Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna

Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt
Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau

Vorstand: Univ. Prof. DI Dr. H.P. Nachtnebel

VERGLEICHENDE NUMERISCHE MODELLIERUNG EINER GESCHIEBEENTNAHME MITTELS HYDRO_GS-2D

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

eingereicht von:

STEINER, FRANZ

Betreuer: o. Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr. H.P. Nachtnebel

Mitbetreuer: Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. C.J. Jugovic

Matrikelnummer 0140491

02.09.2008

„… denn das Leben ist ein Fluss der fließen muss …“

Thomas D.

Kurzfassung

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist der Vergleich des numerischen Geschiebetransportmodells HYDRO_GS-2D mit einem physikalischen Modellversuch. Aufgabe beider Modelle war die Simulation einer gezielten Geschiebeentnahme am Fluss Steyr zur Verbesserung des Hochwasserschutzes der Stadt Steyr. Die Entnahme erfolgt mittels Streichwehr und integrierter Geschiebegasse in einen gesonderten Nebenarm.

Das Untersuchungsgebiet, das durch das Modell abgedeckt wurde, erstreckt sich über eine Flusslänge von 1.200 m und umfasst eine Breite von ca. 500 m. Dieses Gebiet wurde mit Hilfe eines Berechnungsnetzes aus unregelmäßigen Rechtecks- und Dreieckselementen abgebildet.

Die Ergebnisse zeigten, dass HYDRO_GS-2D die Funktionalität der Geschiebefalle nachbilden kann. Es kommt jedoch zu Unterschieden bei der Verteilung der Ablagerungen. Vor allem der Einlaufbereich bestehend aus Streichwehr und Geschiebegasse bewirkte stark turbulente Fließzustände, womit die Grenzen des numerischen Modells ausgelotet wurden.

Unter Berücksichtigung der mathematischen Grundlagen kann mittels HYDRO_GS-2D der Geschiebetrieb und dessen Sedimentationsverhalten in einer ersten Abschätzung prognostiziert werden.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau.

Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. H.P. Nachtnebel und Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Cedomil Jugovic danke ich für die ausgezeichnete Betreuung, für die Durchsicht der Arbeit und die stets freundlichen Hilfestellungen.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Georg Schuster für unzählige Stunden an Diskussion und die hervorragende Unterstützung bei der Durchführung der Modellierungen. Ebenso gilt mein Dank allen Mitarbeitern der Werkstätten des Wasserbauinstituts.

Besonderer Dank gilt meinem Freund und Studienkollegen Robert Koloseus, mit dem ich viele Kilogramm Sand im Labor bewegt habe und der immer eine kritische und anregende Stütze während der Diplomarbeit und meines Studiums darstellte.

Meinen Eltern möchte ich für das Verständnis und die Unterstützung während meines Studiums danken.

Vor allem möchte ich meiner Ehefrau Lucie danken, für die Geduld und Liebe, die sie mir in all den Jahren immer wieder entgegen gebracht hat und die mich nie an meinem Ziel hat zweifeln lassen.

Franz Steiner, Wien im September 2008

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis VI

Tabellenverzeichnis IX

Symbolverzeichnis X

1. Zielsetzung 1

2. Methodik 2

2.1 Entstehung von Geschiebe 2

2.2 Geschiebecharakterisierung 3

2.3 Bewegungsbeginn 6

2.3.1 Kritische Strömungsgeschwindigkeit 7

2.3.2 Kritische Schleppspannung 7

2.3.3 Hebekraft 10

2.4 Deckschichtbildung 11

2.5 Transportkörper 12

2.5.1 Riffel 13

2.5.2 Dünen 13

2.5.3 Antidünen 13

2.6 Selektiver Transport und Abrieb 14

2.7 Geschiebetransportformel nach MEYER-PETER & MÜLLER (1949) 14

2.8 Merkmale von numerischen Modellen 16

2.9 Zweidimensionale Flachwassergleichungen 18

2.10 Geschiebetransportsimulation 21

2.10.1 Bodenevolutionsgleichung 21

2.10.2 Geschiebetransport 22

2.11 Numerische Lösung 23

2.12 Randbedingungen 25

3. Datenbasis 26

3.1 Projektsgebiet 26

3.2 Geometrie 28

3.3 Hydrologie 29

3.4 Geschiebedaten 29

4. Anwendung 31

4.1 Physikalischer Modellversuch 31

4.1.1 Aufbau und Durchführung 31

4.1.2 Versuchsergebnisse 33

4.2 Numerisches Modell 33

4.2.1 Diskretisierung des Laborgerinnes 33

4.2.2 Sohlfixierung 35

4.2.3 Kalibrierung und Validierung 36

4.2.4 Einbau der Geschiebefalle 39

4.2.5 Ausformung des Modelleinlaufbereichs 41

5. Ergebnisse ***44***

5.1 Einführung 44

5.2 Versuch HQ1 47

5.2.1 Lagemäßige Verteilung der Ablagerungen 48

5.2.2 Höhenmäßige Veränderungen in Querprofilen 52

5.2.3 Wirkungsgrad der Geschiebefalle 54

5.3 Versuch HQ10 55

5.3.1 Lagemäßige Verteilung der Ablagerungen 55

5.3.2 Höhenmäßige Veränderungen in Querprofilen 57

5.3.3 Wirkungsgrad der Geschiebefalle 59

5.4 Versuch HQ30 60

5.4.1 Lagemäßige Verteilung der Ablagerungen 61

5.4.2 Höhenmäßige Veränderungen in Querprofilen 63

5.4.3 Wirkungsgrad der Geschiebefalle 64

5.5 Versuch HQ100 65

5.5.1 Lagemäßige Verteilung der Ablagerungen 66

5.5.2 Höhenmäßige Veränderungen in Querprofilen 68

5.5.3 Wirkungsgrad der Geschiebefalle 69

5.6 Ergebnis 70

6. Diskussion und Zusammenfassung ***73***

7. Literaturverzeichnis ***80***

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Feststoffe im System der Flussmorphologie (MANGELSDORF & SCHEURMANN, 1980) 2

Abb. 2: Feststoffeintrag durch Wildbäche (MANGELSDORF & SCHEURMANN, 1980) 3

Abb. 3: Bewegungsarten der Sedimentpartikel (GLAZIK, 2000) 4

Abb. 4: Darstellung des Grenzkorndurchmessers d_{gr} nach KRESSER (1964) 5

Abb. 5: Hiding-Effekt bei der Ausbildung der Gewässersohle (DVWK, 1992) 6

Abb. 6: Bewegungsbeginn nach HJULSTRÖM (für Quarzmaterial) (DVWK Regeln, 1992) 7

Abb. 7: Ableitung der Schleppspannung (VISCHER und HUBER, 2002) 8

Abb. 8: Bewegungsbeginn nach SHIELDS (1936) mit Angabe des Bewegungsrisikos R nach ZANKE (1990), (DVWK Regeln, 1992) 9

Abb. 9: Ablösung eines Partikels von der Gewässersohle (KNIGHTON, 1998) 10

Abb. 10: Vertikale Schichtung eines geschiebeführenden Gewässers (MALCHAREK, 2003; zit. bei SENDZIK, 2003) 11

Abb. 11: (a) Geschiebefunktion, (b) Zusammenhang zwischen Abfluss- und Geschiebeganglinie (VISCHER & HUBER, 2002). 12

Abb. 12: Bettformen und Geschiebetransport bzw. –umlagerung in einem Transportkörper (GLAZIK, 2000) 13

Abb. 13: Vertikale Einteilung des Wasserkörpers nach Geschiebe- und Schwebstofftransport anhand einer 1D-Formulierung (DVWK, 2003) 21

Abb. 14: Darstellung des Kontrollvolumens für den Knoten ij (NUJIC, 2003) 24

Abb. 15: Bilddokumentation vom Hochwasser am 12. August 2002 in Steyr (Quelle: www.e-steyr.com) 26

Abb. 16: Darstellung des Projektgebiets in der Himmlitzer Au (Orange Markierung). (Luftbild: Geoland.at, 5.Juli 2008) 27

Abb. 17: Gegenüberstellung von Natursituation, physikalischen und numerischen Modellversuch 28

Abb. 18: Aufnahme des Einlaufbereiches nach einem HQ1 Versuch mit Basaltsand 30

Abb. 19: Versuchsanordnung des physikalischen Modells. Links im Naturzustand für die Kalibrierung. Rechts im Detail der Einlaufbereich des eingebauten Nebenarmes 31

Abb. 20: Elemente des Einlaufbereiches in den Nebenarm in Naturmaßen 32

Abb. 21: Flussschlauch ohne Nebengerinne mit einer Rechtecksvermaschung. Oben der gesamte Flussschlauch. Unten Detailausschnitte aus dem Flussnetz. 34

Abb. 22: Vorlandnetz mit einer Dreiecksvermaschung ohne Flussschlauch. Farbliche Abstufung aufgrund der Geländehöhe 34

Abb. 23: Darstellung der Sohlhöhen in einem Längenschnitt nach einem HQ30 Kalibrierungslauf 36

Abb. 24: Darstellung der physikalischen und numerischen Kalibrierungsläufe 39

Abb. 25: Entstehung der Rechtecksvermaschung des Nebenarmes aus Querprofilen 39

Abb. 26: Detail des Einlaufes in den Nebenarm mit Streichwehr und Geschiebegasse. Farbliche Abstufung entsprechend der Geländehöhe. 40

Abb. 27: Einlaufbereich des physikalischen Modells. Links: Draufsicht Einlaufbecken und Geschiebezugabe. Rechts: Ansicht der Geschiebezugabe mittels Rüttelplatte. 41

Abb. 28: Darstellung des Einlaufbereichs in der ersten Variante mit tiefer Sohle (Pfeil stellt Fließrichtung dar) 41

Abb. 29: Darstellung des Einlaufbereichs mit erhöhter Sohle (Pfeil stellt Fließrichtung dar) 42

Abb. 30: Darstellung des Einlaufbereichs in der ersten Variante mit tiefer Sohle (Pfeil stellt Fließrichtung dar) 42

Abb. 31: Darstellung der Strömungsvektoren im Einlaufbereich mit erhöhter Sohle (Pfeil stellt Fließrichtung dar) 43

Abb. 32: Darstellungen des zeitlichen Ablaufes der Versuchsdurchführung mittels Ganglinien der Geschiebe- und Durchflussführung 47

Abb. 33: Farbskala der Geschiebeablagerungshöhe in Metern. 48

Abb. 34: Darstellungsserie der Ablagerungen im Lageplan für den HQ1 Versuch 48

Abb. 35: Darstellung der ausgewerteten Querprofile im numerischen Modell bei HQ1 52

Abb. 36: Darstellung der ausgewerteten Querprofile im physikalischen Modell bei HQ1 52

Abb. 37: Legende der Querprofile(links) und Beschriftung der Abszisse und Ordinate(rechts) . 53

Abb. 38: Darstellung der Querprofile 19 bis 16 von HQ1 53

Abb. 39: Darstellung der Querprofile 15 bis 12 von HQ1 54

Abb. 40: Darstellungen des zeitlichen Ablaufes der Versuchsdurchführung mittels Ganglinien der Geschiebe- und Durchflussführung 55

Abb. 41: Farbskala der Geschiebeablagerungshöhe in Metern 56

Abb. 42: Darstellungsserie der Ablagerungen im Lageplan für den HQ10 Versuch 56

Abb. 43: Darstellung der ausgewerteten Querprofile im numerischen Modell bei HQ10 58

Abb. 44: Darstellung der ausgewerteten Querprofile im physikalischen Modell bei HQ10 58

Abb. 45: Legende der Querprofile(links) und Beschriftung der Abszisse und Ordinate(rechts) . 59

Abb. 46: Darstellung der Querprofile 18, 16, 14 und 12 bei HQ10 59

Abb. 47: Darstellungen des zeitlichen Ablaufes der Versuchsdurchführung mittels Ganglinien der Geschiebe- und Durchflussführung 60

Abb. 48: Farbskala der Geschiebeablagerungshöhe in Metern 61

Abb. 49: Darstellungsserie der Ablagerungen im Lageplan für den HQ30 Versuch 61

Abb. 50: Darstellung der ausgewerteten Querprofile im numerischen Modell bei HQ30 63

Abb. 51: Darstellung der ausgewerteten Querprofile im physikalischen Modell bei HQ30 63

Abb. 52: Legende der Querprofile(links) und Beschriftung der Abszisse und Ordinate(rechts) . 64

Abb. 53: Darstellung der Querprofile 19, 18, 15 und 13 bei HQ30 64

Abb. 54: Darstellungen des zeitlichen Ablaufes der Versuchsdurchführung, anhand Geschiebeganglinie. 65

Abb. 55: Farbskala der Geschiebeablagerungshöhe in Metern 66

Abb. 56: Darstellungsserie der Ablagerungen im Lageplan für den HQ100 Versuch 66

Abb. 57: Darstellung der ausgewerteten Querprofile im numerischen Modell bei HQ100 68

Abb. 58: Darstellung der ausgewerteten Querprofile im physikalischen Modell bei HQ100 68

Abb. 59: Legende der Querprofile(links) und Beschriftung der Abszisse und Ordinate(rechts) . 69

Abb. 60: Darstellung der Querprofile 19, 18, 15 und 13 bei HQ10 69

Abb. 61: Maximal erreichtes Profil nach Ende der Versuchsdurchführung 70

Abb. 62: Streudiagramm der maximalen Erstreckung der Geschiebeablagerung im Nebenarm des physikalischen und numerischen Modells 71

Abb. 63: Darstellung der Netzelemente im Einlaufbereich. Links mit dem verfeinerten Netz. Rechts vor der Netzänderung. 74

Abb. 64: Darstellung des Strömungsbildes (Flow Trace) des HQ1 Versuches mit rot markierten Bereichen von Kehrströmungen. 75

Abb. 65: Links: Darstellung des Strömungsbildes (Flow Trace) im Einlaufbereich. Rechts: Selber Bereich mit Geschwindigkeitsvektoren und der Strömungsgeschwindigkeit in einer farblichen Zonierung 75

Abb. 66: Froude-Zahlen der einzelnen Versuche zu Beginn und Ende der Versuchsdauer 76

Abb. 67: Sohlschubspannungen (kN/m²) zu Beginn (links) und Ende (rechts) des HQ30 Versuches 77

Abb. 68: Geschiebeablagerung (links) und Sohlschubspannung τ dargestellt ab τ_{Gr} mit 0,154 kN/m² (rechts) für den HQ30 Versuch mit Geschwindigkeitsvektoren 77

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Grenze zwischen Geschiebe und Schwebstoff nach VISCHER (1981). 4

Tab. 2: Untersuchte Hochwasserjährlichkeiten 29

Tab. 3: Vergleich der Wirksamkeiten der optimalen Variante des physikalischen Modells (KOLOSEUS, 2008) 33

Tab. 4: Qualitätskriterien des 2d-Berechnungsnetzes gemäß HYDRO_AS-2D Kriterien 35

Tab. 5: Maßstab und Skalierfaktoren von Natur- auf Modellgrößen 35

Tab. 6: Übersicht Kalibrierungs- und Validierungsversuche 37

Tab. 7: Übersicht über Ergebnisse der stationären Kalibrierung 38

Tab. 8: Mittelwert und Standardabweichung der Höhendifferenzen an allen vier Pegeln im Modell (in Meter) 38

Tab. 9: Übersicht über die zugegebenen Geschiebemengen 44

Tab. 10: Verwendete Parameter für die numerischen Berechnungen 45

Tab. 11: Gegenüberstellung der Wirkungsgrade von physikalischen und numerischen Modellversuch 72

Symbolverzeichnis

(einige singulär verwendete Symbole sind im Text erläutert)

d		(m)	Korndurchmesser (ident mit d_K)
d_{gr}		(m)	Grenzkorndurchmesser
d_m		(m)	mittlerer Korndurchmesser
d_{mDS}		(m)	mittlerer Korndurchmesser der Deckschicht
d_{90US}		(m)	Korndurchmesser der Unterschicht, für den gilt, dass 90% kleiner sind als dieser Durchmesser
D*		(-)	Sedimentologischer Durchmesser
g	= 9,81 m/s²	(m/s²)	Erdbeschleunigung
g''_s		(kg/(s*m))	Geschiebetrieb
H		(m.ü.A.)	Absoluthöhe des Wasserspiegels
h		(m)	Abflusstiefe
τ_R		(N/m²)	Schubspannung (ident mit τ)
R_h		(m)	Hydraulischer Radius (ident mit R_s)
J		(-)	Gefälle
J_R		(-)	Energieliniengefälle
J_S		(-)	Sohlgefälle
k_s		($m^{1/3}/s$)	Rauigkeitskoeffizient nach Strickler
k_r		($m^{1/3}/s$)	Kornrauigkeit nach MÜLLER
Fr		(-)	Froude-Zahl
Fr*		(-)	Froude-Zahl des Korns
Re*		(-)	Reynoldszahl des Korns
v, u		(m/s)	Strömungsgeschwindigkeit
v_c		(m/s)	kritische Strömungsgeschwindigkeit

v_m	(m/s)	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
u*	(m/s)	Sohlschubspannungsgeschwindigkeit
λ	(-)	Widerstandsbeiwert
ν	(m²/s)	kinematische Viskosität (ident mit ν_0)
ρ'	(-)	relative Feststoffdichte
ρ_s	(kg/m³)	Feststoffdichte
ρ_w	(kg/m³)	Dichte des Wassers (ident mit ρ)
θ	(-)	kritische Schubspannung
γ	(kN/m³)	Wichte (spezifisches Gewicht) von Wasser
γ_s	(kN/m³)	Feststoff Wichte
z	(m)	Bezugsniveau

1. Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit besteht im Vergleich einer numerischen Simulation mit einem physikalischen Modellversuch. Diese Ergebnisse sollen einen Beitrag zu effizienteren Analyse von Geschiebeproblemen und zum verbesserten Geschiebemanagemant liefern.

Im besonderen soll die Fragestellung untersucht werden, ob die Wirksamkeit der Geschiebefalle auch durch ein numerisches Modell untersucht werden kann und mit welchen Schwierigkeiten dabei gerechnet werden muss.

Der physikalische Modellversuch wurde im wasserbaulichen Labor der Universität für Bodenkultur durchgeführt und wird ausführlich von KOLOSEUS (2008) beschrieben.

Anhand folgender Indikatoren wird der Vergleich durchgeführt:

- Lagemäßige Verteilung der Ablagerungen
- Höhenmäßige Veränderungen in Querprofilen
- Wirkungsgrad der Geschiebefalle

Teil dieser Arbeit ist die Erstellung des numerischen Modells, sowie dessen Kalibrierung und Verifikation, die Simulation von Abflüssen mit der Software Hydro_GS-2D und deren Vergleich mit Ergebnissen aus dem physikalischen Modellversuch.

2. Methodik

In den nächsten Unterkapiteln werden die Grundlagen des Geschiebetransportes sowie die kennzeichnenden Eigenschaften des Geschiebes diskutiert.

2.1 Entstehung von Geschiebe

In Gerinnen mit einer beweglichen Sohle kommt es zum Transport von Feststoffen (GLAZIK, 2000). Die Grundlagen für den Eintrag bzw. die Entstehung dieser Feststoffe werden in dem weiten Forschungsgebiet der Geomorphologie mit dem Spezialbereich der Flussmorphologie beschrieben. Im Folgenden wird kurz auf die Entstehung von Feststoffen im alpinen Raum eingegangen.

Im Wesentlichen kann man die Gestalt der Erdoberfläche auf endogene und exogene Prozesse zurückführen. Wobei erstere Niveauunterschiede hervorgerufen, wird versucht diese durch exogene Vorgänge wieder auszugleichen (BECHTELER in DVWK, 2003)

Die enge Verknüpfung dieser Prozesse mit Feststoffen wird in Abb. 1 dargestellt.

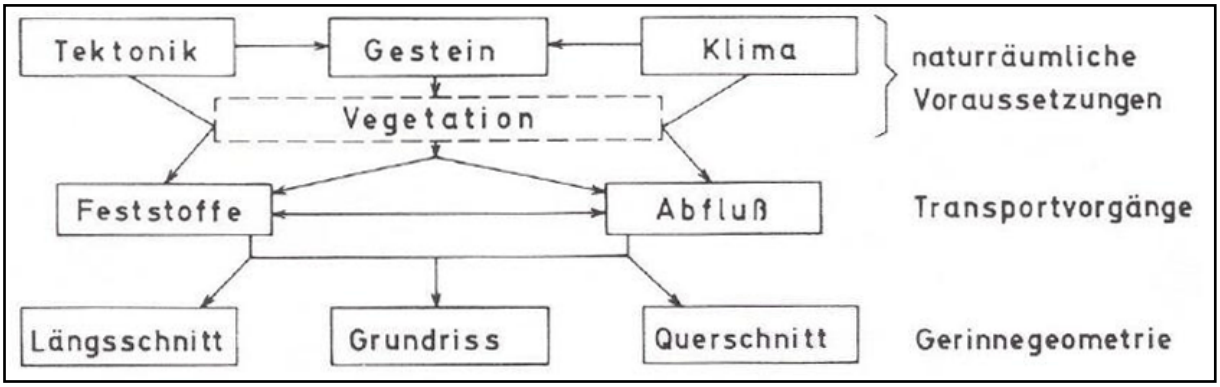


Abb. 1: Feststoffe im System der Flussmorphologie (MANGELSDORF & SCHEURMANN, 1980)

Durch Verwitterung und Lockerung der Gesteine kommt es letztendlich zu einem Abtrag der Schuttmassen. Wasser ist in diesem Zusammenhang sowohl Lösungs- als auch Transportmedium (PATT et. al., 1998). In Abb. 2 sind verschiedene Formen des Massenabtrages durch Wildbäche dargestellt.

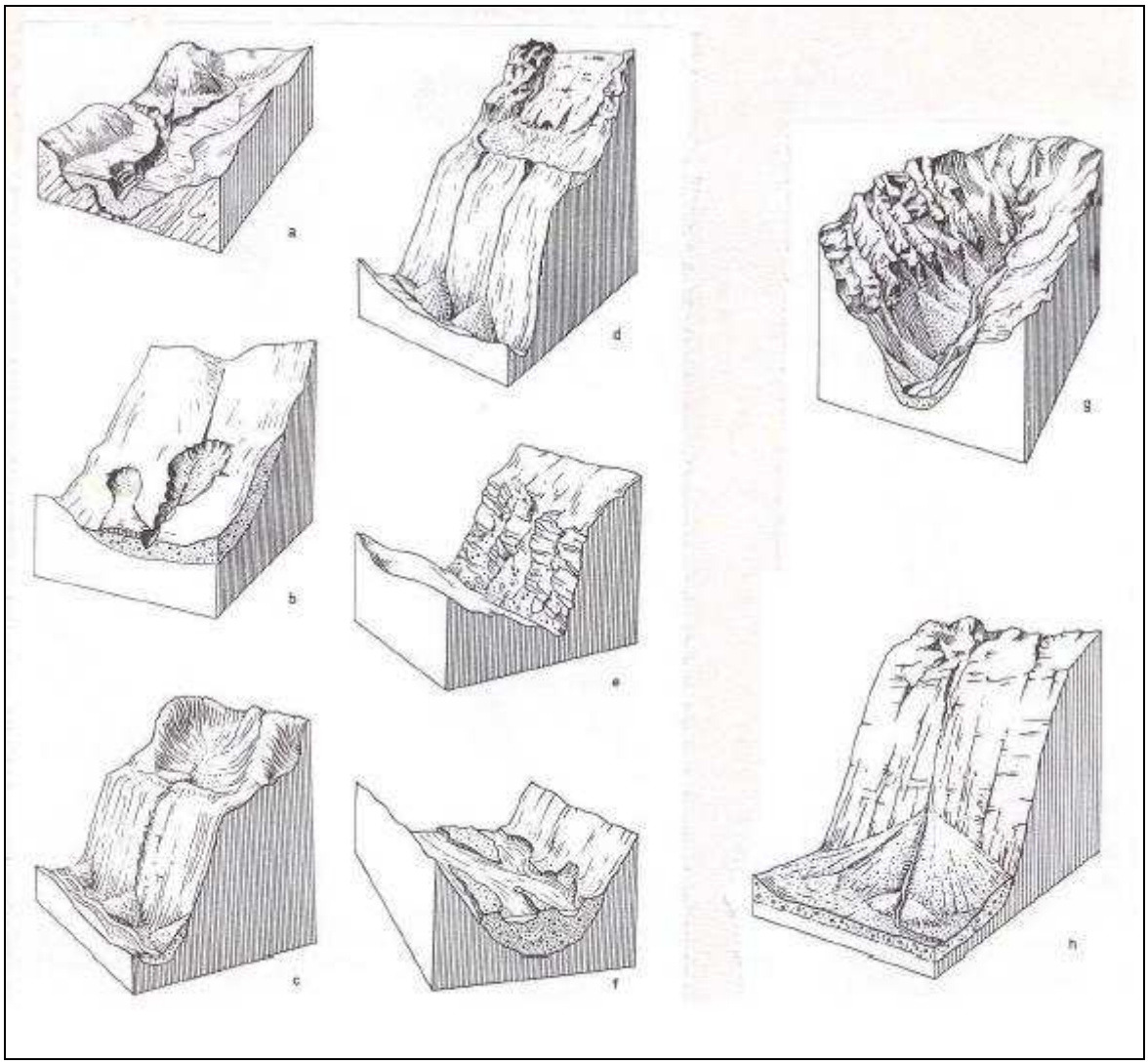


Abb. 2: Feststoffeintrag durch Wildbäche (MANGELSDORF & SCHEURMANN, 1980)

Diese allochtonen Feststoffe werden in weiterer Folge in Flüsse durch Erosion weitertransportiert. Material aus Seiten- oder Tiefenerosion der Gewässer wird als autochthones Geschiebe bezeichnet. Zusätzlich zu diesen kommt Material aus dem Einzugsgebiet das durch Verwitterung und Oberflächenerosion durch Oberflächenabfluss oder äolisch eingetragen wird (NACHTNEBEL, 2002).

