des Validierungszeitraums den berechneten Sohldifferenzen in ausreichend genauem Maße entsprechen.

Die Unsicherheiten die durch unvollständige bzw. ungenaue Datengrundlagen, der modellhaften Abbildung der natürlichen Sedimenttransportprozesse und der Bandbreite an physikalisch sinnvollen Modellparametern entstehen, werden in Kapitel 5.4 behandelt. Insbesondere soll damit die mit dieser Modellierung erzielbare Prognosegüte beurteilt werden.

5.1 Maßnahmen zur Verringerung der Rechenzeit

Beschränkung auf geschieberelevante Zeiträume

Der Lech ist in seinem Abfluss täglichen und saisonalen Schwankungen unterworfen. Der Geschiebetransport setzt erst ab einer Überschreitung der kritischen Sohlschubspannung bzw. des kritischen Abflusses Q_c ein. Die Morphologische Studie der TU München (Rutschmann et al., 2012) trifft dazu im Kapitel 2.3.2 Sohlstabilität

folgende Aussage: „Die aktuell vorhandene Sohle in ihrer vorliegenden Erscheinungsform und -gestalt ist ungefähr bis zu einem Abfluss von 200 m³/s stabil.“

Daher wird die Abflussganglinie am oberen Modellrand (Pegel „Haunstetten“) auf geschieberelevante Abflüsse $Q(t) \geq Q_c$ beschränkt. Der Vorgang ist beispielhaft in Abbildung 5.1 für einen kritischen Abfluss von $Q_c = 250$ m³/s skizziert.