2.2 Geschiebecharakterisierung

Geomorphologisch sind nach ZEPP (2002) folgende Aspekte für den Transport von Feststoffen in Fließgewässer zu nennen:

- Die Erosionsfunktion aufgrund der mechanischen Wirkung des fließenden Wassers.

- Die Transportfunktion die Fließgewässer für Denundations- und Erosionsmaterial aus dem Einzugsgebiet darstellen.
- Die Korrasionsfunktion durch den Transport des mitgeführten Materials.
- Die Sedimentations- oder Akkumulationsfunktion bezeichnet das zeitweise oder endgültig abgelagerte Material bei nachlassender Transportkapazität.

In der Transportfunktion können verschiedene Transportarten aufgrund der Herkunft des Materials und der Art der Bewegung unterschieden werden (ZANKE, 1982). Das transportierte Sediment kann in Geschiebe (bedload) und Schwebstoffe (suspended load) unterteilt werden. Nach der ÖNORM B2400 (1986) wird als Feststoff die Gesamtheit von Geschiebe, Schwebstoffen und Schwimmstoffen definiert. Geschiebe wird als vom fließenden Wasser auf oder nahe der Gewässersohle gleitend, rollend oder springend fortbewegte Gesteinsteile bezeichnet.

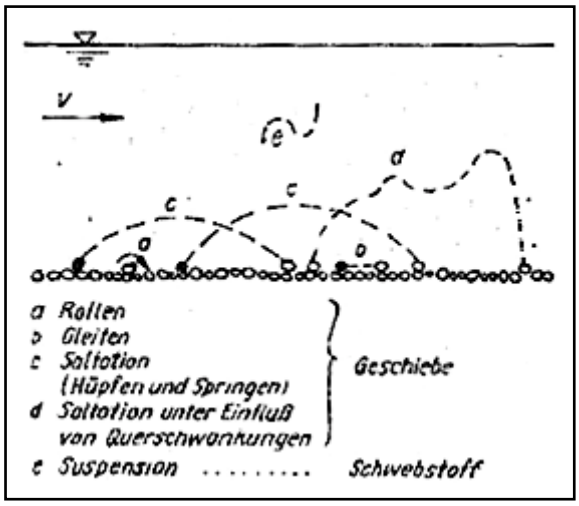


Abb. 3: Bewegungsarten der Sedimentpartikel (GLAZIK, 2000)

Ob Feststoffe als Geschiebe oder Schwebstoff transportiert werden ist von den Abflussverhältnissen in Fließgewässern abhängig. Eine eindeutige Trennung nach Gewicht oder Größe ist somit nicht möglich. VISCHER (1981) definierte die Grenze in Abhängigkeit eines bestimmten Grenzkorndurchmessers d_{gr} und einer Strömungsgeschwindigkeit v.

Geschwindigkeit	m/s	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Grenzkorn	mm	0,1	0,3	0,6	1,1	1,8	2,5	3,5	5,4

Tab. 1: Grenze zwischen Geschiebe und Schwebstoff nach VISCHER (1981).

KRESSER (1964) führte an mehreren österreichischen Flüssen Messungen durch und stellte dabei den Zusammenhang her, dass die mittlere Strömungsgeschwindigkeit v_m und der Grenzkorndurchmesser d_{gr} durch ein konstante Froudezahl Fr beschreibbar sind. Somit stellte er fest, dass der einwirkende Impuls im Verhältnis zum Feststoffgewicht festlegt, ob ein Teilchen in Schwebe bleibt oder zu Boden sinkt.

$$Fr^2 = \frac{{v_m}^2}{g \cdot d_{gr}} = 360 \qquad (2.1)$$

Durch Umformen kann die Formel nach dem Grenzkorndurchmesser d_{gr} aufgelöst werden.

$$d_{gr} = \frac{{v_m}^2}{g \cdot 360} \qquad (2.2)$$

Durch diesen Zusammenhang kann der Grenzkorndurchmesser d_{gr} wie in Abb. 4 dargestellt werden.

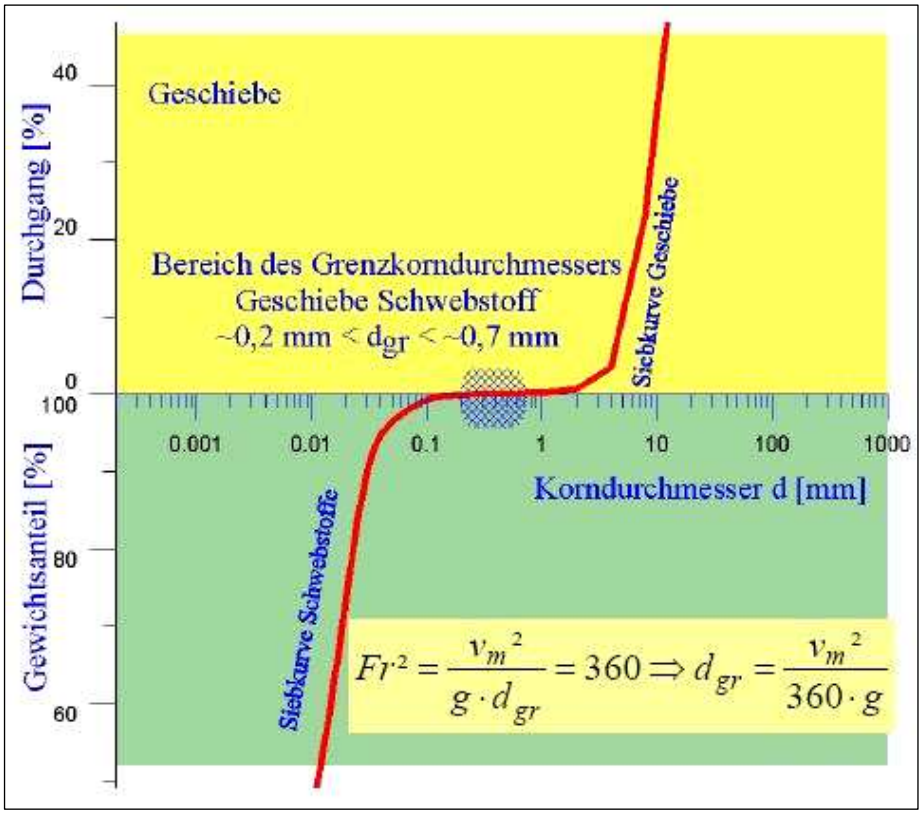


Abb. 4: Darstellung des Grenzkorndurchmessers d_{gr} nach KRESSER (1964)

Die Trennung der Feststoffe in Geschiebe und Schwebstoffe ist vor allem für unterschiedliche Berechnungen notwendig. In der Natur handelt es sich jedoch nicht um zwei

Erscheinungsformen, da der Übergang fließend ist und fast immer beide Prozesse gleichzeitig auftreten (MANGELSDORF & SCHEURMANN, 1980).

Durch die ÖNORM B2400 und die DVWK-Regeln (1986) werden weitere Definitionen für den Transport von Geschiebe getroffen:

- Geschiebefluss: Quotient aus der durch einen Durchflussquerschnitt beförderten Geschiebemasse im trockenen Zustand gewogen und der Dauer der Geschiebebewegung.
- Geschiebetrieb: Quotient aus Geschiebefluss und der Breite jenes Teiles des Durchflussquerschnitts in dem Geschiebebewegung stattfindet.
- Geschiebefracht: über einen definierten Zeitabschnitt summierter Geschiebefluss.
- Geschiebeabtrag: Quotient aus Geschiebefracht und der Einzugsgebietesfläche.
- Geschiebespende: Quotient aus Geschiebefluss und der Einzugsgebietsfläche.

2.3 Bewegungsbeginn

Für das Einsetzen der Bewegung können mehrere Parameter genannt werden, wie z.B. Geschwindigkeitsverteilung, Korngröße, Kornform und Strömungsexposition. So sind gröbere Körner der Strömung stärker ausgesetzt, widerstehen andererseits aber größeren Strömungskräften. Kleinere Körner werden leichter erodiert, sind aber durch größere Körner geschützt („Hiding Effekt“, RIBBERNIK, 1987).

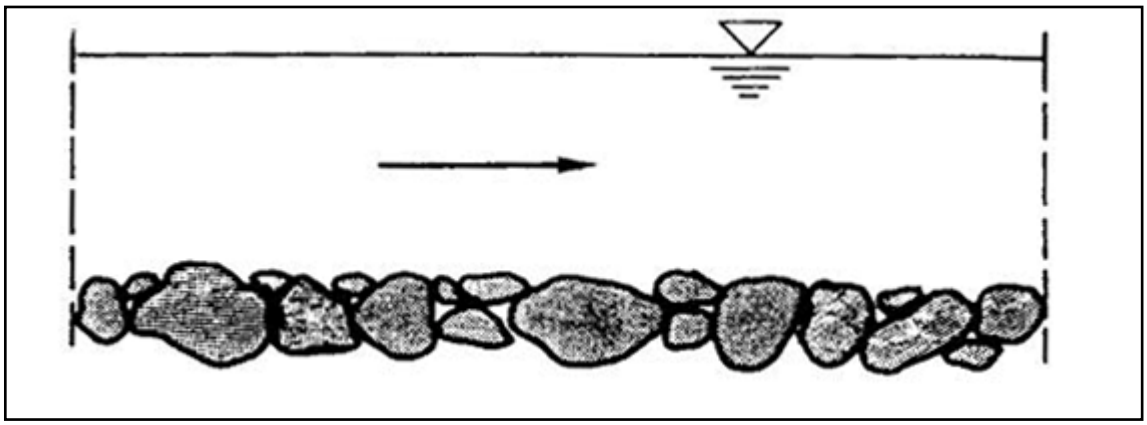


Abb. 5: Hiding-Effekt bei der Ausbildung der Gewässersohle (DVWK, 1992)

Aufgrund der Ergebnisse von HABERSACK (1997) findet in einem Gerinne mit gleichförmigem Sediment Geschiebetrieb erst ab einem kritischen Strömungszustand statt. Folgende Ursachen werden für den Bewegungsbeginn angeführt:

a) Kritische Strömungsgeschwindigkeit v_c

b) Kritische Schleppspannung τ_{crit}

c) Hebekraft

2.3.1 Kritische Strömungsgeschwindigkeit

Der Bewegungsbeginn von Quarzsand in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit v_m und dem Korndurchmesser d wurde von HJULSTRÖM (1935) dargestellt.

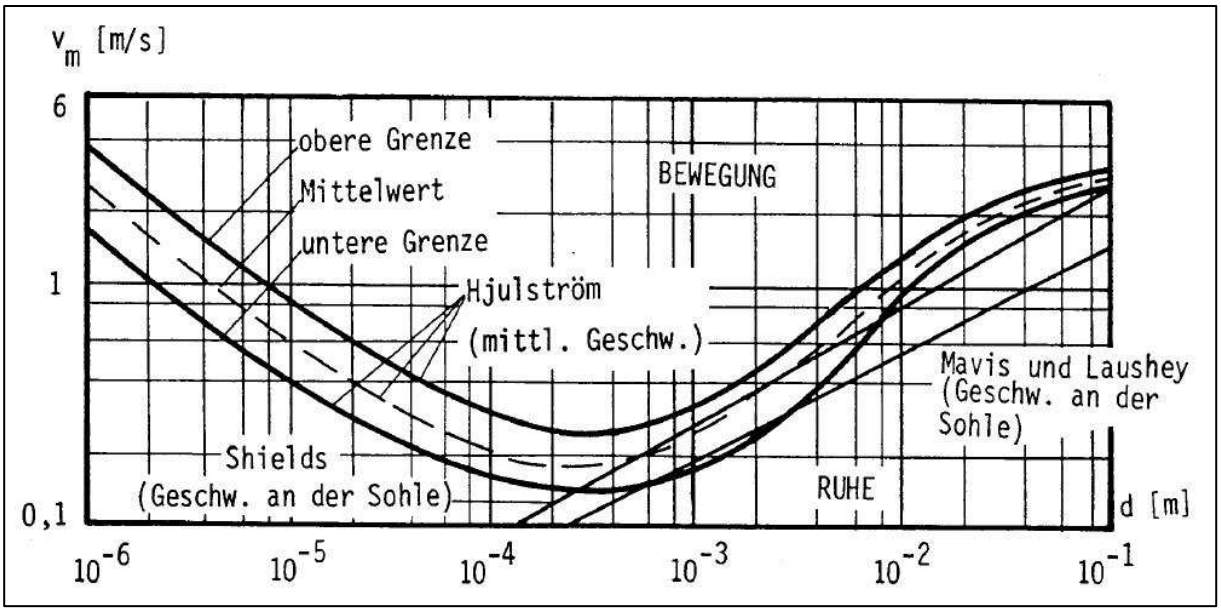


Abb. 6: Bewegungsbeginn nach HJULSTRÖM (für Quarzmaterial) (DVWK Regeln, 1992)

Diese empirische Beziehung findet häufige praktische Anwendung, jedoch sollte das Diagramm erst ab einer Korngröße von d = 0,1 mm verwendet werden, da der bindige Bereich zu große Unsicherheiten gibt.

2.3.2 Kritische Schleppspannung

Die Schleppspannung, als die auf ein Gewässerbett wirkende Reibungskraft je Flächeneinheit, kann folgendermaßen angegeben werden:

$$\tau_R = \rho_w \, g \, R_h \, J_S \qquad (N/m^2) \qquad (2.3)$$

wobei τ_R die Schleppspannung, ρ_w die Dichte des Wassers, g die Erdbeschleunigung, R_h der hydraulische Radius und J_S das Sohlgefälle ist.

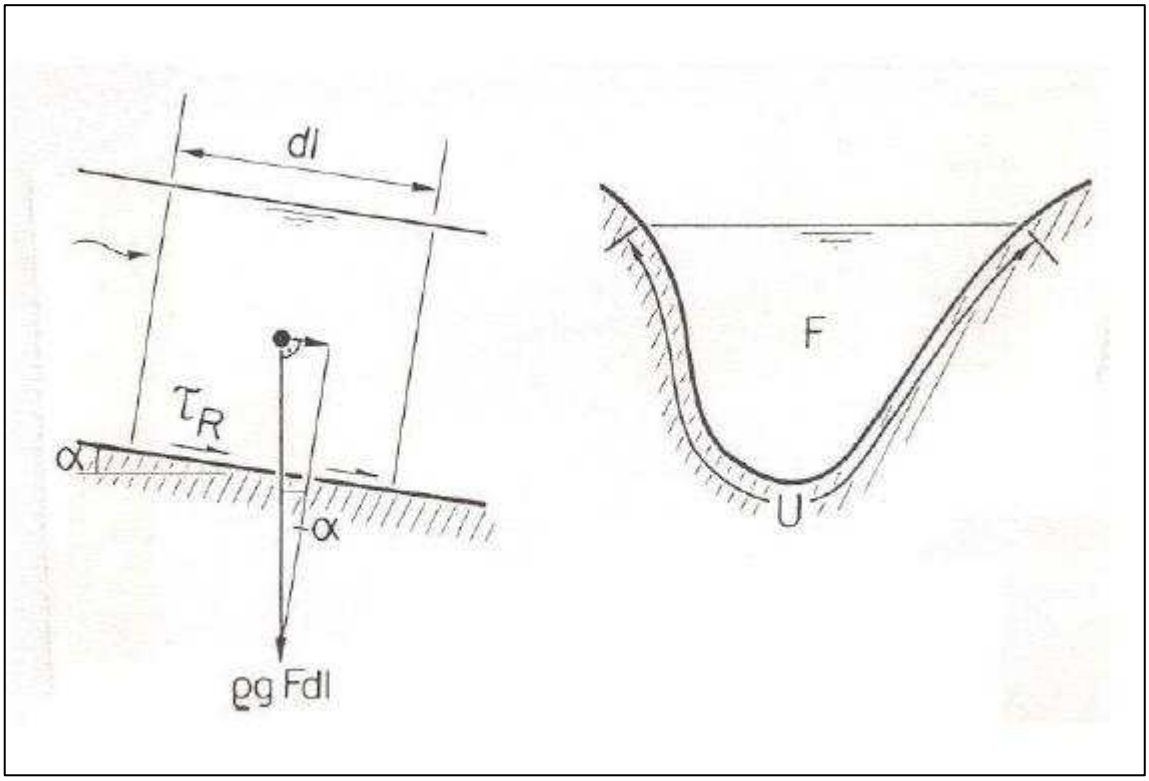


Abb. 7: Ableitung der Schleppspannung (VISCHER und HUBER, 2002)

Mit dieser Formel kann die aktuelle Schubspannung $\boldsymbol{\tau}$ ermittelt werden. Sobald eine kritische Sohlschubspannung $\boldsymbol{\tau}_{cr}$ überschritten wird, setzt sich theoretisch die Sohle in Bewegung.

SHIELDS (1936) stellte den Zusammenhang zwischen Sohlschubspannung und Geschiebetrieb in dimensionsloser Schreibweise dar. ZANKE (1990) erweiterte das SHIELDS-Diagramm mit einer Angabe einer Wahrscheinlichkeit für den Bewegungsbeginn von ca. 10%.

Folgende Kennzahlen werden als Eingangsparameter herangezogen:

Feststoff-Reynoldszahl Re:*

$$\mathrm{Re}^* = \frac{u^* \cdot d_K}{\nu} \qquad (-) \qquad (2.4)$$

d_K … Korndurchmesser

ν … kinematische Viskosität

Feststoff-Froudezahl Fr:*

$$Fr^* = \frac{u^{*2}}{\rho' \cdot g \cdot d_K} \quad (-) \qquad (2.5)$$

Sedimentologischer Durchmesser D:*

$$D^* = \left(\frac{\rho' \cdot g}{\nu^2}\right)^{1/3} \cdot d_K = \left(\frac{\mathrm{Re}^{*2}}{Fr^*}\right)^{1/3} \quad (-) \qquad (2.6)$$

Relative Feststoffdichte ρ' (unter Auftrieb):

$$\rho' = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (-) \qquad (2.7)$$

Die Sohlschubspannungsgeschwindigkeit u:*

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_W}} \quad (\mathrm{m/s}) \qquad (2.8)$$

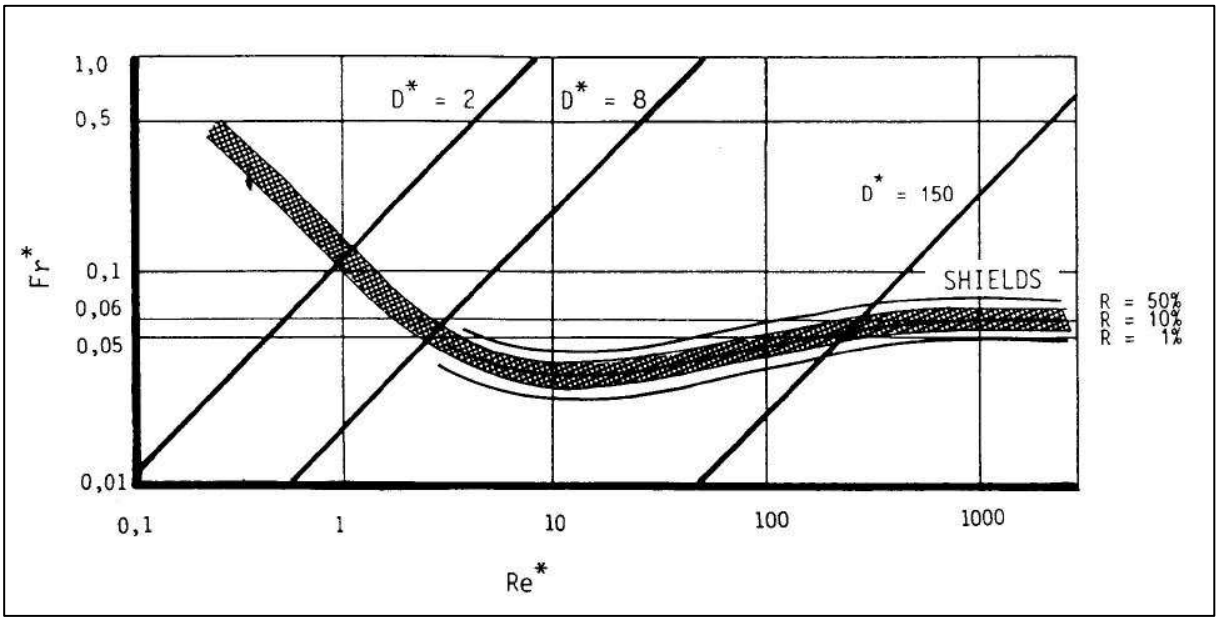


Abb. 8: Bewegungsbeginn nach SHIELDS (1936) mit Angabe des Bewegungsrisikos R nach ZANKE (1990), (DVWK Regeln, 1992)

Durch Umformung der Gleichungen 2.5 mit 2.7 und 2.8 erhielt SHIELDS (1936) eine dimensionslose kritische Scherspannung θ.

$$\theta = \frac{\tau_{cr}}{g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot d_K} \quad (-) \qquad (2.9)$$

Im hydraulisch glatten Bereich dominieren Zähigkeitskräfte, im hydraulisch rauen Bereich (ab Re* > 300 bzw. D* > 150, d.h. d_K > 0,06 cm) dominieren Druckkräfte und Formwiderstände, Fr* ist nicht mehr von Re* abhängig (PATT et. al., 1998). Um ein Korn herrscht nun voll ausgebildete Turbulenz, die kritische Scherspannung θ strebt einen konstanten Wert zu. SHIELDS (1936) setzt diesen Grenzwert mit 0,06 an. GESSLER (1965) setzte diesen Wert für den vollturbulenten Bereich an und legte zusätzlich den kritischen Wert 0,047 mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % für das Bewegen über einen langen Zeitraum fest.

Nach GÜNTER (1971) ist nicht nur die kritische Scherspannung von Bedeutung, ebenso haben Schwankungen der Sohlschubspannung auf den Geschiebetransportbeginn einen Einfluss.

2.3.3 Hebekraft

Durch turbulentes Fließen werden Körner mit größerem Durchmesser durch aufwärtsgerichtete Kräfte mobilisiert. Einzelne Körner ragen unterschiedlich hoch in die Strömung und verursachen damit nach oben gerichtete Druckgradienten. Gemeinsam mit einer Wirbelbildung hinter dem Korn kann es zu einer Ablösung von der Sohle kommen. Um das Korn weiterzutransportieren reichen kleinste Schleppspannungen aus. SHIELDS (1936) hat diesen Effekt dahin berücksichtigt, dass für kleinere Korngrößen höhere Scherspannungen erforderlich sind (ZEPP, 2002).

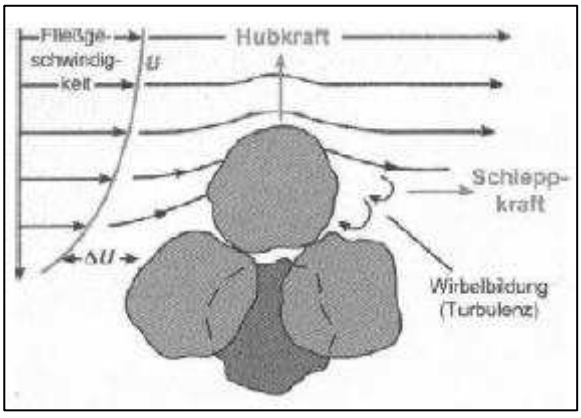


Abb. 9: Ablösung eines Partikels von der Gewässersohle (KNIGHTON, 1998)

2.4 Deckschichtbildung

Bei überschreiten der genannten kritischen Faktoren kommt es zu einem Geschiebetransport in Gerinnen. Ändern sich nun die Ausgangsbedingungen, stellt sich ein geringerer Abfluss ein, können nur mehr kleinere Kornfraktionen transportiert werden. Gröbere Feststoffe bleiben liegen und bilden eine Deckschicht. Dieser Vorgang wird als Abpflasterung bezeichnet (NACHTNEBEL, 2002).

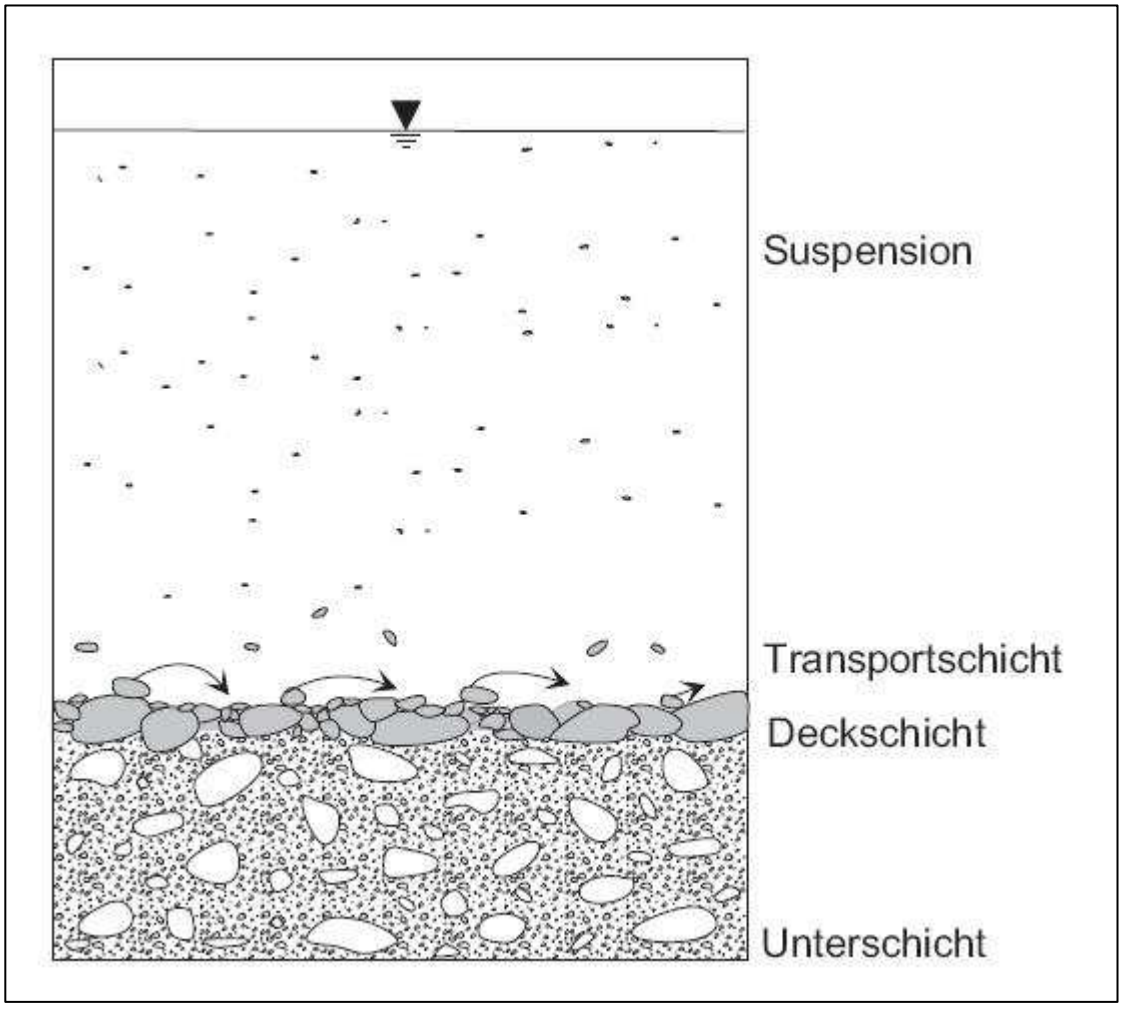


Abb. 10: Vertikale Schichtung eines geschiebeführenden Gewässers (MALCHAREK, 2003; zit. bei SENDZIK, 2003)

Diese Deckschicht erhöht die Empfindlichkeit für den Bewegungsbeginn im Gegensatz zum ursprünglichen Material der Unterschicht. Dieser Vorgang stellt somit einen natürlichen Schutz der Sohle gegen Erosion dar. JÄGGI (1992) unterscheidet fünf verschiedene Zustände für die Sohlenpflästerung. Diese Zustände oder Klassen reichen von schwachem Transport mit einer stabilen Deckschicht bis hin zu einer kompletten Bewegung der Sohle für Hochwasserabflüsse.

Ein Zusammenhang von Abfluss und Geschiebefluss kann mit einer Geschiebefunktion oder Sediment-Rating Curve hergestellt werden.

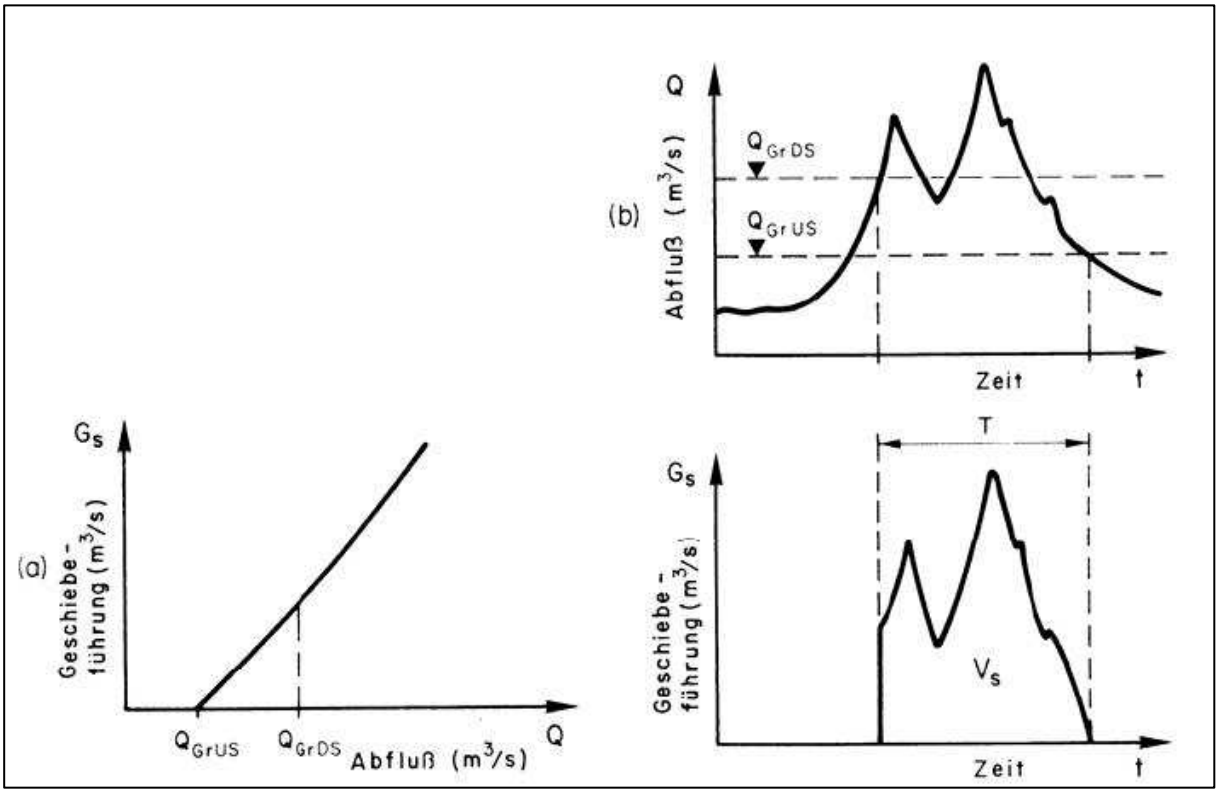


Abb. 11: (a) Geschiebefunktion, (b) Zusammenhang zwischen Abfluss- und Geschiebeganglinie (VISCHER & HUBER, 2002).

In diesem Zusammenhang wird für Wasserstände die über einen längeren Zeitraum die größte Geschiebefracht transportieren vom bettbildenden Wasserstand gesprochen. Dieser bettbildende Wasserstand entspricht der zweiten und dritten Klasse nach JÄGGI (1992).

2.5 Transportkörper

Der Geschiebetransport ist kein schichtartiger Prozess, sondern erfolgt schubweise. Einzelne Körner werden, wie in Kap. 2.3 erläutert, abgehoben und gemeinsam vorwärtsbewegt und abgelagert und nach einer gewissen Zeit wieder weitertransportiert. Dieser Transport erfolgt nicht auf einer ebenen Sohle sondern in sogenannten Transportkörpern (ÖWWV, 1992).

Die unterschiedlichen Sohlformen können eine Höhe bis zu einem Drittel der Wassertiefe erreichen. Diese Formen sind ein Kennzeichen für die engen Wechselwirkungen zwischen Abflussgeschehen und Feststofftransport. Nach DIN 4049 können folgende Grundformen unterschieden werden (NACHTNEBEL, 2003):

2.5.1 Riffel

Kleine Sohlunebenheiten die sich in Strömungsrichtung bewegen und von der Wassertiefe unabhängig sind. Ihr Strömungseinfluss reicht nicht bis an die Oberfläche.

2.5.2 Dünen

Größere Sohlwellen die sich in Strömungsrichtung bewegen und deren Höhe von der Wassertiefe abhängig ist. Die Strömung wird bis an die Oberfläche beeinflusst.

2.5.3 Antidünen

Bei schießendem Abfluss können sich wellige Sohlformen bilden, die phasengleich mit den Oberflächenwellen stromaufwärts wandern.

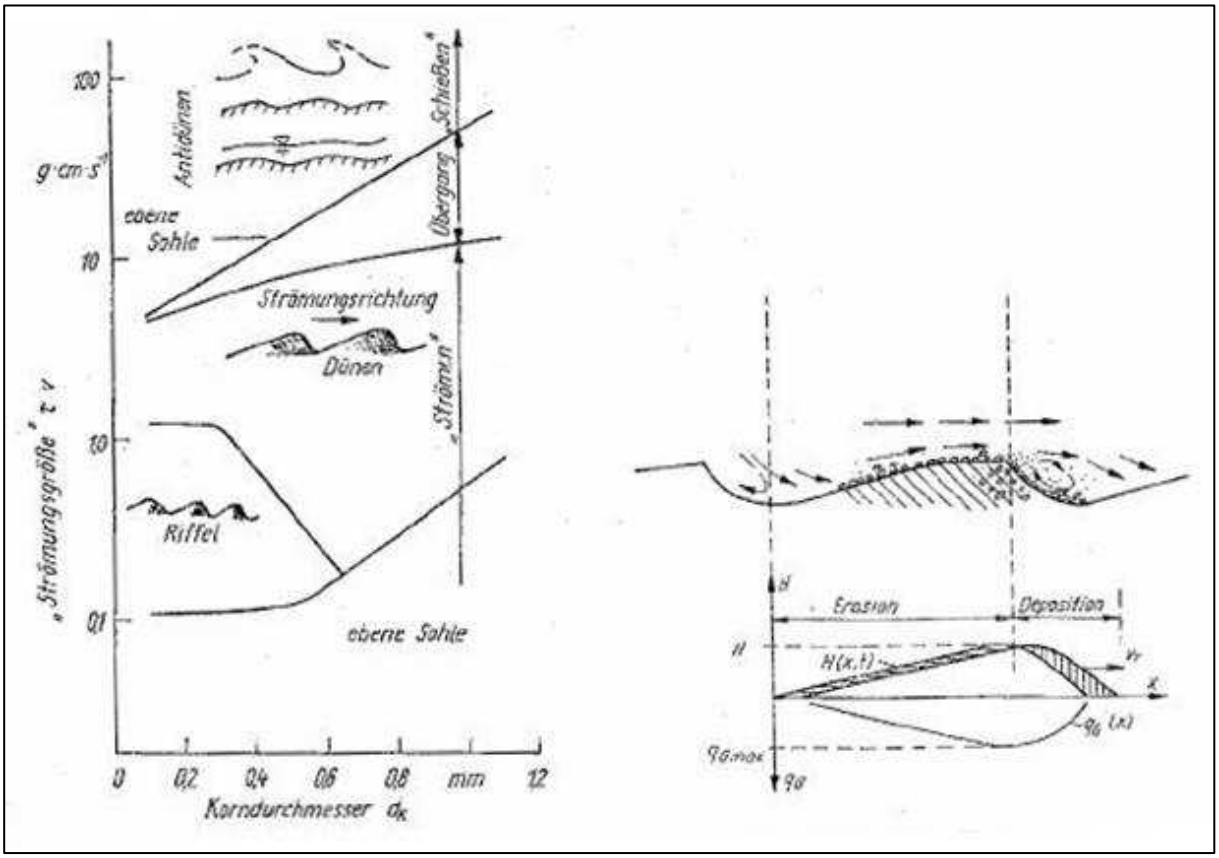


Abb. 12: Bettformen und Geschiebetransport bzw. –umlagerung in einem Transportkörper (GLAZIK, 2000)

Zusätzlich zu diesen „kleinen" Sohlenformen kann diese Klassierung noch um die Bänke als eigene Sohlenform erweitert werden. In ÖWWV (1992) werden unterschiedliche Bankformen angeführt.

Weiters kann nach ÖWWV (1992) festgehalten werden, dass alle Sohlformen Ausdruck für das Prinzip des kleinstmöglichen Energieverbrauches einer Strömung pro Zeiteinheit sind und stark von der zeitlich veränderlichen Intensität des Abflusses beeinflusst werden.

2.6 Selektiver Transport und Abrieb

Im Längenschnitt eines Flusses kommt es zu einer Zonierung der Kornfraktionen. Im Oberlauf dominiert das Mega- bis Mikrolithal, im Potamal die Substrate Psammal und Pelal. Folgende Gründe können für diese Abstufung angeführt werden (VISCHER & HUBER, 2002):

- Ein Zerbrechen der Steine aufgrund mechanischer Beanspruchung
- Der Gesteinsabrieb, durch gegenseitiges Anschlagen beim Geschiebetransport. Die abgeschlagenen Feinteile können als Schwebstoffe weitertransportiert werden.
- Aufgrund der unterschiedlichen Transportkapazität kommt es zu einer Entmischung, d.h. gröbere Körner bleiben früher liegen als kleinere.

2.7 Geschiebetransportformel nach MEYER-PETER & MÜLLER (1949)

Nach HABERSACK (2007 und 1997) können zwei Familien von Transportformeln genannt werden.

- Deterministische oder DuBoys-Gleichungen

  Ein kritischer Grenzwert (Abfluss, Wassertiefe, Schleppspannung) ist entscheidend.

- Probalistische oder Einstein-Gleichungen

  Statistische Überlegungen und die Hebekraft sind von Bedeutung.

Im Folgenden wird nur die deterministische Gleichung von Meyer-Peter & Müller genauer behandelt. Eine zusammenfassende Darstellung der wichtigsten Formeln findet sich bei HABERSACK (1997) und NACHTNEBEL (2003).

Basierend auf Versuchen wurde ein Zusammenhang zwischen Profildaten und dem Geschiebetrieb durch MEYER-PETER & MÜLLER (1949) in folgender Form hergestellt:

$$\frac{\gamma \cdot R_s \cdot (\frac{k_s}{k_r})^{3/2} \cdot J_R}{d_m} = A'' \cdot (\gamma_s - \gamma) + B'' \cdot \sqrt[3]{\rho} \cdot \frac{(g''_s)^{2/3}}{d_m} \qquad (2.10)$$

mit den dimensionslosen Konstanten

A'' = 0,047, B'' = 0,25

und

γ Wichte (spezifisches Gewicht) von Wasser

γ_s Wichte vom Geschiebe

$R_s \cdot$ Hydraulischer Radius

k_s Rauigkeitskoeffizient nach Strickler

k_r Kornrauigkeit

J_R Energieliniengefälle

d_m Mittlerer Korndurchmesser

g''_s Pro Meter Flussbreite geförderte Geschiebemenge

Der Faktor A'' mit 0,047 stellt den Beginn des Geschiebetriebs aufgrund der Schleppspannung, mit folgender Formel, dar:

$$A'' = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d_m} \qquad (2.11)$$

Als unterste Grenze für absolute Ruhe des Geschiebes wird ein Wert von 0,03 für A'' angegeben.

Der Geschiebetrieb kann daher in Abhängigkeit der Differenz zwischen tatsächlicher Sohlschubspannung τ_r und der Grenzschubspannung τ_{Gr} definiert werden, somit kann der Geschiebetrieb g_s in folgender Form angegeben werden:

$$g_s = \frac{8}{\rho^{1/2} \cdot (\rho_r - 1) \cdot g} (\tau_r - \tau_{Gr})^{3/2} \qquad (2.12)$$

Die Kornrauigkeit k_r kann nach MÜLLER (zit. bei VISCHER & HUBER, 2002) folgend angeführt werden:

$$k_r = \frac{26}{d_m^{1/6}} \qquad (2.13)$$

Wobei der mittlere Korndurchmesser d_m in Abhängigkeit der Deckschicht betrachtet wird. Bei intakter Deckschicht ist der $d_{mDS} = d_{90US}$ heranzuziehen, bei zerstörter oder fehlender Deckschicht wird der d_{mUS} der Unterschicht verwendet (VISCHER & HUBER, 2002).

Bei Vergleichen verschiedener Transportformeln für den Geschiebetrieb, weichen die Ergebnisse teils stark voneinander ab. Eine allgemeingültige Formel gibt es nicht, so ist gerade bei der Wahl einer Formel deren Gültigkeitsbereich zu berücksichtigen (VETTER, 1988; zit. bei PATT, 1998).

Die Formel 2.10 wurde mit Versuchen für folgende Bereiche verifiziert (MEYER-PETER & MÜLLER, 1949):

- Gefälle J von 0,4 bis 20 ‰
- Korngröße von 0,04 bis 3 cm
- Wassertiefen von 0,01 bis 1,2 m
- Abflussmengen von 0,002 bis 2,0 m³/m.s
- Feststoffdichte ρ_s von 1250 bis 4200 kg/m³

Mit den durchgeführten Versuchen konnte der Wert für A'' vom unteren Grenzwert der Ruhe 0,03 bis zu einem Wert von 0,2 verifiziert werden.

2.8 Merkmale von numerischen Modellen

Das erfolgreiche Modellieren eines physikalischen Prozesses bzw. eines Naturereignisses hängt in der ersten Linie von der Auswahl der Grundgleichungen (dem mathematisches Modell) ab (NUJIC, 2003).

Um gute Modellierungsergebnisse zu erhalten, ist ein Verständnis dieser zugrunde liegenden mathematischen Gleichungen notwendig. In den folgenden Kapiteln werden die, dem hydrodynamischen Modell HYDRO_AS-2D, zugrunde liegenden zweidimensionalen Flachwassergleichungen betrachtet und das Geschiebetransportmodell HYDRO_GS-2D mit seinen Grundlagen im Detail beschrieben.

Um eine begriffliche Basis zu schaffen, werden im Folgenden einige ausgewählte Definitionen näher beschrieben. Die Begriffsbestimmung erfolgt in Anlehnung an DVWK (1999), SCHWANENBERG (2003) und JUGOVIC (2005).

Im Zuge der Modellerstellung muss klar unterschieden werden, zwischen:

- **Kalibrierung**

  Die Anpassung des Modells an die Daten in der Natur. Dabei wird durch das Modell eine spezifische Situation in der Natur nachgebildet. Die Kalibrierung eines Modells allein stellt noch keine ausreichende Garantie für die Verlässlichkeit eines Modells dar.

- **Verifizierung/Validierung**

  Ohne das kalibrierte Modell zu verändern, werden andere bekannte Situationen aus der Natur herangezogen. Bei „guten“ Modellen sollten ähnliche Ergebnisse wie in der Natur auftreten.

Im Hinblick auf zeitliche Merkmale von Modell können folgende Ausprägungen unterschieden werden:

- **Stationär**

  Eine stationäre Strömungssituation in einem Modell bedeutet, dass die eintretende Wassermenge gleich der austretenden ist, d.h. das je nach Wasserstand alle Retentionsflächen aufgefüllt sind. Ein derartiges Modell kann ausreichend sein für ein Fluss-Vorland-System von geringer Ausdehnung oder aber für ein „worst-case“ Szenario in der Hochwassermodellierung.

- **Instationär**

  Instationäre Modelle zeigen den tatsächlichen Verlauf der vorhandenen Prozesse. Instationarität bedeutet dabei, dass ein Parameter während eines Zeitablaufes keinem konstanten Wert folgt.

Weiters einige Eigenschaften numerischer Verfahren:

- **Konservativ**

  Als konservativ wird ein numerischer Ansatz bezeichnet, wenn die physikalischen Erhaltungsgrößen erhalten bleiben. D.h. die Masse des Wassers und der transportierenden Stoffe bleibt erhalten. Man unterscheidet eine Konservativität für das Gebiet oder für jedes einzelne Element.

- **Konsistenz**

Ein Verfahren wird als konsistent mit den Grundgleichungen bezeichnet, wenn alle Fehlerterme von der Schrittweite abhängen und diese bei geringer werdender Schrittweite kleiner werden.

- **Stabilität**

Nach FERZINGER & PERIC (1999, zit. bei SCHWANENBERG, 2003) wird ein Verfahren stabil genannt, wenn sich der Diskretisierungsfehler im numerischen Lösungsprozess nicht vergrößert. Der Diskretisierungsfehler ist die Differenz zwischen der exakten und der numerischen Lösung.

- **Konvergenz**

Strebt bei einer Verringerung der räumlichen und zeitlichen Schrittweite der Diskretisierungsfehler gegen Null, dann wird das Verfahren konvergent bezeichnet. Konsistenz und Stabilität sind die Voraussetzung für die Konvergenz eines Verfahrens.