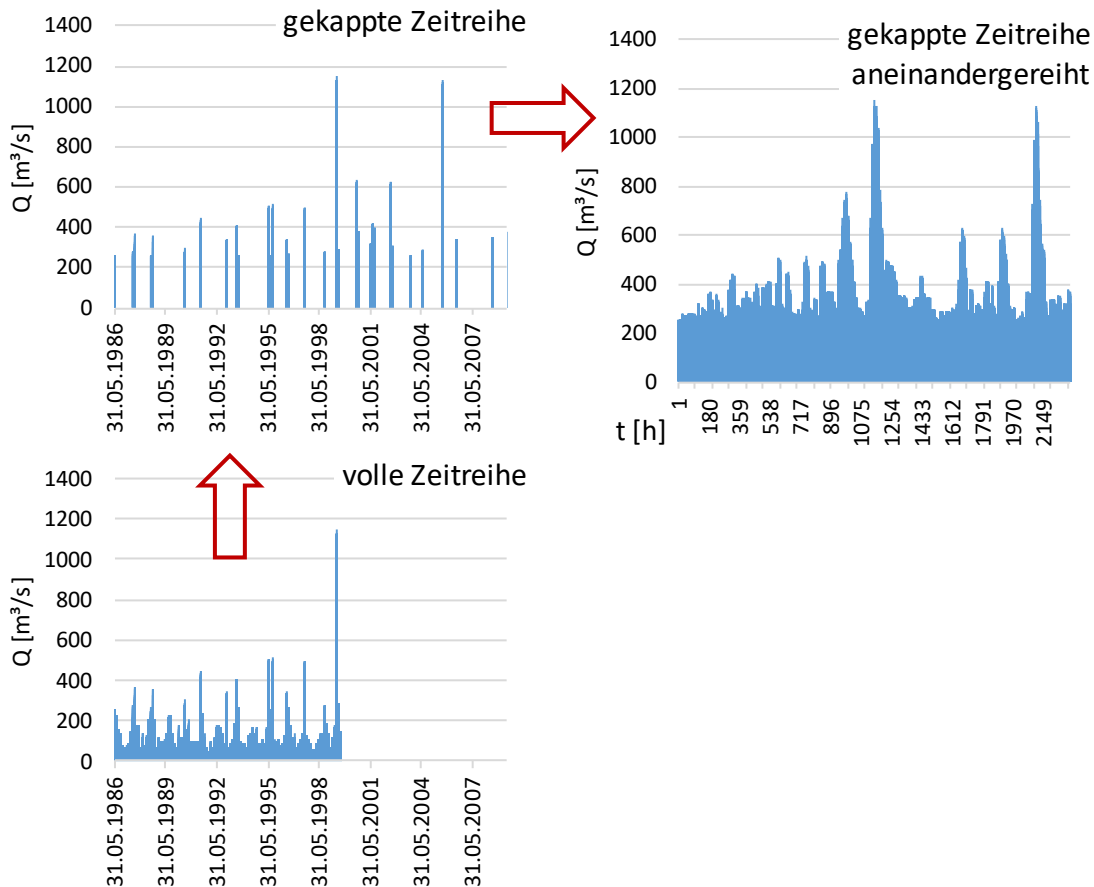


Abbildung 5.1: Kappen und Aneinanderreihen der Abflusszeitreihe $Q(t)$ am Pegel „Haunstetten“ für $Q_c = 250$ m³/s

Eine Sensitivitätsanalyse (Kapitel 5.4) muss durch eine vergleichende Auswertung der resultierenden Erosions- und Depositionsvolumina sowie der Auswirkungen auf die Korngrößensortierung klären, inwieweit sich die Anwendung eines kleineren kritischen Abflusses Q_c auswirkt. Q_c sollte einerseits groß gewählt werden, um stark zur Verringerung der Rechenzeit beizutragen, und andererseits klein genug sein, um möglichst keine Auswirkung auf die Ergebnisse der Geschiebetransportberechnung zu zeigen.

Optimierung des Berechnungsnetzes

Das vorhandene Berechnungsnetz (Kapitel 3.2) wird für die 2D-numerischen Geschiebetransport-Simulationen verkleinert und in zwei Teilgebiete aufgeteilt (siehe Kapitel 4.1). Die Verringerung der Rechenetzgröße wirkt sich u. a. in geringeren Größen der (flächhaften) Ergebnisdateien aus. Dadurch kann HYDRO_FT-2D diese Dateien im Verlauf einer numerischen Berechnung viel schneller ausschreiben und die Rechenzeit sinkt enorm.

Die Knotenabstände wirken sich direkt auf die Zeitschrittweite Δt des numerischen Lösungsverfahrens aus. Die Courant-Friedrich-Levy-Zahl muss zwingend im gesamten Berechnungsnetz stets kleiner Eins sein, um numerische Stabilität zu gewährleisten. Je kleiner aber Δt wird, desto mehr Zeitschritte sind erforderlich, um einen bestimmten Simulationszeitraum abzudecken. Daher sind kleine Knotenabstände möglichst zu vermeiden. Das Strömungsmodell HYDRO_AS-2D Version 4.2 gibt eine neue Ausgabedatei „Timestep.dat“ aus, die Information zur internen Zeitschrittweite pro Knoten enthält. Zur Knotenabstandsoptimierung wird am oberen Modellrand als Zuflussrandbedingung ein stationärer Abfluss $HQ_5 = 560 \text{ m}^3/\text{s}$ (Pegel „Haunstetten“) angesetzt und numerisch berechnet. Die Auswertung der Datei „Timestep.dat“ führt zu jenen Knoten, die die Rechenzeit maßgeblich bestimmen. Diese können anschließend z. B. durch Ausdünnung sehr dichter Knoten-Bereiche optimiert werden.

Beschleunigungsfaktoren und Anzahl an Kornklassen

Die Beschleunigungsparameter *SCF* und *SCFG* beeinflussen direkt die Lösung der Differentialgleichungen. Bei stark instationären Vorgängen kann dies allerdings zu Ungenauigkeiten und Oszillationen in den Berechnungsergebnissen führen. Ab den Versionen HYDRO_FT-2D V4.0 kann der Beschleunigungsfaktor *SCFG* optional in Abhängigkeit des Abflusses spezifiziert werden. Damit wird die Beschleunigung in kritischen Phasen mit großen Abflüssen reduziert. Beide Beschleunigungsparameter werden so groß wie möglich gewählt, wobei gleichzeitig sichergestellt werden muss, dass dies keinen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse hat.

Die Anzahl der Kornklassen n wirkt sich sowohl auf die Qualität als auch auf die Rechenzeit aus. Eine geringere Anzahl führt im Vergleich zu einer größeren Anzahl an Kornklassen immer zu kleineren Rechenzeiten. Die Qualität der Berechnung steigert sich hingegen nicht automatisch mit größer werdendem n , sondern erreicht gemäß *Umach* (2013) je nach vorherrschender Umlagerungstendenz zwischen $n = 3$ und $n = 8$ ihr Maximum. In Kapitel 4.3 werden die Gründe für die vorliegende Wahl der Kornklassen erläutert. Die Qualität der Approximation der Kornmischungen im Projektgebiet wird als vorrangig erachtet. Mit $n = 6$ wird ein guter Kompromiss zwischen Qualität und hoher Rechengeschwindigkeit erzielt.

5.2 Kalibrierung

Das Ziel der Kalibrierung ist das Finden von Modellparametern (Kapitel 2.2) und Anfangsbedingungen (Kapitel 2.3), sodass die sich ausbildenden morphologischen Umlagerungen eines Kalibrierungszeitraums möglichst gut den gemessenen entsprechen. Die Beurteilung der Kalibrierqualität eines Kalibrierungszeitraums erfolgt mittels einer vergleichende Auswertungen der resultierenden Erosions- und Depositionsvolumina sowie der mittleren Sohlhöhenentwicklung in den Sohlabschnitten (Kapitel 4.1) mit den erwarteten Soll-Umlagerungsvolumina bzw. mittleren Soll-Sohlhöhen. Letztere werden aus den erstellten Start- (Kapitel 4.1) und Soll-Bathymetrien (Kapitel 3.3) der 2D-numerischen Berechnungsnetze abgeleitet.

Für die Kalibrierung wird der Zeitraum 01.01.1986 bis 01.01.1994 festgelegt (siehe Abbildung 5.2).

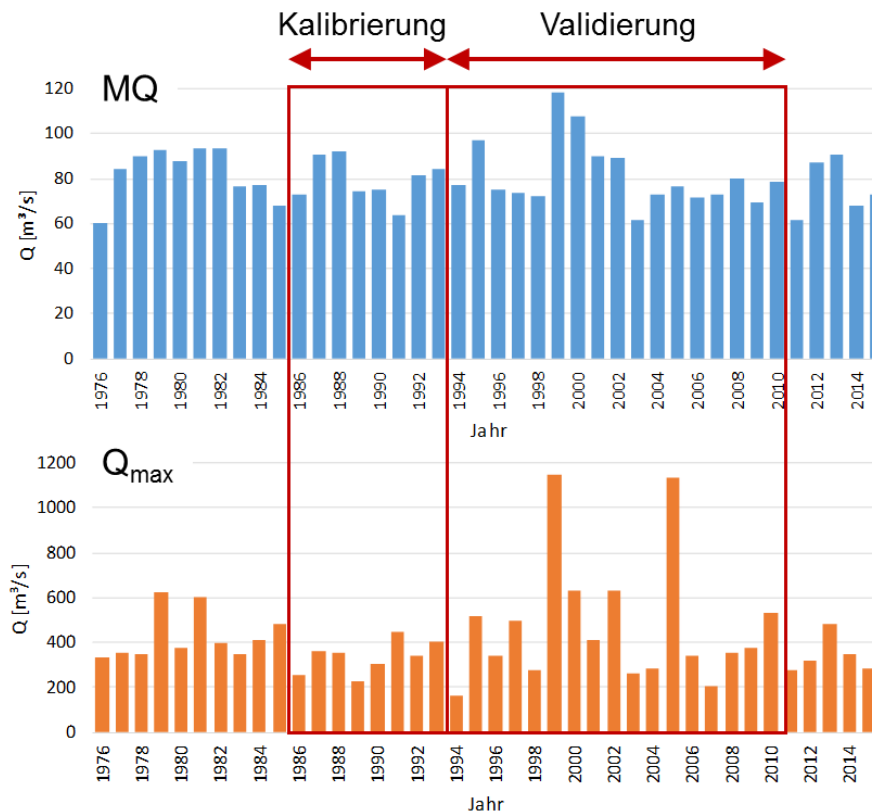


Abbildung 5.2: jährliche Abflüsse MQ und Q_{\max} am Pegel „Haunstetten“ mit eingezeichnetem Kalibrier- und Validierzeitraum.

Im Folgenden wird zwischen einer Grob- und einer Feinkalibrierung unterschieden.