Halbiert sich der Fehler bei der Halbierung einer räumlichen oder zeitlichen Einheit, dann handelt es sich um ein Verfahren erster Ordnung. Viertelt sich der Fehler, spricht man von einem Verfahren zweiter Ordnung. Beginnend mit der zweiten Ordnung werden Verfahren als Verfahren höherer Ordnung bezeichnet.

- **Upwinding (Gegenwind – Diskretisierung)**

Ein Schlüsselbegriff für die Simulation konvektionsdominierter Probleme ist das Upwinding. In der numerischen Strömungslehre stellen Upwind Verfahren Diskretisierungsmethoden zum Lösen von partiellen Differentialgleichungen dar. Steigt die Strömungsgeschwindigkeit an, so verschiebt sich der Bestimmtheitsbereich eines Berechnungspunktes P gegen die Fließrichtung. Beim Übergang von strömenden zu schießenden Abfluss führt das dazu, dass der Wert vom Punkt P im neuen Zeitpunkt alleinig über seinen stromaufwärts gelegenen Bereich bestimmt wird. Numerische Verfahren, die diese Eigenschaft reproduzieren können, werden als Upwinding-Verfahren bezeichnet.

2.9 Zweidimensionale Flachwassergleichungen

Die tiefengemittelten Flachwassergleichungen bilden die Grundlage der Berechnung von näherungsweise horizontalen Strömungen (BEFFA, 1994) und werden in dem Modell HYDRO_AS-2D eingesetzt. Ausgehend von den Erhaltungsgleichungen der Physik für Masse, Energie und Impuls entstanden die Gleichungen von Navier Stokes. Sie beinhalten

keine Vereinfachungen und können selbst komplexeste Strömungen korrekt abbilden. Aufgrund des enormen Rechenaufwandes müssen allerdings Vereinfachungen vorgenommen werden (ÖWAV, 2006).

Um turbulente Strömungen numerisch zu lösen erfolgt eine zeitliche Mittelung die auf die Reynoldsgleichungen führt. Dabei werden die Geschwindigkeitskomponenten und der Druck in zeitliche Mittelwerte und in einen fluktuierenden oder Schwankungsterm eingeteilt. Aufgrund des nichtlinearen Impulsflusses entstehen unbekannte Zusammenhänge der Schwankungsbewegungen die durch zusätzliche Fluktuationsterme oder die so genannten Reynoldsspannungen beschrieben werden. Durch diesen Term wird der Impulsaustausch der Strömung aufgrund der Turbulenz beschrieben. Für die Lösung der Reynoldsspannungen entwickelte sich die Turbulenzmodellierung (BEFFA, 1994).

Eine weitere Vereinfachung um auf die zweidimensionalen Flachwassergleichungen zu kommen, erfolgt durch die Annahme, dass Fließgewässer nicht sehr tief sind im Vergleich zu ihrer horizontalen Ausbreitung. Die daher nur geringen Geschwindigkeits- und Beschleunigungskomponenten in z-Richtung werden vernachlässigt (SCHWANENBERG 2003).

Für die zweidimensionalen Flachwassergleichungen werden nach ÖWAV (2006) folgende Annahmen getroffen:

1. Es handelt sich um Flachwasser, d.h. die Wellenlänge ist viel länger als die Wellenhöhe.
2. Geschwindigkeit und somit Impuls in vertikaler Richtung können vernachlässigt werden.
3. Der Druck wird hydrostatisch angenommen, da die Stromlinienkrümmung gering ist.
4. Die Geschwindigkeit in x- und y-Richtung wird berücksichtigt.
5. Die Geschwindigkeit in z-Richtung, die Wassertiefe, wird gemittelt.

In kompakter Vektorform werden die Strömungsgleichungen nach NUJIC (1998) wie folgt angegeben:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} + s = 0 \qquad (2.14)$$

In ausgeschriebener Vektorschreibweise führt Gleichung 2.14 auf folgende Form:

$$\partial t\begin{bmatrix} H \\ u\cdot h \\ v\cdot h \end{bmatrix} + \partial x\begin{bmatrix} u\cdot h \\ u^2\cdot h + 0{,}5\cdot g\cdot h^2 - \nu\cdot h\cdot\dfrac{\partial u}{\partial x} \\ u\cdot v\cdot h - \nu\cdot h\cdot\dfrac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix} + \partial y\begin{bmatrix} v\cdot h \\ u\cdot v\cdot h - \nu\cdot h\cdot\dfrac{\partial u}{\partial y} \\ v^2\cdot h + 0{,}5\cdot g\cdot h^2 - \nu\cdot h\cdot\dfrac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ g\cdot h(I_{Ex} - I_{Sx}) \\ g\cdot h(I_{Ey} - I_{Sy}) \end{bmatrix} = 0$$

$$\underbrace{\quad}_{\mathbf{w}} \quad \underbrace{\qquad\qquad}_{\mathbf{f}} \quad \underbrace{\qquad\qquad}_{\mathbf{g}} \quad \underbrace{\qquad}_{\mathbf{s}}$$

Dabei bezeichnet

- **w** den Variablenvektor mit H = h+z den Wasserspiegel über einem Bezugsniveau, h ist dann die eigentliche Wassertiefe, u und v stellen die Geschwindigkeitskomponenten in x- und y-Richtung dar.
- **f** und **g** stellen die Massen- und Impulsflüsse in x- und y-Richtung dar, mit g für die Erdbeschleunigung und ν als Viskositätskoeffizient.
- **s** wird als Quellterm bezeichnet und beinhaltet das Reibungsgefälle (I_{Ex}, I_{Ey}) und die Sohlenneigung (I_{Sx}, I_{Sy}). In der verwendeten Modellierungssoftware wird das Reibungsgefälle mittels der Darcy-Weisbach Formel ermittelt wobei der Widerstandsbeiwert λ über die Manning-Strickler Formel berechnet wird (NUJIC, 2003).

Das verwendete Turbulenzmodell ausgedrückt durch den Koeffizienten ν basiert auf dem Konzept der Wirbelviskosität, das bereits 1877 von Boussinesq eingeführt wurde (BEFFA, 1994) und einer über das Element konstanten Viskosität in der Form

$$\nu = \nu_0 + c_\mu \cdot u^* \cdot h \qquad (2.15)$$

Dabei stellt ν_0 den abschnittsweise konstanten Wert dar, der für jedes Netzelement definiert werden kann. Das zweite Glied drückt die Wirbelviskosität aufgrund der Sohlenreibung aus, dabei steht u* für die Schleppspannung, h für die Wassertiefe und die Konstante c_μ wurde in Versuchen in einem Bereich von 0,3 bis 0,9 ermittelt. In der Software wurde 0,6 implementiert (NUJIC, 2003).

2.10 Geschiebetransportsimulation

Die Geschiebetransportessimulation HYDRO_GS-2D basiert auf der erweiterten Meyer-Peter & Müller Gleichung. Diese Erweiterung des hydrodynamischen Modells zusätzlich mit den Veränderungen der Sohle aufgrund des Geschiebetriebs, wird im Folgenden erläutert.

2.10.1 Bodenevolutionsgleichung

Für eine Erfassung der Sohlhöhenänderung wird nach DVWK (2003) eine Bilanzierung aller ein- und austretenden Feststoffmengen in einem Kontrollelement (siehe Abbildung 14) durchgeführt. Da für Geschiebe- und Schwebstofftransport unterschiedliche Grundlagen sowie Bereiche gelten, wird er auch unterschiedlich modelliert. In Abbildung 13 sind in einer schematischen Darstellung die Bereiche dargestellt, ebenso ist ersichtlich, dass es zu Austauschvorgängen zwischen diesen Bereichen kommt.

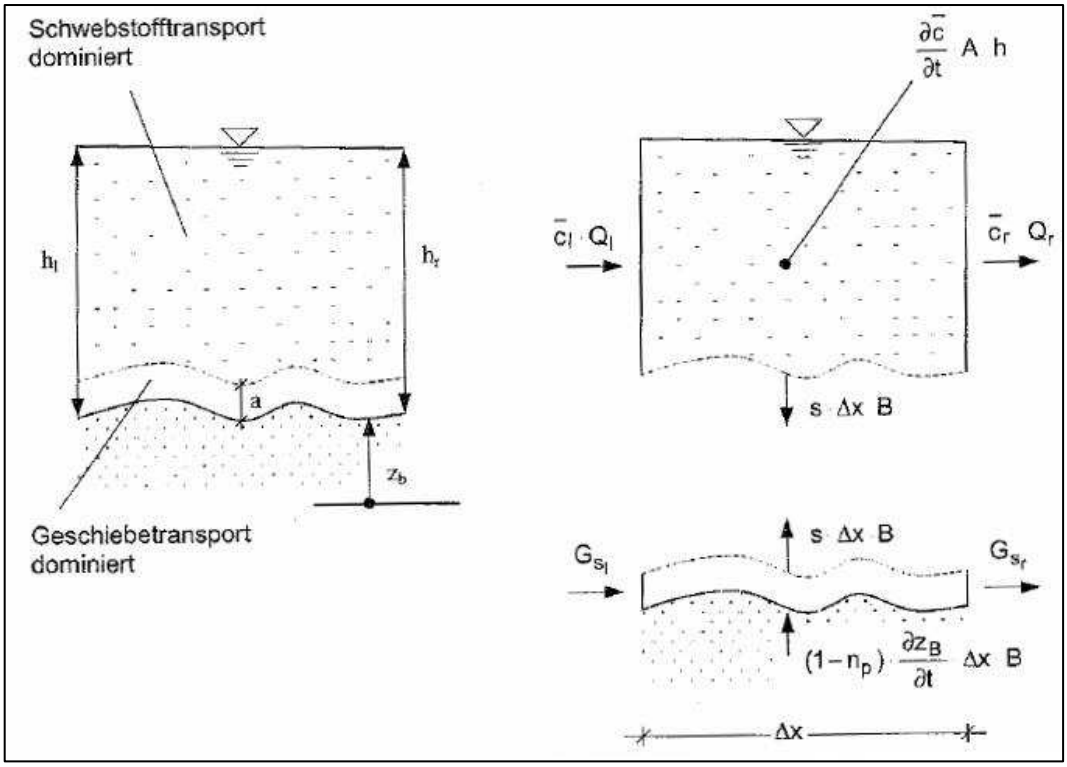


Abb. 13: Vertikale Einteilung des Wasserkörpers nach Geschiebe- und Schwebstofftransport anhand einer 1D-Formulierung (DVWK, 2003)

In zweidimensionaler Form lautet die Bodenevolutionsgleichung oder auch Exner Gleichung nach NUJIC (2007) wie folgt:

$$(1-n_p)\rho_s \frac{\partial z}{\partial t} + div\ \vec{g}_S = s \qquad (2.16)$$

n_p	Porenanteil der Sohlsedimente
ρ_s	Feststoffdichte
$\frac{\partial z}{\partial t}$	Sohlhöhenänderung
$\vec{g}_S$	Vektor des Geschiebetriebs über alle Kornfraktionen
s	Ablagerungs- bzw. Erosionsterm für Schwebstoffe

2.10.2 Geschiebetransport

Der Geschiebetrieb in HYDRO_GS-2D wird mittels der Meyer-Peter & Müller Formel in folgender Form

$$g_s = c_{MP}(\mu \cdot \Theta' - \Theta_{cr})^{3/2} \sqrt{(\rho_r - 1) \cdot g} \cdot d_m^{3/2} \tag{2.17}$$

mit

$$\Theta' = \frac{hJ}{(\rho_r - 1) \cdot d_m} \tag{2.18}$$

und

$$\mu = \left(\frac{k_{St}}{k_{St}'} \right)^{3/2} \tag{2.19}$$

berechnet. Der Wert μ wird dabei als Ripple-Faktor für das Verhältnis aus Formanteil nach Strickler und Kornreibungsanteil nach Strickler bezeichnet. Nach VISCHER & HUBER (2002) kann für eine ebene Sohle der Wert 1,0 für $\frac{k_{St}}{k_{St}'}$ angegeben werden und bei vorhandenen Transportkörpern wie etwa hohen Sohlwellen der Wert 0,5 verwendet werden.

Für eine bessere Modellanpassung wird der in Gl. 2.12 konstante Wert von 8 als c_{MP} Faktor implementiert, ebenso wird die Konstante nach Meyer-Peter & Müller für den Beginn des Geschiebetransports mit 0,047 durch den kritischen Shieldsparameter Θ_{cr} ausgedrückt.

Im Unterschied zu Gl. 2.13 für die reine Kornrauheit wird von NUJIC (2007) folgende Beziehung für die Gesamtrauheit angegeben:

$$k_{St}' = \frac{21}{d_m^{1/6}} \cong \frac{21}{3 \cdot d_{50}^{1/6}} \cong \frac{17{,}5}{d_{50}^{1/6}} \tag{2.20}$$

Durch Gl. 2.20 kann jedoch nur ein Startwert angegeben werden, der genaue Wert des Ripple-Faktors μ ergibt sich durch die Modellkalibrierung.

Einfluss auf den Geschiebetrieb haben ebenfalls die Flusskrümmung als auch die Sohlneigung. In Flusskrümmungen variiert die Sohlschubspannung von der mittleren Strömungsrichtung, diese Richtungsabweichung δ_r wird annähernd durch folgende Gleichung beschrieben (BRIDGE, 1992; zit. bei NUJIC, 2007):

$$\delta_r = -A\frac{h}{r} \tag{2.21}$$

Dabei ist h die Wassertiefe, r der Krümmungsradius und A ein dimensionsloser Beiwert zwischen 8 und 12.

Die Sohlneigung wird im kritischen Shieldsparameter Θ_{cr} nach VAN RIJN (1993; zit. bei NUJIC, 2007) berücksichtigt.

$$\Theta_{cr} = k_\beta \cdot k_\delta \cdot \Theta_{cr,h} \tag{2.22}$$

Dabei steht der $\Theta_{cr,h}$ für den kritischen Shieldsparameter der horizontalen Sohle und über die Beiwerte k_β und k_δ wird die Sohlneigung in Fließrichtung und in Querrichtung und der innere Reibungswinkel berücksichtigt.

In der aktuellen Version der Software erfolgt keine Berücksichtigung eines fraktionierten Geschiebetriebs. Der mittlere Korndurchmesser d_m muss daher das gesamte Spektrum an transportiertem Geschiebe abdecken.

2.11 Numerische Lösung

Ein Überblick über numerische Methoden, d.h. wie aus den oben angesprochenen Differential- und Integralgleichungen diskrete algebraische Gleichungen erzeugt werden, im Hinblick auf räumliche und zeitliche Diskretisierung sowie numerische Verfahren wird in ÖWAV (2006) bzw. in LFU (2003) gegeben.

Das eingesetzte Verfahren arbeitet mit der konservativen finite-Volumen Methode, dabei ist das Gleichungssystem lokal konservativ, d.h. der Ausfluss aus einem Kontrollvolumen (Abb. 14) ist gleich dem Zufluss zu benachbarten Volumina, als auch über das gesamte Berechnungsnetz konservativ. Der Unterschied zu anderen Verfahren ist, dass beim finite-Volumen Verfahren die Kontrollvolumina um einzelne Gitterknoten herum gebildet werden. Bei der Methode wird über das betrachtete Gebiet integriert, wodurch so genannte

konvektive und diffuse Ströme durch die Grenze von Kontrollvolumina gebildet werden. Die konvektiven Ströme (f und g in Gl. 2.14) werden in HYDRO_AS-2D basierend auf modernen Upwind Verfahren ermittelt. Die Lösung der diffusen Anteile erfolgt durch eine lineare Interpolation. Probleme in Form von Oszillationen können dabei auftreten, wenn die Berechnungselemente sehr klein sind oder ungünstige Winkel aufweisen. Um solche Elemente zu vermeiden, werden in Tab. 4 Qualitätskriterien für Berechnungsnetze für HYDRO_AS-2D angeführt.

Die räumliche Diskretisierung ist mit unstrukturierten Vierecks- als auch Dreieckselementen möglich, da die Bilanzierung der Flüsse unabhängig von der Form der Elemente erfolgt.

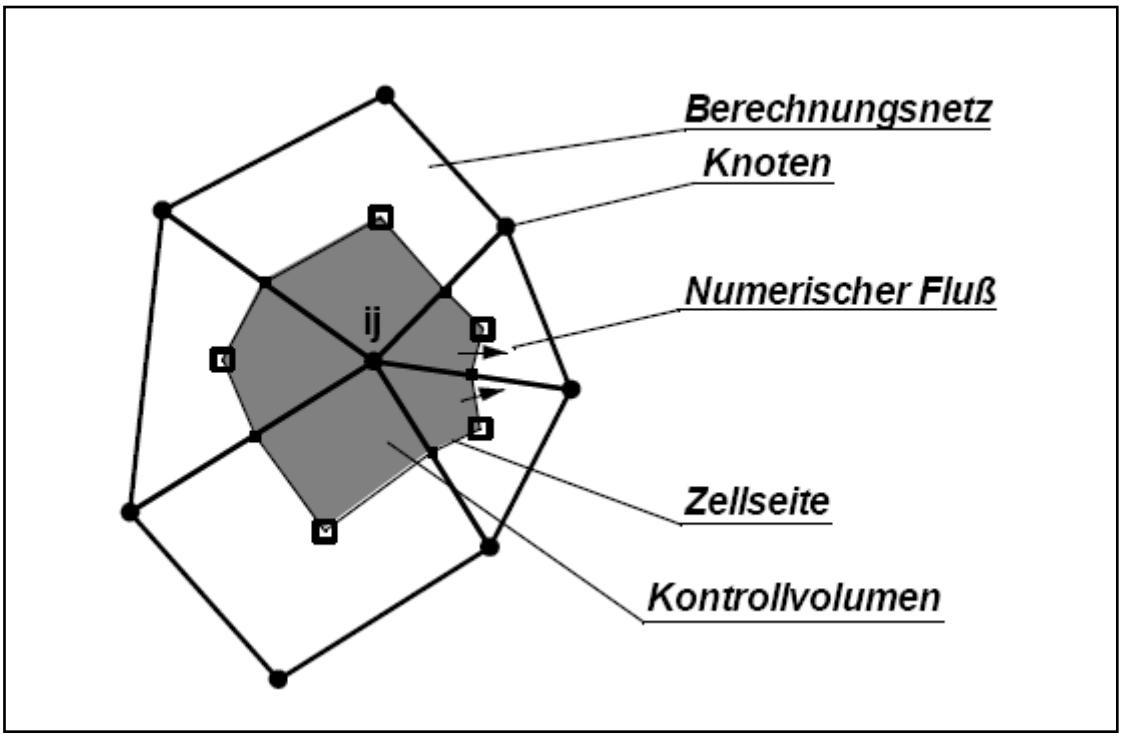


Abb. 14: Darstellung des Kontrollvolumens für den Knoten ij (NUJIC, 2003)

Die zeitliche Diskretisierung wird mittels eines expliziten Verfahrens gelöst. In der einfachsten Form bedeutet das, dass die gesuchten Größen zum neuen Zeitpunkt direkt aus den Werten des alten Zeitpunkts bestimmt werden. Im Detail heißt das, die Unbekannten an einem Netzknoten, etwa Fließgeschwindigkeit, Wasserstand usw. werden jeweils aus den Nachbarknoten nur des vorhergehenden Zeitschritts berechnet (LFU, 2003).

Eine weitere Unterscheidung hinsichtlich der zeitlichen Diskretisierung kann in Einschritt- oder Mehrschrittverfahren getroffen werden, dabei bedeutet Einschrittverfahren, dass nur Werte des Zeitpunktes n für den Zeitschritt n+1 verwendet werden. Bei Mehrschrittverfahren werden mehrere vorangegangene Zeitschritte eingesetzt (PARK, 2003).

Bei dem in HYDRO_AS-2D eingesetzten Verfahren handelt es sich um ein explizites Runge-Kutta Einschrittverfahren.

2.12 Randbedingungen

Modellränder sind Schnittstellen zwischen dem zu modellierenden Flussabschnitt und der umgebenden Umwelt. An den Grenzen der Modelle müssen Bedingungen für die Interaktion definiert werden. Es wird dabei, sowohl für das numerische als auch physikalische Modell zwischen offenen und geschlossenen Rändern unterschieden.

Geschlossene Ränder werden nicht durchströmt, die Strömung kann nur parallel zum Rand erfolgen. In HYDRO_AS-2D sind alle Ränder die nicht als Zu- oder Auslaufrand definiert sind geschlossene Ränder (NUJIC, 2003).

Offene Ränder werden durchströmt, über sie kommt Material in Form von Wasser und Geschiebe in das Modell hinein und hinaus. Dabei kann im numerischen Modell der Zulauf über Ganglinien festgelegt werden und der Auslauf mittels Wasserstands-Durchfluss Beziehungen, bzw. über das Energieliniengefälle.

Zusätzlich können zu den äußeren Randbedingungen für den Zu- und Auslauf im numerischen Modell noch interne Randbedingungen für Bauwerke, wie etwa Durchlässe oder Überfälle, festgelegt werden.

3. Datenbasis

Die numerische Simulation gibt ein physikalisches Modell wider. Die Datenlage hinsichtlich Geländegeometrie sowie Abfluss, vor allem aber auch dem Geschieberegime, ist im Vergleich zu oftmals spärlich vorhandenen Naturdaten sehr gut.

3.1 Projektsgebiet

Die Stadt Steyr liegt am Zusammenfluss der Enns und Steyr und ist dadurch von immer wiederkehrenden Hochwasserereignissen betroffen. Im August 2002 ereignete sich ein derart extremes Hochwasserereignis und setzte Teile der Stadt unter Wasser, wie in Abb. 15 dokumentiert.



Abb. 15: Bilddokumentation vom Hochwasser am 12. August 2002 in Steyr (Quelle: www.e-steyr.com)

Im Rahmen einer Hochwasserstudie, erstellt vom Ingenieurbüro Gunz ZT GmbH, wurden Potentiale für einen verbesserten Schutz aufgezeigt. Als vorrangiges Ziel wurde eine

Wasserspiegelabsenkung der Enns identifiziert, mit einem weit reichenden Einfluss auf den Abfluss an der Steyr. Für den Fluss Steyr lag das Hauptaugenmerk auf einer Verringerung der Geschiebeproblematik.

Die Problematik von Ablagerungen an der Gerinnesohle durch Sedimenttransport an der Enns ist begrenzt durch das Flusslaufkraftwerk Garsten, welches unmittelbar vor der Stadt Steyr situiert ist, somit beschränkt sich der Sedimenttransport auf den Fluss Steyr. Als Maßnahme zur nachhaltigen Sicherung der Wasserspiegelabsenkungen wurde daher eine Aufweitung in der Himmlitzer Au als ständig dotierter Nebenarm zur gezielten Geschiebeentnahme vorgeschlagen.