Grobkalibrierung

Unter einer Grobkalibrierung wird die Anpassung der Simulationsgrößen im Gesamtmodell bei gleichzeitiger Tolerierung lokaler Abweichungen verstanden. Sie ist stets der erste Schritt eines Kalibrierungsprozesses. Als Stellgrößen der Parameteranpassung kommen vor allem k_F (zur Korrektur des Vorfaktors der Geschiebetransportformel MPM/Hunziker), θ_{cr} (dimensionslose kritische Sohlschubspannung nach Shields) sowie pal und pul (kritischer Parameter zur Steuerung der Austausch- und Unterschichtdicken) in Frage (siehe Kapitel 2.2).

Feinkalibrierung

Eine Feinkalibrierung meint die Anpassung von lokalen Simulationsgrößen bei lokalen Abweichungen. Sie sollte möglichst nur geringe Auswirkungen auf die Grobkalibrierung haben. Als Stellgrößen der Parameteranpassung eignen sich k_{st} und $k_{st,r}$ (Gesamt- und Kornrauheit nach Strickler) bzw. der Riffel-Faktor μ nach folgender Gleichung.

$$\mu = \left(\frac{k_{st}}{k_{st,r}} \right)^{3/2} \quad (5.1)$$

Diese Stellgrößen können für jedes Netzelement in HYDRO_FT-2D vorgegeben werden. Somit kann gezielt Einfluss auf den lokalen Geschiebetransport genommen werden.

Die Feinkalibrierung bedient sich der morphodynamischen Kalibrierung als Kreisprozess, wie sie in *Klar* (2016) vorgestellt wird. Zwischen zwei Kalibrierungssimulationen werden die morphologischen Ergebnisse analysiert und mit vorzugebenden Zielgrößen verglichen. Als Zielgröße kommt z. B. die Vorgabe von Soll-Umlagerungen in den Homogenabschnitten in Frage:

- Gesamt-Soll-Umlagerung (Auflandungen oder Erosion) als Feststoffvolumen in [m³] eines Sohlabschnitts V_F
- flächengewichteter Mittelwert der Soll-Sohlhöhendifferenz $\overline{\Delta z}$ in [m] eines Sohlabschnitts

Falls die Zielgrößen verfehlt werden, erfolgt eine möglichst vorteilhafte Anpassung der Modellparameter k_{st} und $k_{st,r}$ und die Zeitperiode wird erneut simuliert. Am Berechnungsstart eines jeden Kalibrierungszyklus wird die Sohle auf die ursprüngliche Bathymetrie des Berechnungsnetzes zurückgesetzt. Parameter, die keine Anpassung erfahren, werden gemäß den ursprünglichen Anfangsbedingungen vorgegeben. Dieser Kreisprozess der morphodynamischen Kalibrierung, wird so lange wiederholt, bis die Zielgrößen eingehalten werden (Abbildung 5.3). Die numerische Berechnung umfasst stets den Kalibrierungszeitraum (in Abbildung 5.3 als Zeitperiode p dargestellt).

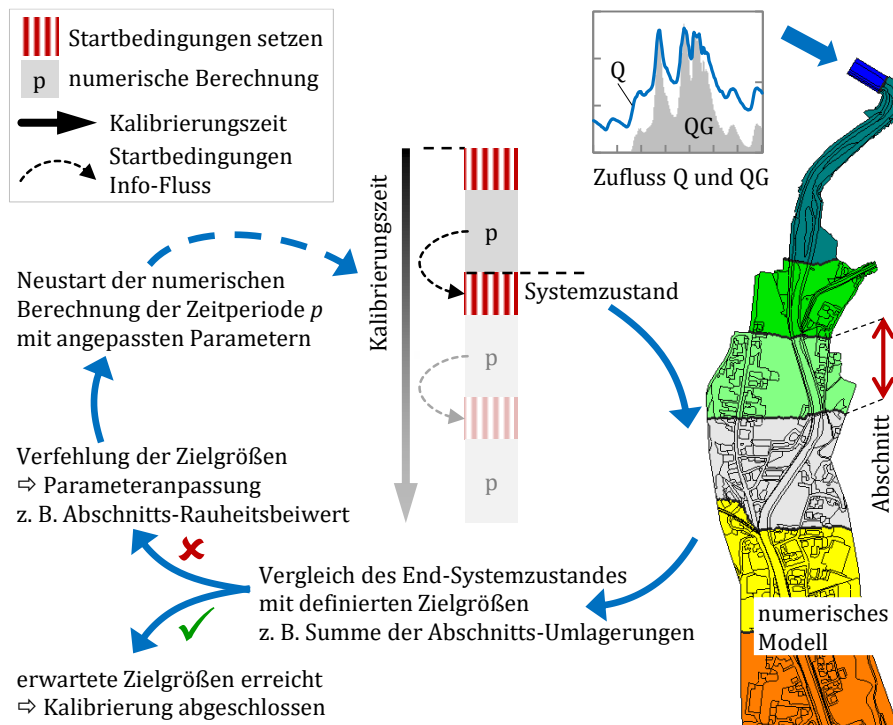


Abbildung 5.3: Konzeptskizze der morphodynamischen Kalibrierung als Kreisprozess entnommen aus Klar (2016)

Die Anpassung der Modellparameter des Konzepts der morphodynamischen Kalibrierung kann mittels verschiedener Methoden erfolgen. Für diese Untersuchung wird die umlagerungsbasierte Rauheitsanpassung aus Klar (2016), Kapitel 10.2.5 adaptiert und zur Anwendung gebracht.

Die Rauheitsbeiwerte werden hier gezielt auf Basis der sich ausbildenden Umlagerungen verändert. Für jeden Homogenabschnitt werden die Rauheitsbeiwerte für den Kalibrierungszyklus $i + 1$ auf der Grundlage der sich ergebenden Umlagerungen der vorangegangenen Kalibrierungssimulation i angepasst. Die Anpassung wird über eine Änderung des Riffel-Faktors μ erzielt. Dieser skaliert das zur Verfügung stehende Energieliniengefälle I_E und repräsentiert den unbekanntem Einfluss von Formverlusten durch Sohlformen. Riffel-Faktoren kleiner als $\mu_{min} = 0,4$ werden nicht mehr als plausibel betrachtet. Nach oben hin ist μ mit dem Zahlenwert Eins, der das vollständige Verschwinden der Formrauheit kennzeichnet, begrenzt. Es gilt also: $\mu_{min} \leq \mu \leq 1,0$.

Der neue Riffel-Faktor μ^{i+1} eines Abschnitts als Anfangsbedingung des nächsten Kalibrierungszyklus $i + 1$ wird mit Gleichung 5.2 berechnet. Die Schrittweite $\Delta\mu$ der Anpassung wird für jeden Homogenabschnitt geschätzt.

$$\begin{aligned} \mu < 1,0 \quad \text{und} \quad \text{Auflandung} &\Rightarrow \mu^{i+1} = \mu^i + \Delta\mu \leq 1,0 \\ \mu > \mu_{min} \quad \text{und} \quad \text{Erosion} &\Rightarrow \mu^{i+1} = \mu^i - \Delta\mu \geq \mu_{min} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Die Anpassung des Riffel-Faktors in HYDRO_FT-2D Modellen wird über eine Änderung des Kornrauheitsbeiwertes $k_{St,r}$ erreicht. Zu dessen Bestimmung wird die Gleichung 5.3 gelöst:

$$k_{St,r}^{i+1} = \frac{k_{St}^{i+1}}{\mu^{i+1}{}^{2/3}} \quad \text{mit} \quad k_{St}^{i+1} = k_{St}^i \quad (5.3)$$

Falls die obere oder untere Grenze für μ bereits im vorangegangenen Kalibrierungszyklus i erreicht wurde, dann bleibt μ konstant und stattdessen wird der Gesamtrauheitsbeiwert k_{St} nach *Strickler* gemäß Gleichung 5.4 adaptiert.

$$\begin{aligned} \mu = 1,0 \quad \text{und} \quad \text{Auflandung} &\Rightarrow k_{St}^{i+1} = k_{St}^i - 1 \quad \text{mit} \quad k_{St,r}^{i+1} = k_{St}^{i+1} \\ \mu = \mu_{min} \quad \text{und} \quad \text{Erosion} &\Rightarrow k_{St}^{i+1} = k_{St}^i + 1 \quad \text{mit} \quad k_{St,r}^{i+1} = \frac{k_{St}^{i+1}}{\mu_{min}{}^{2/3}} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Die Änderung der Gesamtrauheit bewirkt – wie die Änderung des Riffel-Faktors μ – eine Verstärkung oder Verringerung der Transportleistung in einem Abschnitt, verändert allerdings auch die Strömung (Wassertiefe, Strömungsgeschwindigkeit). Es ist darauf zu achten, dass physikalisch sinnvolle Bereiche der Rauheit nicht verlassen werden. Die Anpassung der Rauheitsbeiwerte wird nach jedem Kalibrierungszyklus für alle Homogenabschnitte gleichzeitig durchgeführt.