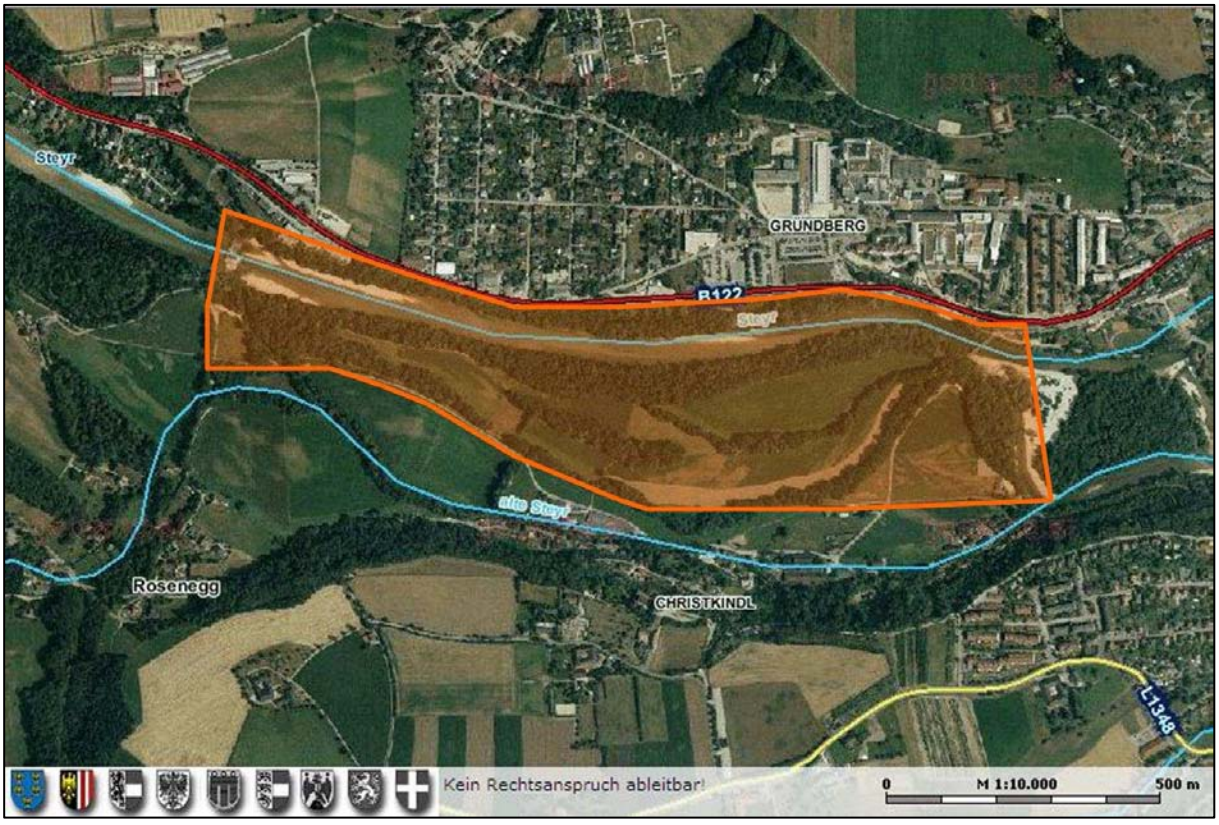


Abb. 16: Darstellung des Projektgebiets in der Himmlitzer Au (Orange Markierung). (Luftbild: Geoland.at, 5.Juli 2008)

Mittels physikalischen Modellversuchen wurde das Projektgebiet im Längen- und Breitenmaßstab von 1:80 und einer dreifachen Überhöhung nachgebaut und die Funktionalität des Nebenarms als Geschiebefalle bei verschiedenen Durchflüssen getestet und optimiert (KOLOSEUS 2008). Da relevanter Geschiebetrieb erst ab höheren Ablüssen stattfindet, wurden primär die stationären Ereignisse HQ1, HQ10, HQ30 und HQ100 betrachtet.

Die geplante Flussaufweitung erstreckt sich im Bereich der Himmlitzer Au über eine Länge von etwa einen Kilometer. Die Himmlitzer Au befindet sich zwischen Kruglwehr und Schwarzer Brücke, diese ehemalige Auenlandschaft wird derzeit hauptsächlich landwirtschaftlich genutzt. Die lateralen Abflussbegrenzungen sind steile Terrassen im Norden, also linksufrig und im Süden der Eisenbahndamm der Steyrtalbahn.

Für die physikalische Simulation wurde ein Projektsgebiet von 1.200 m gewählt. Wobei besonders flussauf des Einlaufbauwerks in den Nebenarm ein längerer Abschnitt modelliert wurde um konstante Strömungsbedingungen zu erhalten.

Analog dazu wurde das numerische Modell definiert, wobei das Berechnungsnetz im Zu- und Auslauf um einige konstante Elementreihen erweitert wurde, um einen störungsfreien Vergleich des numerischen Modells mit dem physikalischen Modell zu gewährleisten.



Abb. 17: Gegenüberstellung von Natursituation, physikalischen und numerischen Modellversuch

3.2 Geometrie

Das Gebiet erstreckt sich über eine Länge von 1.200 Metern, die im physikalischen Modellversuch auf einer Länge von 17 Metern abgebildet werden (siehe Abb. 16).
Für die Erstellung des numerischen Netzes konnten nun einerseits Geometriedaten aus der Natur verwendet werden, die auch Grundlagen des physikalischen Modelle waren und andererseits, auch die Talquerprofile anhand derer das Modell tatsächlich gebaut wurde.
Folgende Daten wurden herangezogen:

- Ein CAD Lageplan des Ist-Zustandes

- 30 Querprofile vom Ist-Zustand im Abstand von 50 Metern über das ganze Projektgebiet hinweg (CAD)
- Digitales Höhenmodell, in Form von Rasterdaten mit Punktabständen von ca. 20 Metern.
- Wichtige Geländeinformationen sind als Bruchkanten(2d Polylinien) verfügbar.
- Ein Lageplan vom Projekt in CAD
- CAD Querprofile vom Projekt (3-fach überhöht)
- Querprofile vom Projekt in HEC-RAS

Zusätzlich zu den Querprofildaten aus den CAD Plänen wurden Profildaten aus einem 1-dimensionalen Modell exportiert und übernommen.

3.3 Hydrologie

Für den Geschiebetrieb sind primär Hochwasserereignisse von Bedeutung. Die physikalische Simulation erfolgte somit auch für verschiedene stationäre Hochwasserjährlichkeiten, die in Tab. 2 für das Projektgebiet angegeben sind.

Jährlichkeit des Abflussereignisses	Abfluss (m^3/s)
1	270
10	550
30	680
100	830

Tab. 2: Untersuchte Hochwasserjährlichkeiten

Die stationäre Simulation stellt ein „worst case“ Szenario der Geschiebebetrachtung dar.

Im numerischen Modellversuch wurden die mittels Modellgesetze ermittelten Abflusswerte des physikalischen Modellversuchs verwendet (siehe Tab. 6).

3.4 Geschiebedaten

Für die physikalische Geschiebetransportsimulation wurde ein Korndurchmesser gewählt, der bei allen Durchflüssen als Geschiebe transportiert wird. Bei der Beschaffung entsprechender Sande ist man an handelsübliche Größen angewiesen. Eine weitere Anforderung an das transportierte Material sollte eine eindeutige farbliche Abgrenzung

gegenüber seinem Hintergrund sein, um eine eindeutige Identifizierung auf Fotos zu gewährleisten. Gewählt wurde letztlich ein schwarzer Basaltsand mit einem Durchmesser von 1 mm bis 3 mm.

Besonders im Nebenarm kann der Basaltsand im Gegensatz zu der hellen Betonoberfläche klar abgegrenzt werden (Abb. 14).



Abb. 18: Aufnahme des Einlaufbereiches nach einem HQ1 Versuch mit Basaltsand

4. Anwendung

4.1 Physikalischer Modellversuch

Eine detaillierte Beschreibung des physikalischen Modellversuchs sowie Variantenuntersuchungen wurden von KOLOSEUS (2008) durchgeführt. Auf einzelne, für das numerische Modell relevante Bereiche wird in den folgenden Unterkapiteln eingegangen.

4.1.1 Aufbau und Durchführung

Die Modelloberfläche wurde durch eine Betonmischung hergestellt, dessen Form durch Querprofile vorgegeben wurde. Die Anordnung der Querprofile erfolgte in Abständen von 50 cm, die auch in den Fotos noch ersichtlich sind (Abb. 18), wodurch eine eindeutige Zuordnung zu den Querprofilen im numerischen Modell gegeben ist.



Abb. 19: Versuchsanordnung des physikalischen Modells. Links im Naturzustand für die Kalibrierung. Rechts im Detail der Einlaufbereich des eingebauten Nebenarmes

Für die Simulation der Flussrauhigkeit wurde eine 5 bis 8 cm starke Kiessohle mit einem Korndurchmesser von 16 bis 32 mm aufgebracht. Diese Sohle wurde im Zuge der Versuche

nur geringfügig durch Erosion verändert und vor jedem neuen Versuch wieder in den definierten Ausgangszustand gebracht.

In Abb. 19 sind die einzelnen Elemente des Einlaufbereichs in den Nebenarm dargestellt. Der Sohlgurt wird durch eine glatte Kunststoffwand modelliert. Er verursacht einen Sprung in der Sohle von etwa 3 bis 4 cm. Versuche haben gezeigt, dass dieser Sohlgurt für die gezielte Umlenkung des Geschiebes in den Nebenarm nicht notwendig ist, er jedoch zur Sohl- und Böschungssicherung angeordnet wurde. Ebenso wurden die Streichwehrwand und die Wände der Geschiebegasse mittels einer Kunststoffplatte modelliert und anschließend flächig ausbetoniert.

Die Versuchsdurchführung gliedert sich in einen Vorlauf und den Versuch. Während des Vorlaufes wird Sand solange zugegeben bis er den Sohlgurt erreicht. Ab diesem Zeitpunkt beginnt der Versuch mit jeweils einer Sandzugabe von 150 kg im trockenen Zustand. Die Sandzugabe erfolgt über eine Rüttelplatte, die entsprechend den unterschiedlichen Durchflüssen kalibriert ist.

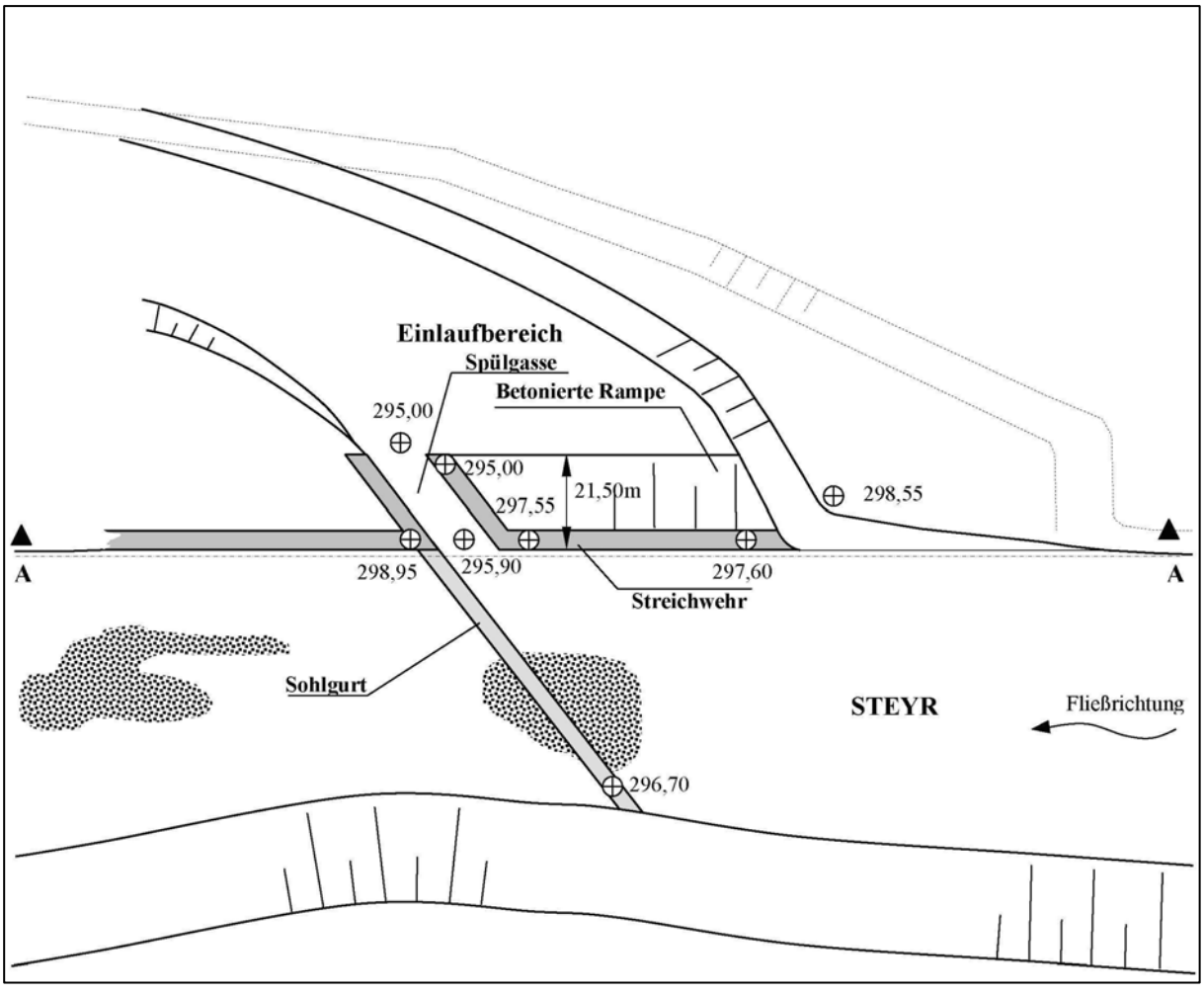


Abb. 20: Elemente des Einlaufbereiches in den Nebenarm in Naturmaßen

Nach vollständiger Zugabe wird der Durchfluss langsam abgesenkt um keine Veränderungen in den abgelagerten Sandformationen zu verursachen. Zur Auswertung wurde der abgelagerte Sand im Nebenarm getrocknet und abgewogen.

4.1.2 Versuchsergebnisse

Eine ausführliche Analyse und Beschreibung von unterschiedlichen Szenarien ist unter KOLOSEUS (2008) nachzulesen. Die Auswertung der optimalen Variante erfolgte durch Ermittlung von Wirkungsgraden, bei denen die abgelagerte Sandmenge in Relation zu der zugegebenen Menge gestellt wurde. Die Ergebnisse der optimalen Variante sind in Tab. 3 zusammengefasst, mit einem mittleren Wirkungsgrad $\overline{X}$ – das arithmetische Mittel der Wirksamkeiten HQ1 bis HQ100 - von 80,0 % der Geschiebefalle.

	HQ1	HQ10	HQ30	HQ100	$\overline{X}$	
Wirksamkeit:	76,0	85,0	84,0	75,0	80,0	%

Tab. 3: Vergleich der Wirksamkeiten der optimalen Variante des physikalischen Modells (KOLOSEUS, 2008)

4.2 Numerisches Modell

4.2.1 Diskretisierung des Laborgerinnes

Die Erstellung des dreidimensionalen Berechnungsnetzes erfolgt auf Basis des digitalen Höhenmodells (DHM) mit einer Verdichtung vor allem im Flussschlauch durch die Profildaten. Der Aufbau erfolgt, getrennt für den Flussschlauch und das Vorland, vorerst in Naturgrößen.

In einem ersten Schritt wird aus den Profildaten ein regelmäßiges Rechtecksnetz für den Fluss erzeugt. Hierfür wurden Querprofilaufnahmen aus dem DHM mit Profilabständen von bis zu 100 m verwendet, die über das Projektgebiet hinausgehen und zusätzlich 30 Querprofile im Projektsgebiet.

Darauf folgend wurden die einzelnen Punkte vermascht. Um eine möglichst korrekte und genaue Berechnung zu gewährleisten sind die Elemente in Strömungsrichtung mit einem Seitenverhältnis von 1:3 angeordnet. Im Fall der Steyr mit einem benetzen Umfang von ca. 70 m wurden Elementgrößen von 5 m Breite und 15 m Länge gewählt.

Im numerische Netz wurden der Zu- und Auslaufrand außerhalb der Grenzen des physikalischen Modells gesetzt, mit einer einheitlichen Rechtecks – Vermaschung, um konstante Randbedingungen zu erreicht. Das bedeutet, dass das numerische Modellgebiet etwas größer als das physikalische ist.

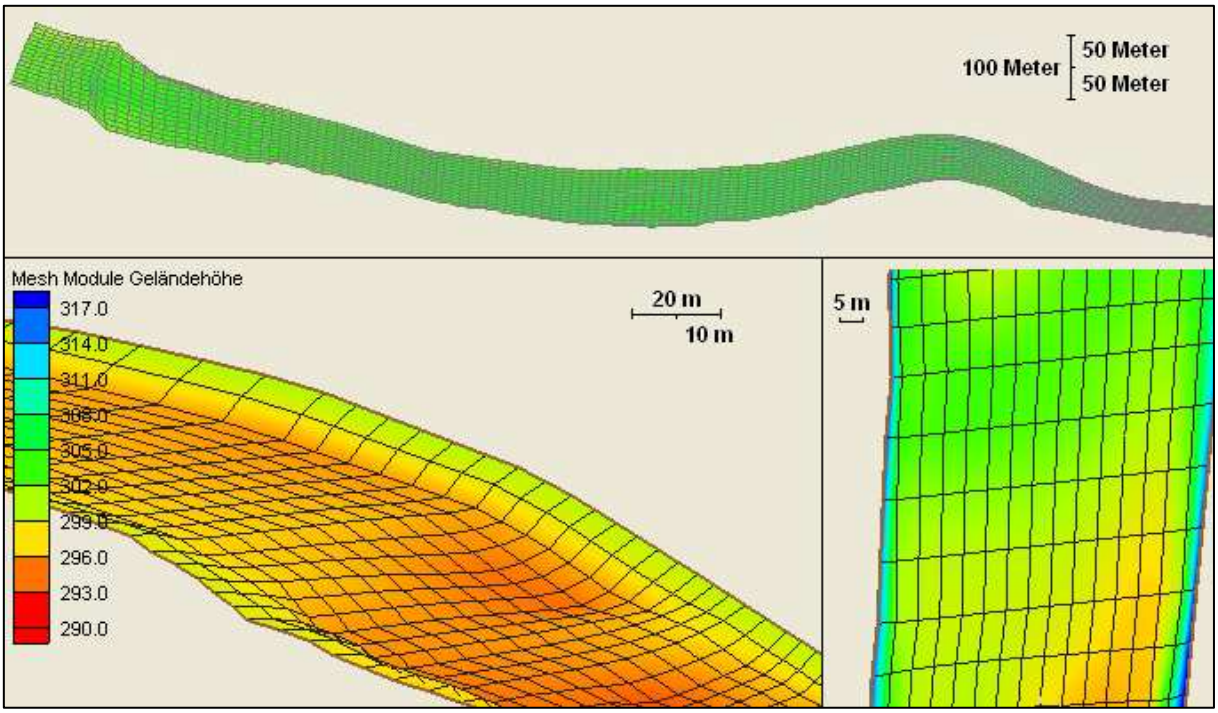


Abb. 21: Flussschlauch ohne Nebengerinne mit einer Rechtecksvermaschung. Oben der gesamte Flussschlauch. Unten Detailausschnitte aus dem Flussnetz.

Als zweiter Schritt wurde aus dem Höhenmodell mittels Triangulation das Vorlandnetz generiert. Die Dreiecksvermaschung erlaubt im Vorland eine bessere Anpassung an die topographischen Gegebenheiten. Anschließend wurde das Netz entsprechend den Anforderungen des physikalischen Modells ausgedünnt mit besonderem Augenmerk auf hydraulisch relevante Bruchkanten.

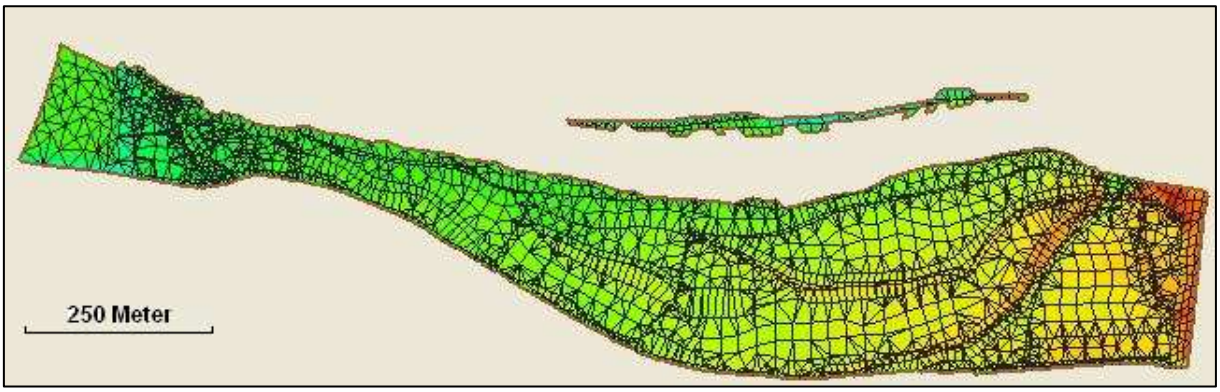


Abb. 22: Vorlandnetz mit einer Dreiecksvermaschung ohne Flussschlauch. Farbliche Abstufung aufgrund der Geländehöhe.

Durch Zusammenfügen der beiden Bereiche entstand ein Berechnungsnetz mit 5.077 Elementknoten und 6.440 Dreiecks- und Rechteckselementen.

Die Qualität des Berechnungsnetzes wurde anhand der in Tabelle 4 erläuterten Kriterien überprüft, wobei zwischen dem Netz in der Flusssohle und dem Vorland unterschieden wird. Besonders im Flussschlauch muss das Berechnungsnetz die Qualitätskriterien erfüllen.

Kriterium	Parameter	Fluss	Vorland
Minimaler innerer Elementenwinkel	5	keine	keine
Maximaler innerer Elementenwinkel	160	keine	vereinzelt
Verknüpfte Elemente an einem Knoten	10	keine	einmal
Änderung der benachbarten Elementgröße	0,05	keine	keine

Tab. 4: Qualitätskriterien des 2d-Berechnungsnetzes gemäß HYDRO_AS-2D Kriterien

Die vereinzelte Überschreitung der Kriterien des maximalen inneren Elementenwinkels und der verknüpften Elemente außerhalb des Flussschlaues ist vernachlässigbar und stellt für das Berechnungsmodul kein Problem dar.

Als letzter Schritt der Erstellung des Berechnungsnetzes erfolgte eine Transformation in Modellgrößen. In Tabelle 5 sind die Werte aufgelistet, anhand derer das Netz skaliert wurde.

	Maßstab	Skalierfaktor
x-, y-Koordinaten	1:80	0,0125
z-Koordinaten	1:26,67	0,0375

Tab. 5: Maßstab und Skalierfaktoren von Natur- auf Modellgrößen

Das Berechnungsnetz weist somit eine Länge von 22 m auf, entsprechend dem physikalischen Modell mit 17 m plus einer Erweiterung des Ein- und Auslaufesbereiches um 5 m. Die Variabilität der Modellbreite reicht von 2 m bis zu 4,7 m.

4.2.2 Sohlfixierung

Im numerischen Modell wird die gesamte Sohle als nicht bewegliche Sohle ausgebildet, im Gegensatz zum physikalischen Modell. Die Fixierung erfolgt durch die Datei DZG_Layer-1.dat, mittels der die mögliche Erosionsschicht in jedem Netzelement fesgelegt werden kann. Im numerischen Modell wurde der gesamte DZG_Layer-1 auf 0 gesetzt.

Durch diese Einstellung können nur Sedimentationsprozesse berücksichtigt werden. Das entspricht dem physikalischen Modell, in dem der Nebenarm als betonierte Sohle

ausgebildet ist. Die bewegliche Sohle des Hauptgerinnes im physikalischen Modell kann vernachlässigt werden, da es nur zu geringen Änderungen der Sohle im physikalischen Modell kommt. Andererseits ist eine Abbildung des größeren Sohlmaterials in der derzeitigen Version von HYDRO_GS-2D nicht möglich, da derzeit nur eine Kornfraktion unterstützt wird.

In ersten Versuchen wurde die bewegliche Sohle, eine etwa 5 cm starke Kiesschicht, im Hauptfluss mit der gleichen Kornfraktion wie das transportierte Geschiebe, d.h. mit einem d_m von 2 mm, modelliert.