5.3 Validierung

Als Validierungszeitraum wird der direkt an den Kalibrierungszeitraum anschließende Zeitraum zwischen 01.01.1994 bis 01.01.2011 festgelegt (siehe Abbildung 5.2), der u. a. zwei Hochwasserereignisse umfasst. Sämtliche Modellparameter aus der Kalibrierung (Kapitel 5.2) werden übernommen. Der knotenweise End-Systemzustand der finalen Kalibrierungsberechnung (Sohniveau, Kornverteilung, Wasserspiegel, Geschwindigkeit, etc.) wird als Start-Systemzustand der Validierungsberechnung übertragen. Die resultierenden Erosions- und Depositionsvolumina sowie die mittlere Sohlhöhenentwicklung werden einer vergleichenden Auswertung mit den gemessenen Werten im selben Zeitraum unterzogen. Das Modell gilt als validiert, wenn die gemessenen Sohldifferenzen des Validierungszeitraums den berechneten Sohldifferenzen in ausreichend genauem Maße entsprechen.

5.4 Sensitivitätsanalyse

Unsicherheiten sind aufgrund der Datendichte und der aufwändigen aber dennoch vereinfachenden modelltechnischen Umsetzung des Geschiebetransports unvermeidbar. Mittels einer Sensitivitätsuntersuchung sollen diese Unsicherheiten quantifiziert werden und zudem eine Aussage zur erzielbaren Prognosegüte getroffen werden. Es werden folgende Parameter untersucht:

- die HYDRO_FT2D spezifischen Modellparameter der Tabelle 2.1 bzw. Tabelle 4.1 (in roter Schriftfarbe hervorgehoben)
- der kritische Abflusses Q_c zur Beschränkung auf geschieberelevante Zeiträume gemäß Kapitel 5.1

Literaturverzeichnis

- Fehr, R. (1987). Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse. *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 38/87, pp. 1104-1109.
- Hunziker, R. P. (1995). *Fraktionsweiser Geschiebetransport*. (Dissertation, VAW Mitteilung Nr. 138), Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Zürich. Abrufbar unter http://people.ee.ethz.ch/~vawweb/vaw_mitteilungen/138/138_g.pdf
- Klar, R. (2016). *Langzeitsimulation des Geschiebetransports in alpinen Tälern: Weiterentwicklung von Methoden zur Modellierung der langfristigen Sohllagenentwicklung und zur Ermittlung von Hochwassergefahren in inneralpinen Tälern*. (Dissertation, Forum Umwelttechnik und Wasserbau, Band 24), Universität Innsbruck, Innsbruck.
- Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). *Formulas for bed-load transport*. In: Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research, 1948. International Association of Hydraulic Research Delft, pp. 39-64.
- Müller, R. (1943). *Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauungen*. (Dissertation, Nr. 1267), Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Zürich. Abrufbar unter <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=diss&nr=1267>
- Nujić, M., & Hydrotec, Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH. (2015). *Benutzerhandbuch HYDRO_AS-2D Version 4.0, 2D-Strömungsmodell für die wasserwirtschaftliche Praxis* (pp. 58).
- Nujić, M., Hydrotec, Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, & Hunziker, Zarn & Partner AG. (2015). *Benutzerhandbuch HYDRO_FT-2D, Erweiterung zu HYDRO_AS-2D zur Simulation des Stofftransports* (pp. 44).
- Rutschmann, P., Grünzner, M., & Liepert, T. (2012). „Licca Liber“ – *Der freie Lech, Untersuchung der flussbaulichen Möglichkeiten zur Sanierung des Lechs, Morphologische Grundlagenstudie*. Studie. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Technische Universität München. München.
- Strickler, A. (1923). *Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen*. Bern: Eidg. Amt für Wasserwirtschaft Bern.
- Umach, L. (2013). *Bedeutung der Approximation von Kornverteilungskurven bei der zweidimensionalen numerischen Simulation von Geschiebetransportprozessen*. (Dissertation, Forum Umwelttechnik und Wasserbau, Band 18), Universität Innsbruck, Innsbruck.