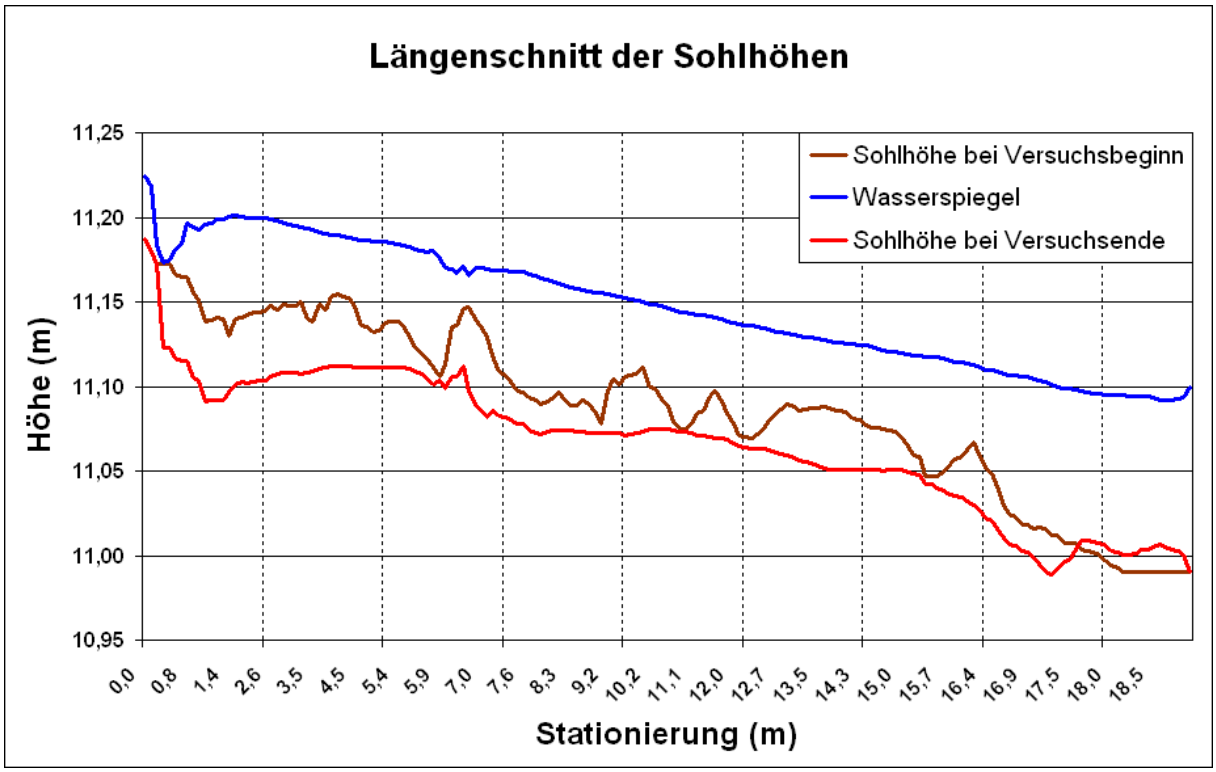


Abb. 23: Darstellung der Sohlhöhen in einem Längenschnitt nach einem HQ30 Kalibrierungslauf.

In Abbildung 23 ist ersichtlich, dass der gesamte Sohlbereich nach der Versuchsdurchführung wegerodiert wurde. Daher wurde die Sohle im Unterschied zum physikalischen Modell auch im Hauptfluss fixiert. Diese Fixierung wiederum entspricht aufgrund des größeren Korndurchmessers sehr gut dem physikalischen Modellversuch.

4.2.3 Kalibrierung und Validierung

Für die Kalibrierung des Netzes müssen den Netzelementen Rauhigkeiten in Form des unter Kapitel 2.10.2 genannten Ripple-Faktors μ zugeordnet werden. Für den Sohlanteil können im physikalischen Modell vier Bereiche unterschieden werden:

- der Flussschlauch, der aus einer beweglichen Kiesschicht besteht
- landwirtschaftliche Flächen, in Form einer Betonoberfläche mit Kunstharzanstrich,
- forstwirtschaftliche Fläche, ebenfalls mit einer betonierten Oberfläche, Kunstharzanstrich und unregelmäßig aufgeklebten Steinen und
- dem Einlaufbereich, der aus einer Wanne mit Kunststofffolie besteht.

Für Beton und Kiesoberflächen ist in der Literatur (SCHRÖDER & ZANKE, 1994) eine Reihe von Wertebereichen zu finden. Für den Kornanteil im Ripple-Faktor μ wurde Gleichung 2.20 herangezogen.

Die Kalibrierung sowie die Validierung erfolgten nur für Hochwasserereignisse, da nur in diesen Fällen bedeutende Geschiebemengen transportiert werden. Die Kalibrierung erfolgte für ein HQ10 Ereignis und die Validierung anhand von HQ1, HQ30 und HQ100 Ereignissen. In der Tabelle 6 sind die Durchflüsse genannter Jährlichkeiten dargestellt.

	Abfluss			Typ
	Natur	Modell	Modell	
	[m³/s]	[l/s]	[m³/s]	
HQ1	270	24,5	0,0245	Validierung
HQ10	550	49,9	0,0499	Kalibrierung
HQ30	680	61,7	0,0617	Validierung
HQ100	830	75,3	0,0753	Validierung

Tab. 6: Übersicht Kalibrierungs- und Validierungsversuche

Im Rahmen der Kalibrierung wurden die in Tabelle 7 gelisteten Werte ermittelt. Die Berechnungsläufe wurden stationär nur für die Strömung berechnet, d.h. ohne eine Geschiebezugabe. Die Kalibrierung und Validierung erfolgte daher in gleicher Weise wie der physikalische Modellversuch an vier Pegelpunkten.

Für die Vorlandrauhigkeiten wurde jeweils ein Ripple-Faktor μ Verhältnis von eins gewählt, was einer ebenen Oberfläche entspricht. Im Unterschied zu einem Wert von 0,5 der hohen Sohlwellen, etwa Dünen, entspricht (VISCHER, HUBER, 2002).

Eine Unterscheidung zwischen den beiden Betonoberflächen, einmal mit und einmal ohne aufgeklebte Rauigkeitssteine, wurde vernachlässigt, da deren hydraulische Wirkung nur geringen Einfluss auf Geschiebetransporttätigkeit im Flussschlauch hat.

Kalibrierung – HQ10			
Rauhigkeits-bereich	Formanteil k_{St}	Kornreibungs-anteil k'_{St}	Ripple Faktor $\mu = \left(\frac{k_{St}}{k'_{St}}\right)^{3/2}$
Beton	65	65	1
Kies	50	60	0,76
Einlauf – Glatte Oberfläche (Kunststoff)	110	110	1

Tab. 7: Übersicht über Ergebnisse der stationären Kalibrierung

Die Wasserstände bei den Pegelpunkten der numerischen Berechnungen wurden den Pegelhöhen des physikalischen Modellversuchs in einem Längenschnitt gegenübergestellt. In den Abb. 24 ist ersichtlich, dass die Unterschiede in der Wasserspiegellage an den Pegelpunkten jeweils unter einem Zentimeter liegen. Dabei entspricht ein Zentimeter im Modell einem Wert von 26,7 Zentimeter in der Natur.

Tabelle 8 zeigt den statistischen Mittelwert und deren Standardabweichung der Differenzen der einzelnen Pegelpunkte. Dabei ist ersichtlich, dass die Abweichung mit steigender Durchflussmenge leicht ansteigt. Diese Zunahme entspricht der Messgenauigkeit, da es bei größeren Abflussmengen zu Schwankungen bis zu einem Zentimeter an den Pegeleinrichtungen kam.

Modellhöhen (m)	Mittelwert	Standardabweichung
HQ1	0,002	0,002
HQ10	0,002	0,004
HQ30	-0,001	0,004
HQ100	-0,004	0,005

Tab. 8: Mittelwert und Standardabweichung der Höhendifferenzen an allen vier Pegeln im Modell (in Meter)

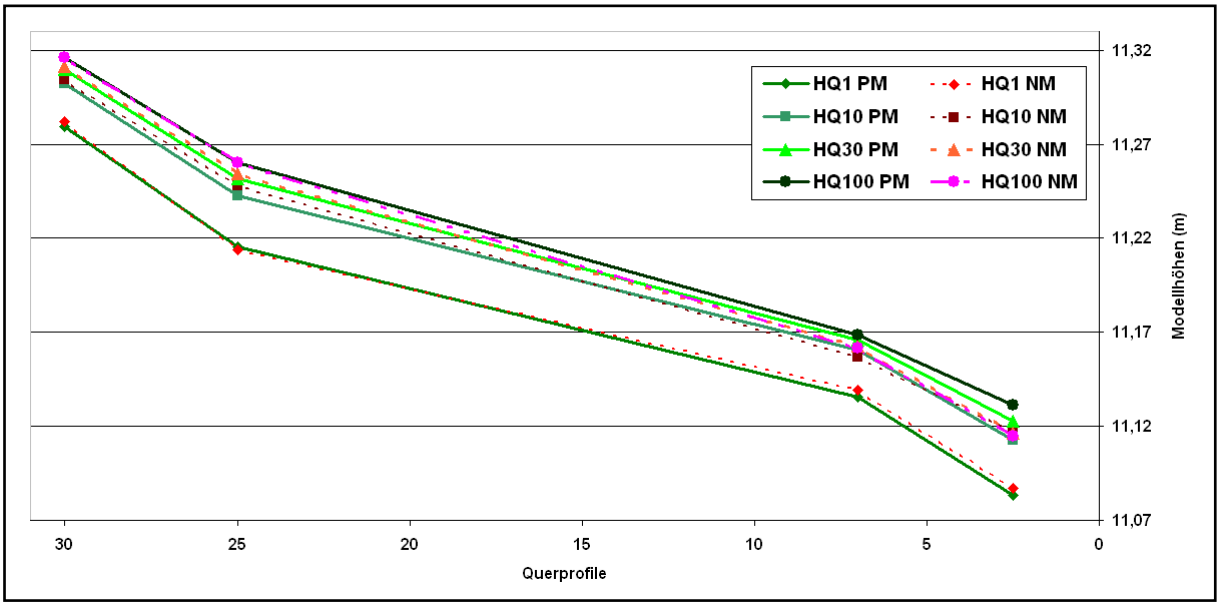


Abb. 24: Darstellung der physikalischen und numerischen Kalibrierungsläufe

Dadurch konnten die gewählten Modellparameter der HQ10 Kalibrierung, durch die Versuche HQ1, HQ30 und HQ100 verifiziert werden.

4.2.4 Einbau der Geschiebefalle

Der Nebenarm wurde zuerst als eigenes Netz anhand von Querprofilen mit einer Rechtecksvermaschung hergestellt (Abbildung 25).

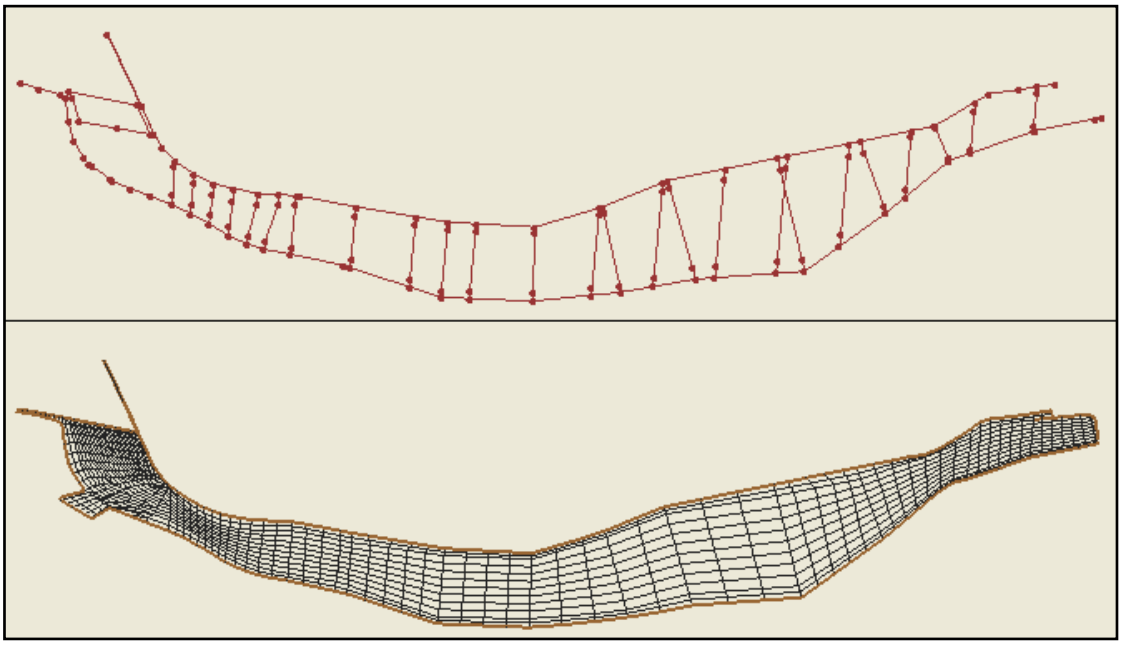


Abb. 25: Entstehung der Rechtecksvermaschung des Nebenarmes aus Querprofilen

Hinzugefügt wurde:

- der Nebenarm,
- ein Streichwehr,
- eine Rampe von der Streichwehroberkante hin zur Nebenarmsohle,
- eine Geschiebegasse und
- eine Sohlstufe im Hauptgerinne.

Die Integration in das bestehende Netz erfolgte durch Ausstechen der Nebenarmfläche mittels eines Polygons, worin der Nebenarm eingefügt wurde. Durch diese Anbindung musste ebenso das Hauptgerinne in den Ein- und Auslaufbereichen, vor allem durch die Sohlstufe angepasst werden. Da es sich bei der Nebenarmsohle ebenfalls um eine betonierte Oberfläche handelt wurde der Ripple-Faktor μ analog zu der restlichen Betonfläche mit 65/65 festgelegt.

Besonders im Einlaufbereich in den Nebenarm kommt es durch das Streichwehr und die Geschiebegasse zu komplexen, turbulenten Strömungsvorgängen. Um diese numerisch besser zu erfassen wurde der Grad der räumlichen Diskretisierung erhöht. Dazu wurde, wie in Abb. 26 dargestellt, im Einlaufbereich die Anzahl der Elemente nahezu vervierfacht.

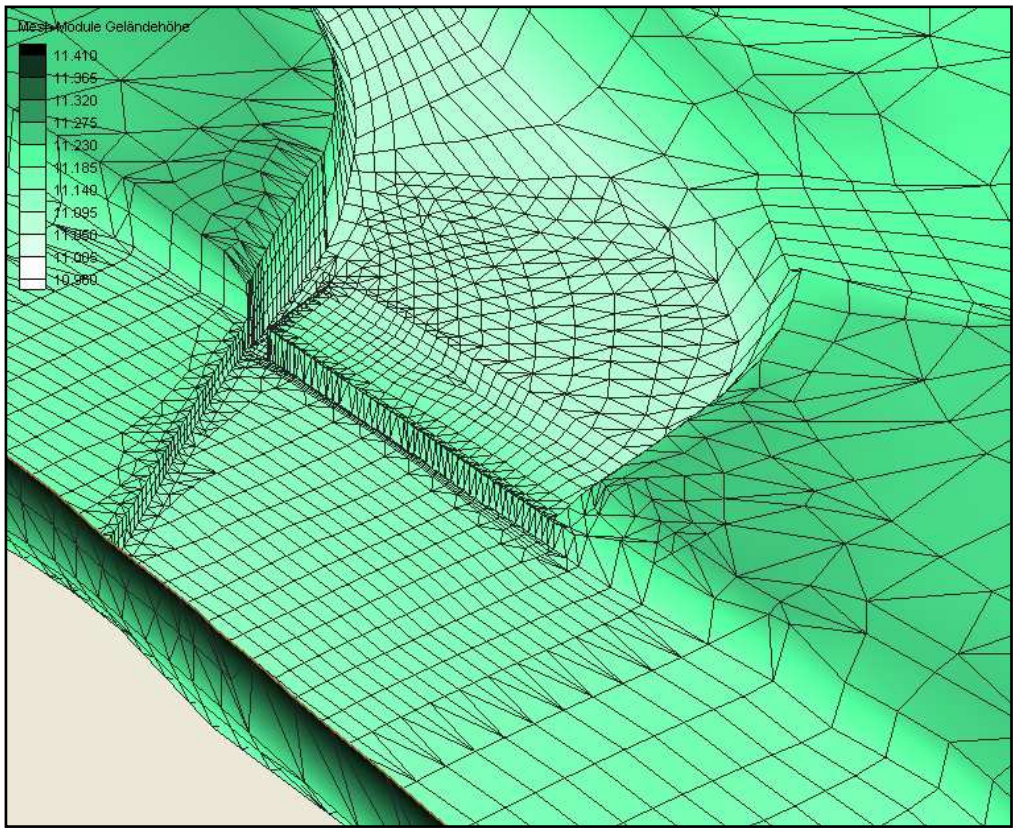


Abb. 26: Detail des Einlaufes in den Nebenarm mit Streichwehr und Geschiebegasse. Farbliche Abstufung entsprechend der Geländehöhe.

4.2.5 Ausformung des Modelleinlaufbereichs

Eine besondere Herausforderung stellte die passende Ausformung des Einlaufbereiches dar. Im Zuge der Kalibrierung und ersten Versuchen mit Geschiebezugabe musste dieser mehrmals angepasst werden. In ersten Versuchen wurde der Einlauf ähnlich dem physikalischen Modell nachmodelliert (Abbildung 28). Wie in Abbildung 27 dargestellt erfolgt die Geschiebezugabe im physikalischen Modell allerdings getrennt von der Wasserzugabe, d.h. nach dem Einlaufbecken.



Abb. 27: Einlaufbereich des physikalischen Modells. Links: Draufsicht Einlaufbecken und Geschiebezugabe. Rechts: Ansicht der Geschiebezugabe mittels Rüttelplatte.

Im numerischen Modell ist diese Trennung nicht möglich, Geschiebe- und Wasserzugabe erfolgen in einem Nodestring, am Modellrand. Die Form der Ausbildung hatte daher zur Folge, dass sich erst große Sandmengen im Einlauf ablagerten, was wiederum sehr lange Berechnungszeiten verursachte.

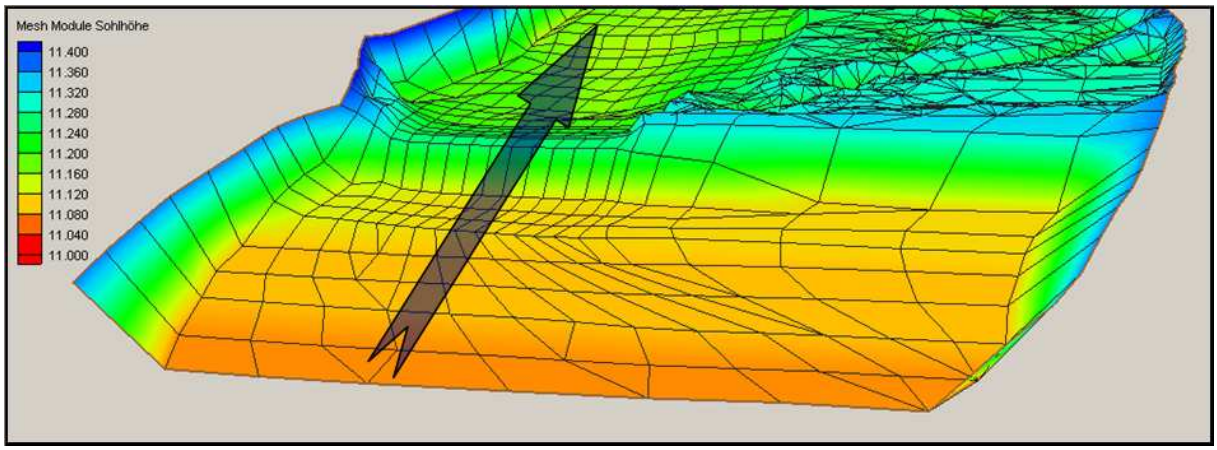


Abb. 28: Darstellung des Einlaufbereichs in der ersten Variante mit tiefer Sohle (Pfeil stellt Fließrichtung dar)

In einem nächsten Schritt wurde versucht, die Sohle anzuheben, auf das Niveau, der Flusssohle. Im Querprofil erfolgte ebenfalls eine Höhenzonierung mit Gefälle zum linksufrigen Einlaufbereich (Abb. 29).

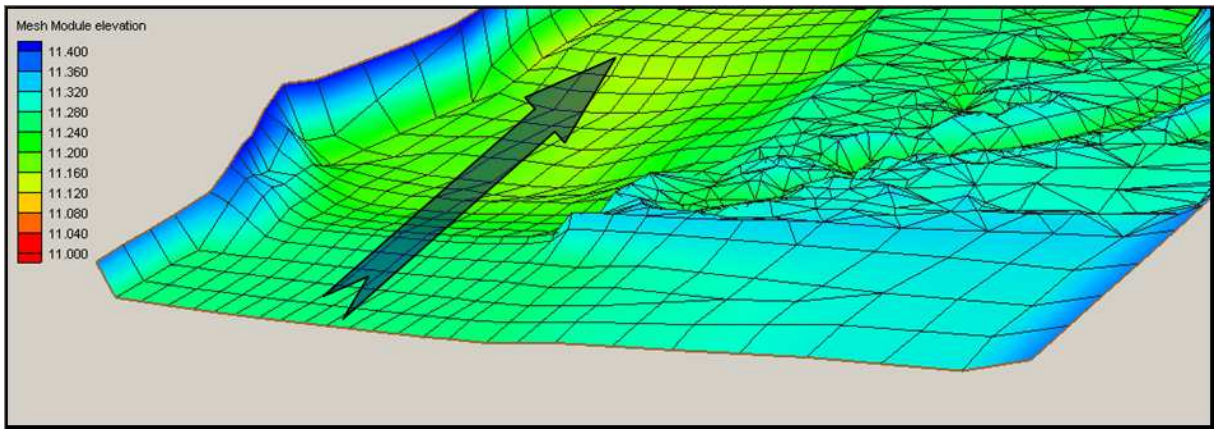


Abb. 29: Darstellung des Einlaufbereichs mit erhöhter Sohle (Pfeil stellt Fließrichtung dar)

Durch die Erhöhung der Sohle kommt es in der rechten Zulaufhälfte zu Ablagerungen und der gesamte Durchfluss konzentriert sich auf den linken Einlaufbereich. Die entsprechenden Strömungsvektoren sind in Abb. 31 dargestellt.

In einem weiteren Optimierungsschritt wurde der Einlaufbereich verlängert und der rechte Teil von Beginn an erhöht und zugespitzt (Abb. 30). Diese Variante führte zu schlechteren Ergebnissen. Der Nodestring war über die gesamte Einlaufbreite ausgebildet. Die Geschiebeberechnung führte zu Erosionen und keinen sinnvollen Ergebnissen.

Der endgültige Einlaufbereich für die Durchführung der Geschiebeberechnungen wurde gemäß Abb. 29 gewählt, da sich die Strömung und auch die Geschiebeablagerungen zu Beginn des Projektgebiets korrekt, gemäß dem physikalischen Modellversuch einstellen.

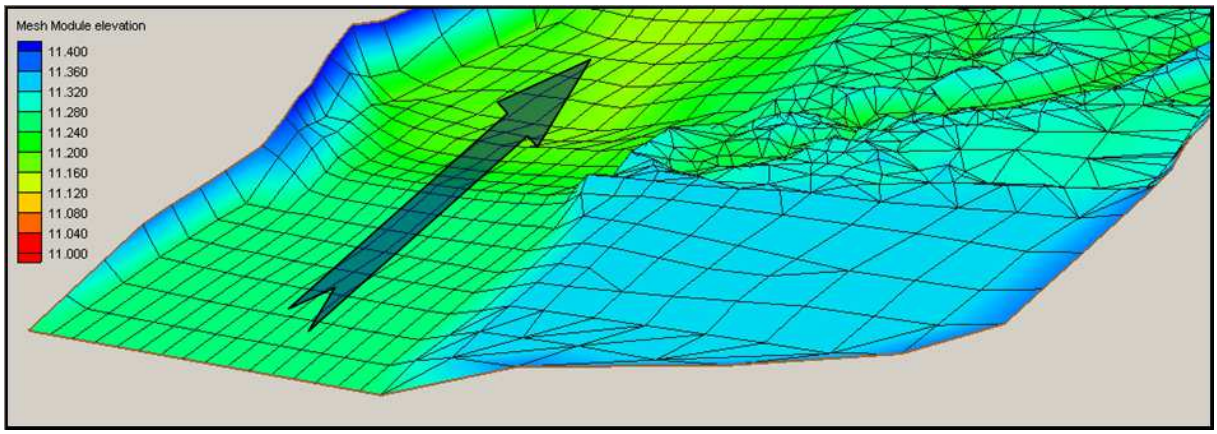


Abb. 30: Darstellung des Einlaufbereichs in der ersten Variante mit tiefer Sohle (Pfeil stellt Fließrichtung dar)

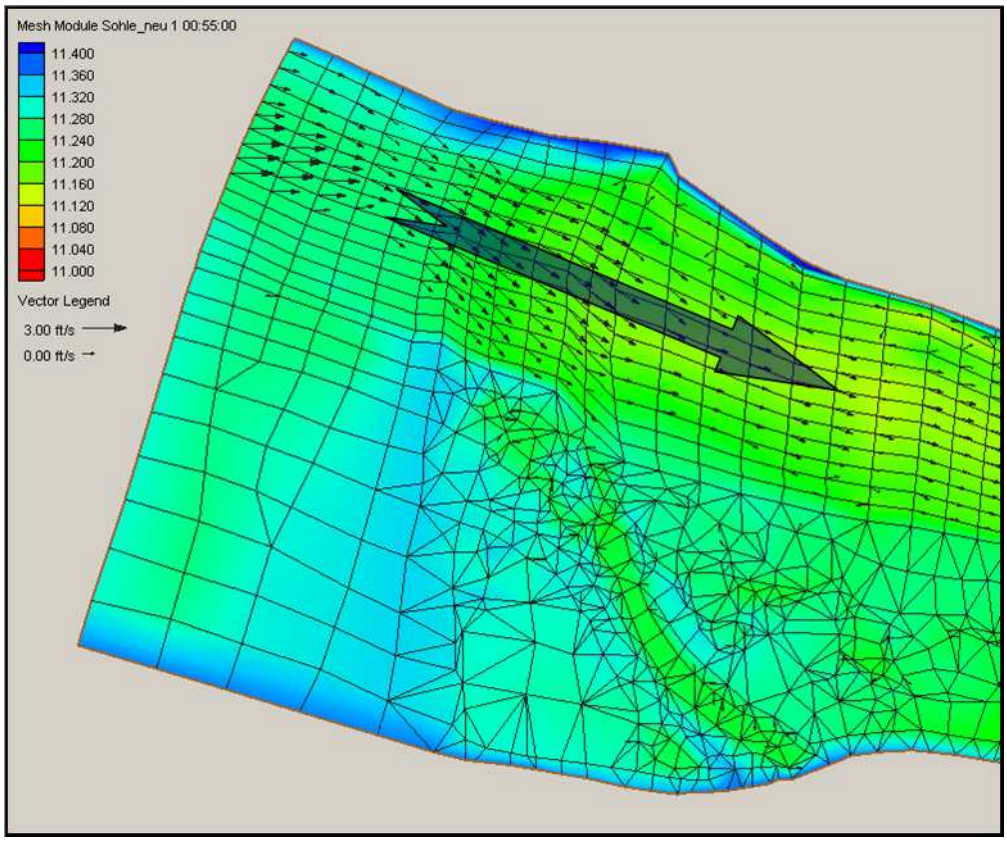


Abb. 31: Darstellung der Strömungsvektoren im Einlaufbereich mit erhöhter Sohle (Pfeil stellt Fließrichtung dar)

5. Ergebnisse

5.1 Einführung

Anhand der eingangs definierten Indikatoren:

- Lagemäßige Verteilung der Ablagerungen
- Höhenmäßige Veränderungen in Querprofilen
- Wirkungsgrad der Geschiebefalle

sollen die einzelnen Berechnungsläufe des physikalischen und numerischen Modells gegenübergestellt werden. Der Abfluss in beiden Modellen ist ein stationärer Vorgang, der Geschiebetransport ist hingegen instationär.

Eine Versuchsreihe ist zweistufig, gleich der physikalischen Versuchsanordnung, aufgebaut. In einem ersten Schritt, dem so genannten Vorlauf, erfolgt eine Geschiebezugabe bis zum Einlaufbereich des Nebenarmes. Anschließend beginnt die eigentliche Versuchsdurchführung mit einer Geschiebezugabemenge von jeweils 150 kg.

Die Geschiebezugabe erfolgt dabei in Abhängigkeit der Abflussmenge, welche beginnend mit 0 kg einen instationären Anstieg aufweist. Die numerische Versuchsdurchführung ist somit auch im Anlaufverhalten dem physikalischen Modellversuch ähnlich.

	Abfluss			Massen-konzentration	Geschiebefracht		
	Natur	Modell	Modell		Natur	Modell	Modell
	[m³/s]	[l/s]	[m³/s]	[%]	[t/s]	[g/s]	[kg/s]
HQ1	270	24,5	0,025	0,0420	0,113	10,298	0,0103
HQ10	550	49,9	0,050	0,0565	0,311	28,225	0,0282
HQ30	680	61,7	0,062	0,0629	0,428	38,832	0,0388
HQ100	830	75,3	0,075	0,0692	0,574	52,131	0,0521

Tab. 9: Übersicht über die zugegebenen Geschiebemengen

In Tab. 9 sind die Werte der Zulaufrandbedingung dargestellt. Im physikalischen Modell erfolgte die Steuerung des Zuflusses mittels Pumpen und die Geschiebezugabe wurde über eine Rüttelplatte geregelt. Um den kalibrierten Wasserstand am Auslauf zu erreichen wurden regelbare Klappen eingebaut. Im numerischen Modell erfolgt die Definition der

Randbedingungen durch Zuweisen von Boundary Conditions zu Nodestrings. Der Zulauf wird dabei ähnlich dem physikalischen Modell, mittels einer Zuflussganglinie sowohl für Wasser als auch Geschiebe am Zulauf-Nodestring festgelegt. Die Festlegung der Auslaufrandbedingung erfolgte über das Energieliniengefälle, das aus dem mittleren Wasserspiegelgefälle in Strömungsrichtung mit 2,2 ‰ abgeschätzt wurde und im Zuge der Kalibrierung bestätigt.

Die Versuche wurden alle mit einem einheitlichen Parametersatz durchgeführt, der in Tab. 10 dargestellt ist. Die Werte entsprechen zum Teil der Standardeinstellung von HYDRO_GS-2D oder wurden speziell für den Modellversuch angepasst.

Parameter	Wert	Beschreibung
Hmin (m)	0,001	Minimale Wassertiefe
VELMAX (m/s)	3,0	Maximale erlaubte Fließgeschwindigkeit
Amin (m²)	0,002	Minimale erlaubte Elementgröße
CMUVISC	0,6	Koeffizient c_μ in der Formel der Viskosität
RHO_s (kg/m³)	2650	Dichte des Sediments ρ_s
Porosität	0,37	Luftanteil im Bettsediment n_p
d_m (m)	0,002	Maßgebender Korndurchmesser
Theta_cr	0,0467	Kritischer Shieldsparameter Θ_{cr}
c_MP	6,0	Koeffizient c_{MP} aus der Meyer-Peter Müller Gleichung
CF_Quergefälle	0,0	Koeffizient in der Formel für die Sohlneigung
A_r	7,0	Koeffizient A in der Formel für die Flusskrümmung
SCFG	1,0	Skalierfaktor zur Beschleunigung der Berechnung
DZ_max (m)	0,005	Maximale erlaubte Sohländerung während eines Zeitschitts
TAU_max (N/m²)	5,0	Maximale erlaubte Sohlschubspannung
Fi (°)	37,0	Innerer Reibungswinkel der wasser - benetzen Sohle
Gamma_cr (°)	37,0	Innerer Reibungswinkel der trockenen Sohle

Tab. 10: Verwendete Parameter für die numerischen Berechnungen

Der Wert Hmin mit 1 mm stellt die Wassertiefe für einen Punkt dar, ab der er für die Berechnung aktiv wird. Dieser Parameter wurde deshalb eingefügt, da es an der Grenze zwischen dem trockenen und dem unter Wasser stehenden Gelände stehenden oftmals zu Instabilitäten in der Berechnung kommt (NUJIC, 2007).

Die obere Grenze für Strömungsgeschwindigkeiten VELMAX im Modell stellt, ähnlich dem Hmin Wert, eine Sicherheitsschranke dar, die nicht zwingend gesetzt werden muss. Dadurch können unrealistische Werte gar nicht zugelassen werden.

Die Dichte des Sediments ρ_s wurde gemäß dem verwendeten Basaltsand eingesetzt, ebenso der verwendete Korndurchmesser.

Der kritische Shieldsparameter Θ_{cr} wurde gemäß dem SHIELDS-Diagramm (Abb. 8) mit dem voreingestellten Wert für kiesführende Flüsse belassen.

Der Skalierfaktor SCFG kann zu Beschleunigung der Berechnung herangezogen werden, es kann dadurch allerdings auch zu Ungenauigkeiten im Ergebnis kommen. Da die Berechnungszeit allerdings aufgrund der geringen Netzgröße nicht relevant ist, wurde der Wert mit 1 gesetzt, d.h. es kam zu keiner Beschleunigung der Berechnung und zu keinen Vereinfachungen oder Ungenauigkeiten.

Der Parameter DZ_max ist ebenfalls ein Sicherheitsparameter gegen Instabilitäten bei der Berechnung und ist ebenfalls an die Modellgegebenheiten angepasst.

In Analogie ist der Parameter TAU_max zu sehen, dessen Größe auch an Modellverhältnisse angepasst ist.

Der innere Reibungswinkel Fi fließt in die Berechnung der Sohlenneigung ein.

Der innere Reibungswinkel Gamma_cr wiederum dient zur Berücksichtigung eines Böschungskollapses. Ist der Böschungswinkel größer als der innere Reibungswinkel Gamma_cr kommt es zu einem Ausgleich um den Gleichgewichtszustand herzustellen, ein so genannter Böschungskollaps.

Der Amin Wert dient durch ein Prekonditionieren zu einer Verbesserung der Rechenzeit vor allem bei stationären Berechnungen. Die Amin Fläche stellt dabei die minimale in der Berechnung erlaubte Fläche eines Kontrollvolumen (Abb. 14) dar. Er bewirkt, dass die kleinsten Kontrollvolumina auf den Amin Wert angehoben werden und somit die Zeitschritte nicht zu klein werden. Durch die vergrößerten Kontrollvolumina wird jedoch ein größeres Retentionsvolumen, als durch die tatsächliche Größe der Kontrollvolumina vorhanden ist, vorgetäuscht. In den durchgeführten stationären Berechnungen ist dies aber ohne Auswirkung.

5.2 Versuch HQ1

Der Durchfluss von 0,0245 m³/s stellt einen bordvollen Abfluss dar. Das Flussprofil ist somit fast vollständig benetzt, es kommt jedoch noch zu keinen großflächigen Ausuferungen im Projektsgebiet.

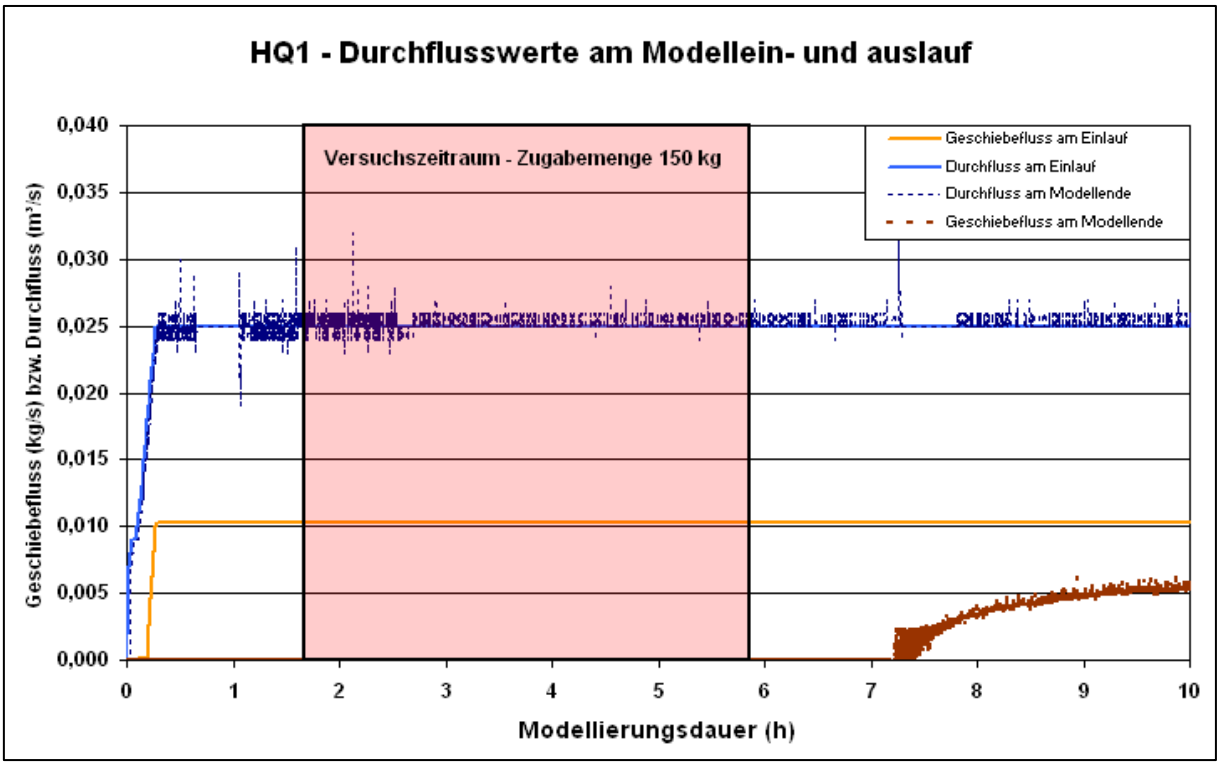


Abb. 32: Darstellungen des zeitlichen Ablaufes der Versuchsdurchführung mittels Ganglinien der Geschiebe- und Durchflussführung

Die gesamte Berechnungszeit beträgt inkl. Vorlauf 5 Stunden und 50 Minuten, die eigentliche Versuchdurchführung mit einer Zugabe von 150 kg umfasst einen Zeitraum von 4 Stunden und 10 Minuten mit einer Geschiebezugabe von 10,3 g/s.

Während der gesamten Versuchsdurchführung bewegt sich noch kein zugegebenes Geschiebe aus dem Modell raus. Der Geschiebeaustrag setzt erst bei etwas mehr als 7 Stunden ein.

5.2.1 Lagemäßige Verteilung der Ablagerungen

Im folgenden werden die einzelnen Stadien der Versuchsdurchführung in 25 Minuten Schritten mit einer Zugabe von je 15 kg dargestellt.

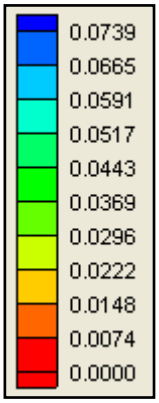
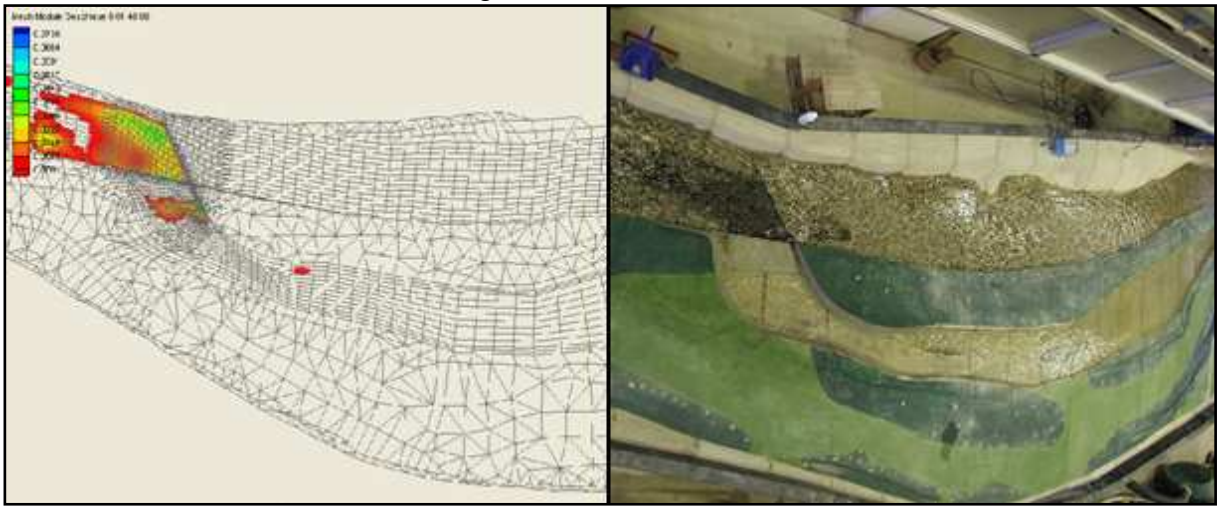


Abb. 33: Farbskala der Geschiebeablagerungshöhe in Metern.

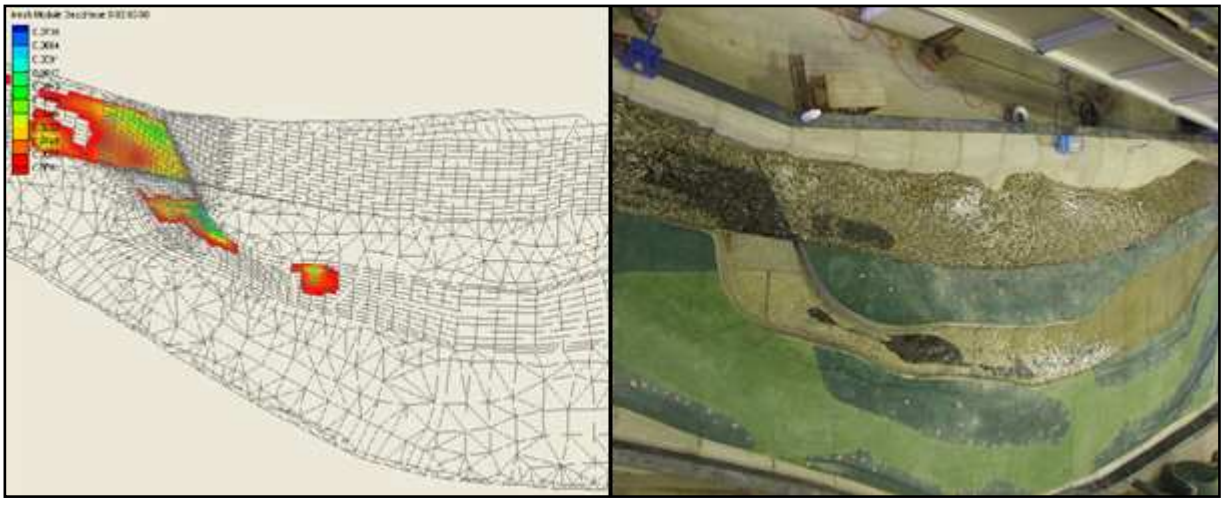
Die dargestellte 11-teilige Farbskala geht von 0 cm bis zu einer maximalen Ablagerungshöhe von 7,4 cm.
Alle folgenden Geschiebeablagerungbilder entsprechen dieser Skala.

Abb. 34: Darstellungsserie der Ablagerungen im Lageplan für den HQ1 Versuch

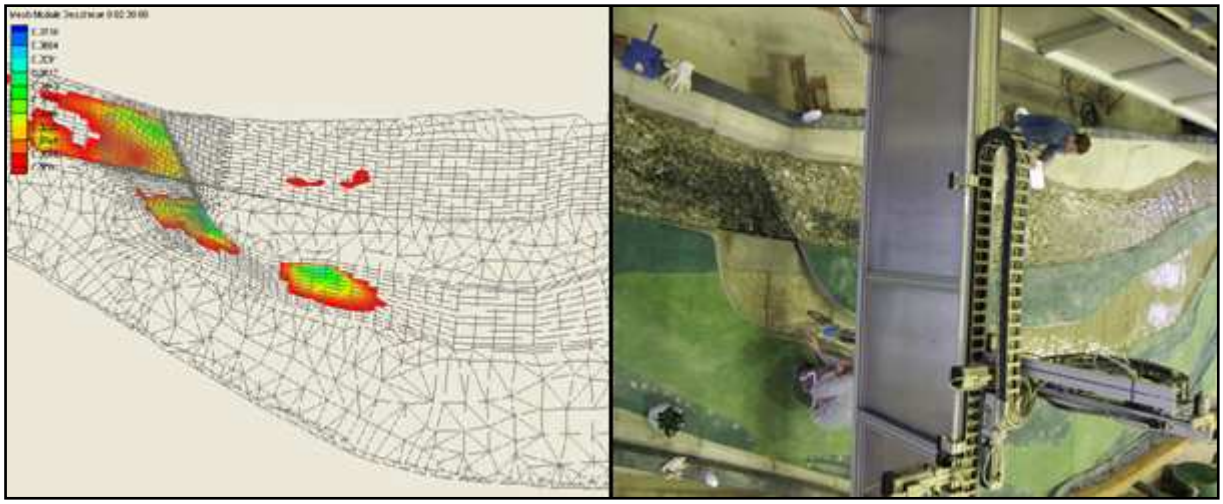
Zeit 0:00 Geschiebe 0 kg



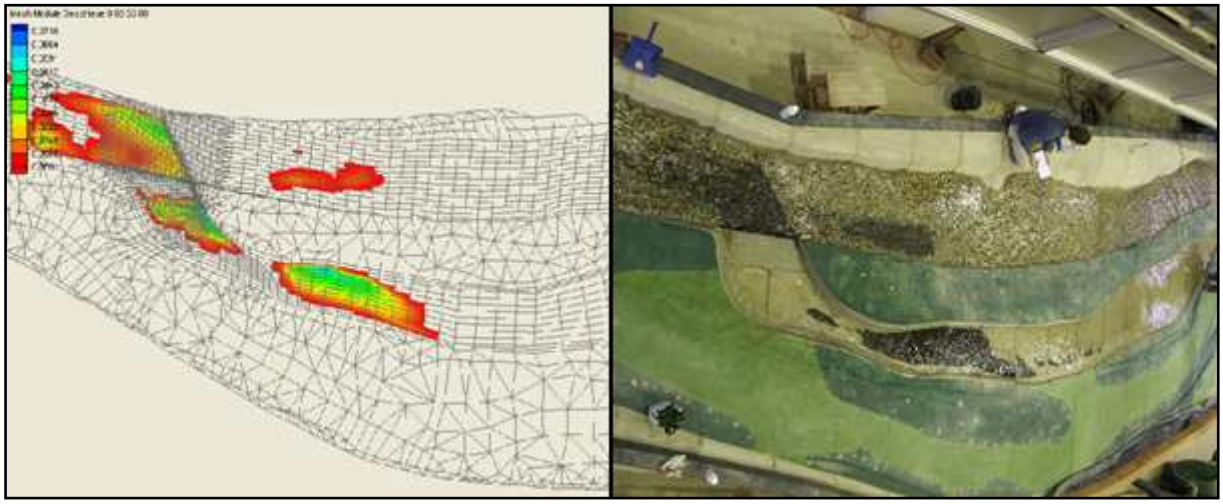
Zeit 0:25 Geschiebe 15 kg



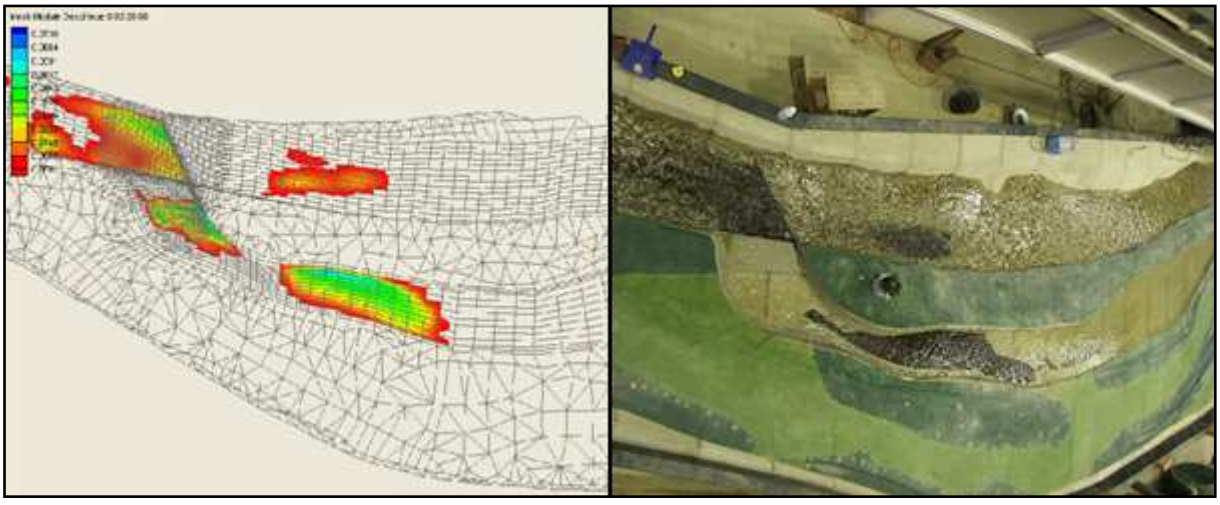
Zeit 0:50 Geschiebe 30 kg



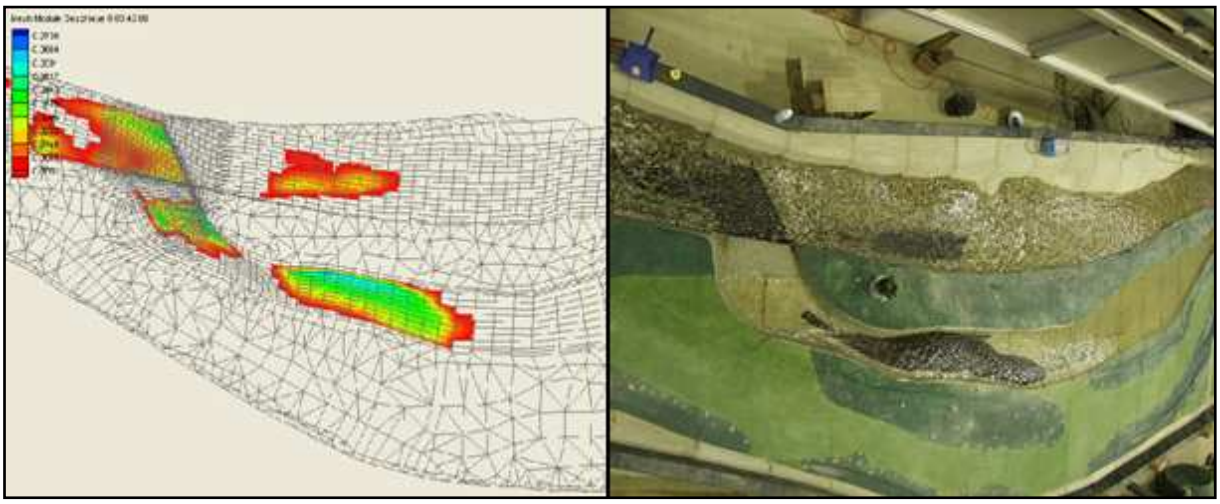
Zeit 1:15 Geschiebe 45 kg



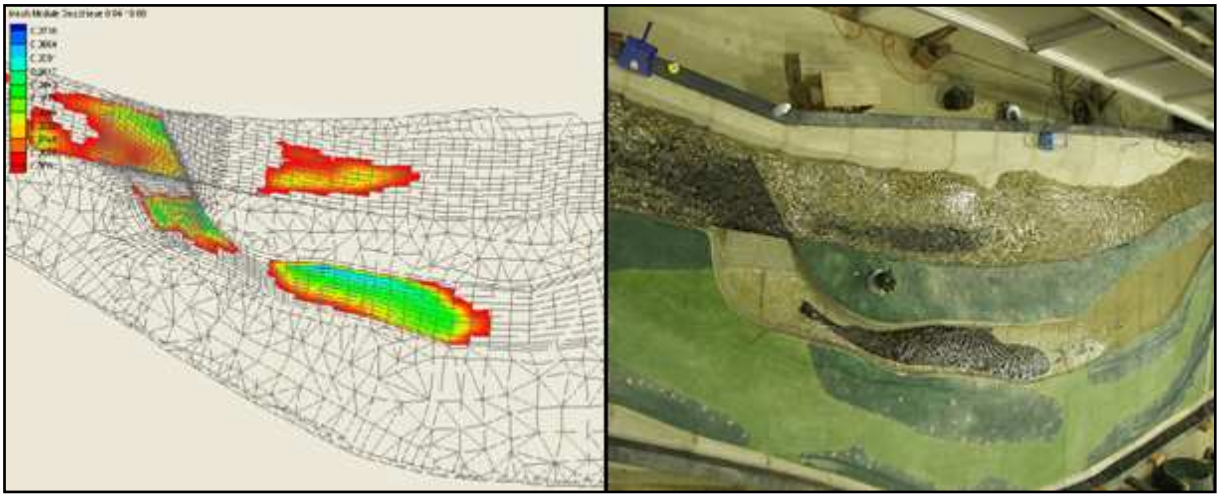
Zeit 1:40 Geschiebe 60 kg



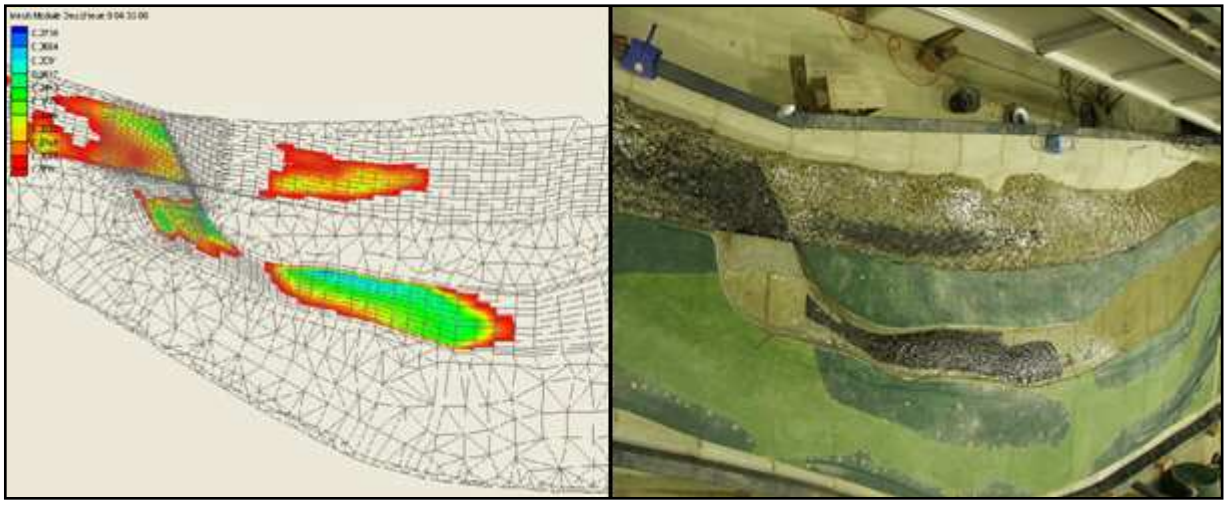
Zeit 2:05 Geschiebe 75 kg



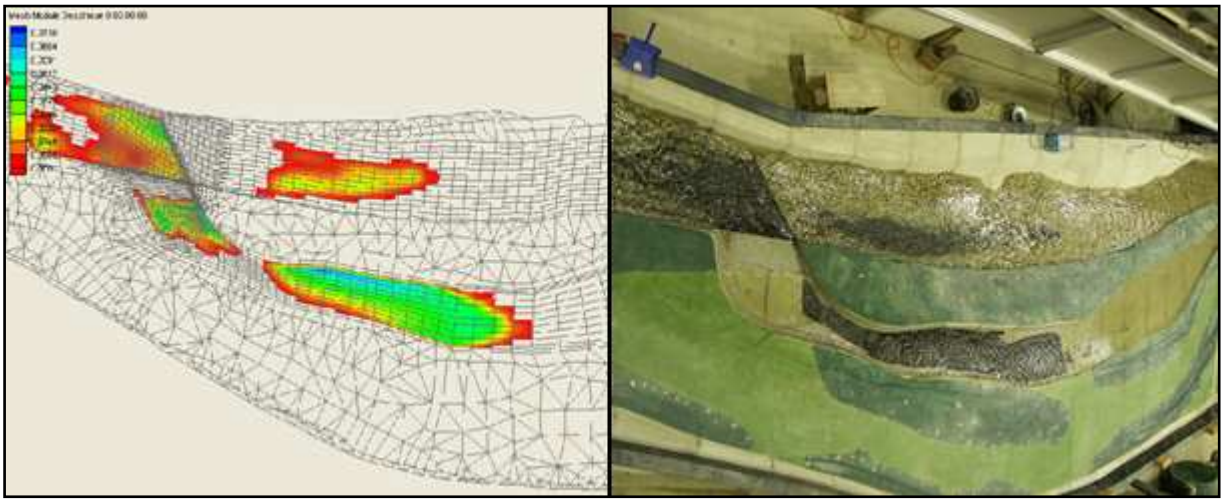
Zeit 2:30 Geschiebe 90 kg



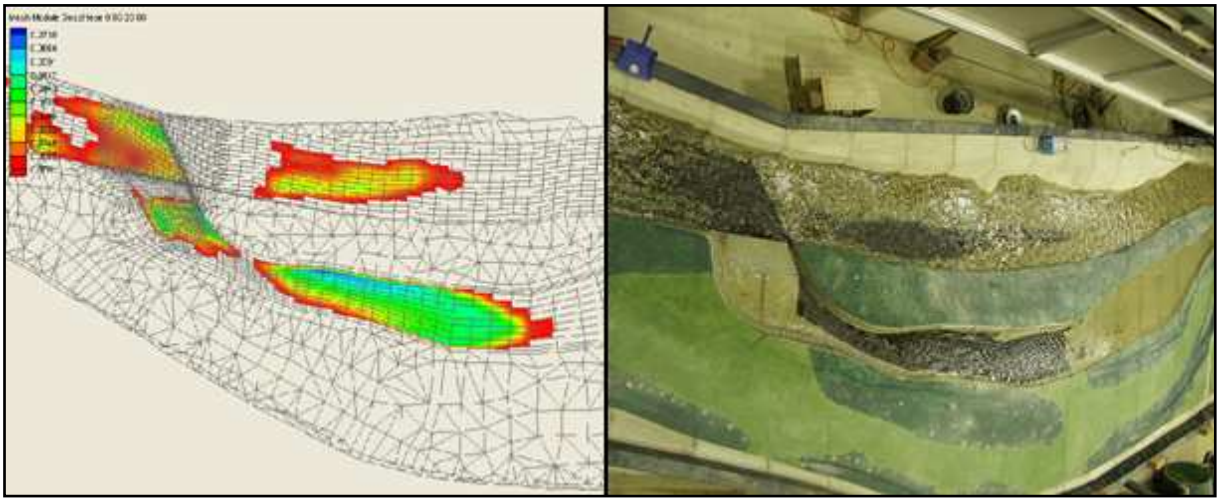
Zeit 2:55 Geschiebe 105 kg



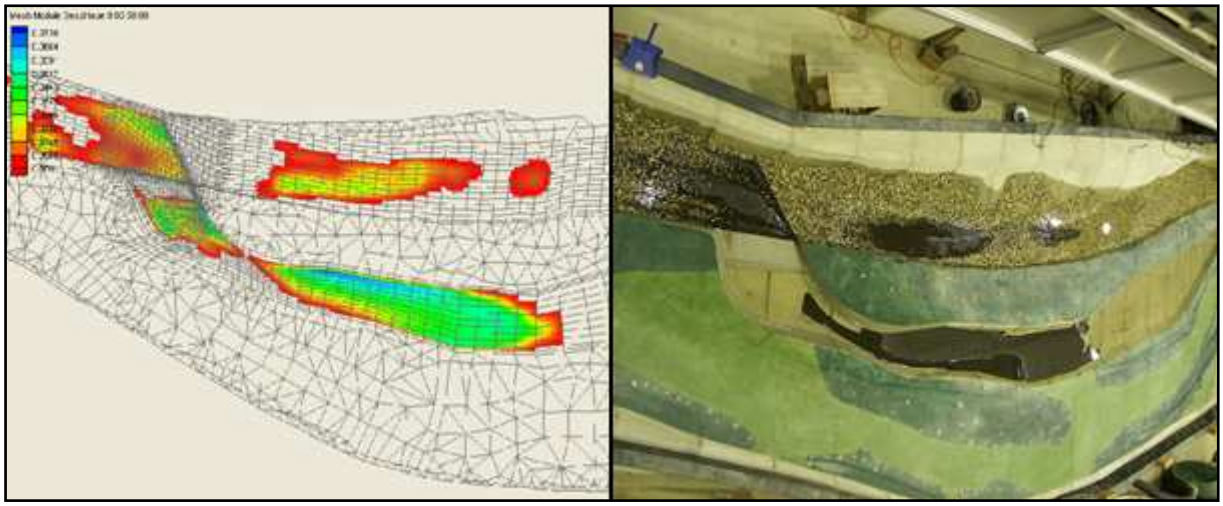
Zeit 3:20 Geschiebe 120 kg



Zeit 3:45 Geschiebe 135 kg



Zeit 4:10 Geschiebe 150 kg



Die Abfolge der Gegenüberstellung zeigt eine sehr gute Korrelation zwischen Numerik und physikalischen Modell. Die Verteilung der Massen im Raum und in der Zeit stimmt überein, sowohl im Nebenarm als auch im Hauptgerinne. Einzig der Einlaufbereich im numerischen Modell ist von Anfang an mit Geschiebe belegt. Bei Versuchsende mit einer Höhe bis zu 5 cm.

In der Darstellung des physikalischen Modellversuchs bei dem Zeitschritt 0:50 verdeckt die Messeinrichtung des Versuchslabors das Bild.

5.2.2 Höhenmäßige Veränderungen in Querprofilen

Das gesamte Projektsgebiet ist in 30 Querprofile unterteilt, die als Referenzprofile für Messungen der Ablagerungen herangezogen wurden. Die Nummerierung beginnt dabei rechts, am Auslaufrand mit 1 fortlaufend flussauf bis zu 30 beim Einlauf in das Modell.

Bei der HQ1 Versuchsdurchführung erfolgt eine ausführliche Darstellung der Ablagerungen in den Querprofilen 19 bis 12.

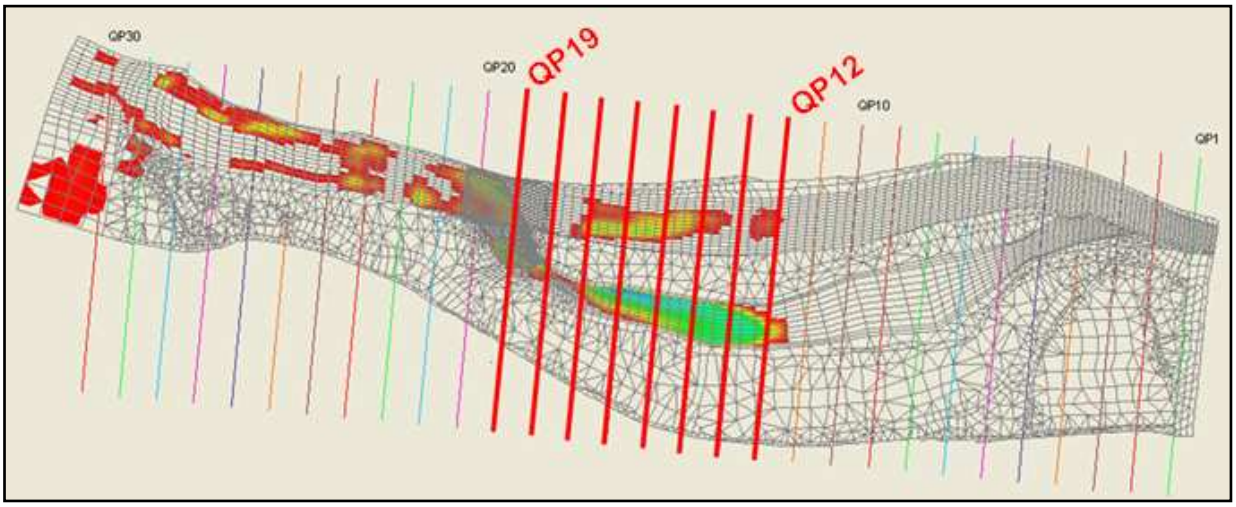


Abb. 35: Darstellung der ausgewerteten Querprofile im numerischen Modell bei HQ1

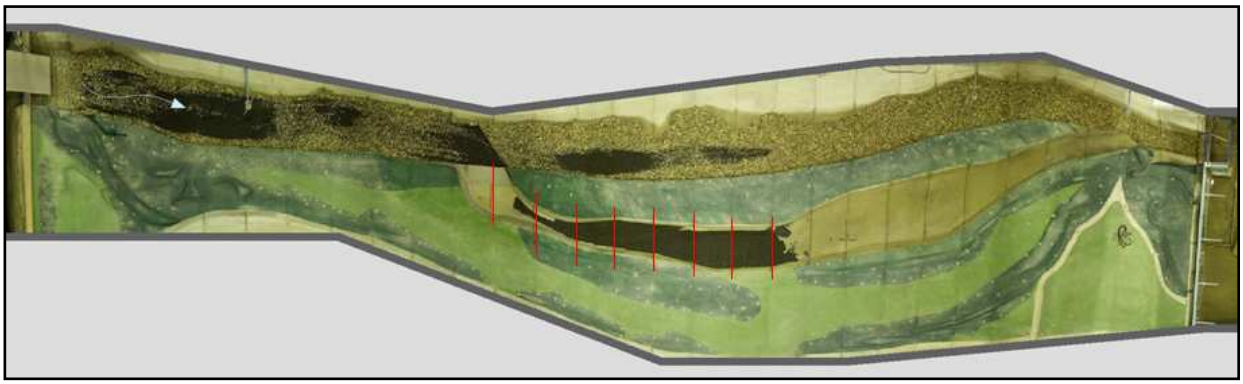


Abb. 36: Darstellung der ausgewerteten Querprofile im physikalischen Modell bei HQ1

Die Auswertung der Querprofildaten erfolgt nur für den Nebenarm, bei dem es zu keiner Veränderung der Sohle kommt und somit die Vergleichbarkeit sichergestellt.

Die in Abb. 37 dargestellte Legende sowie die Beschriftung der Abszisse und Ordinate kommt für alle Querprofildarstellungen zur Anwendung und wurde aus Darstellungsgründen eigens abgebildet.

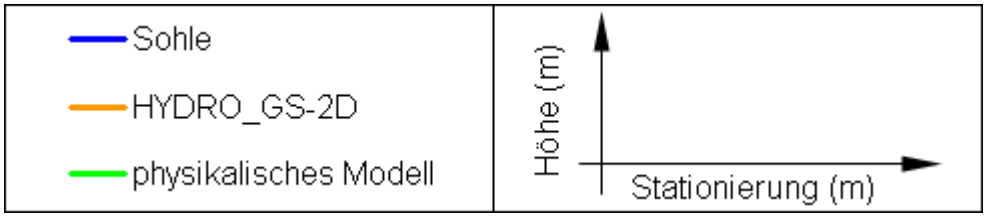


Abb. 37: Legende der Querprofile(links) und Beschriftung der Abszisse und Ordinate(rechts)

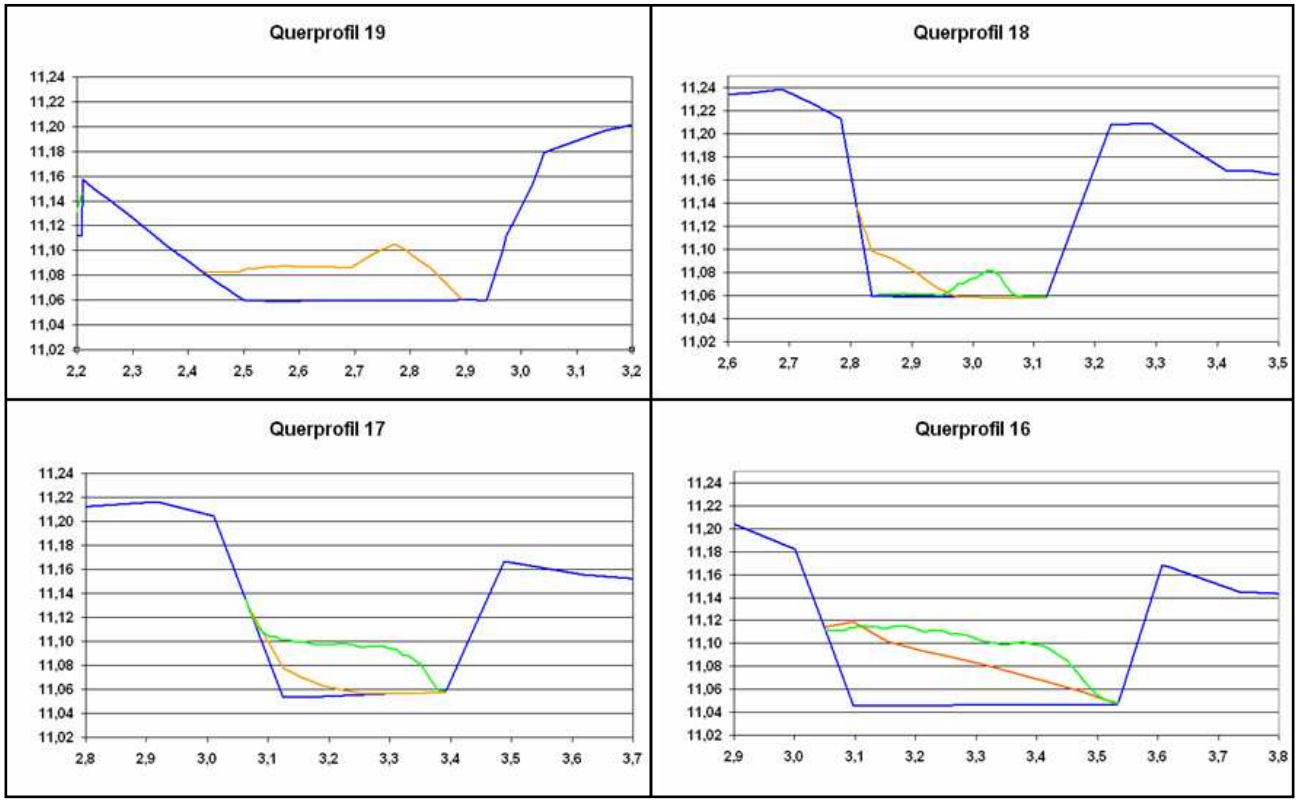


Abb. 38: Darstellung der Querprofile 19 bis 16 von HQ1

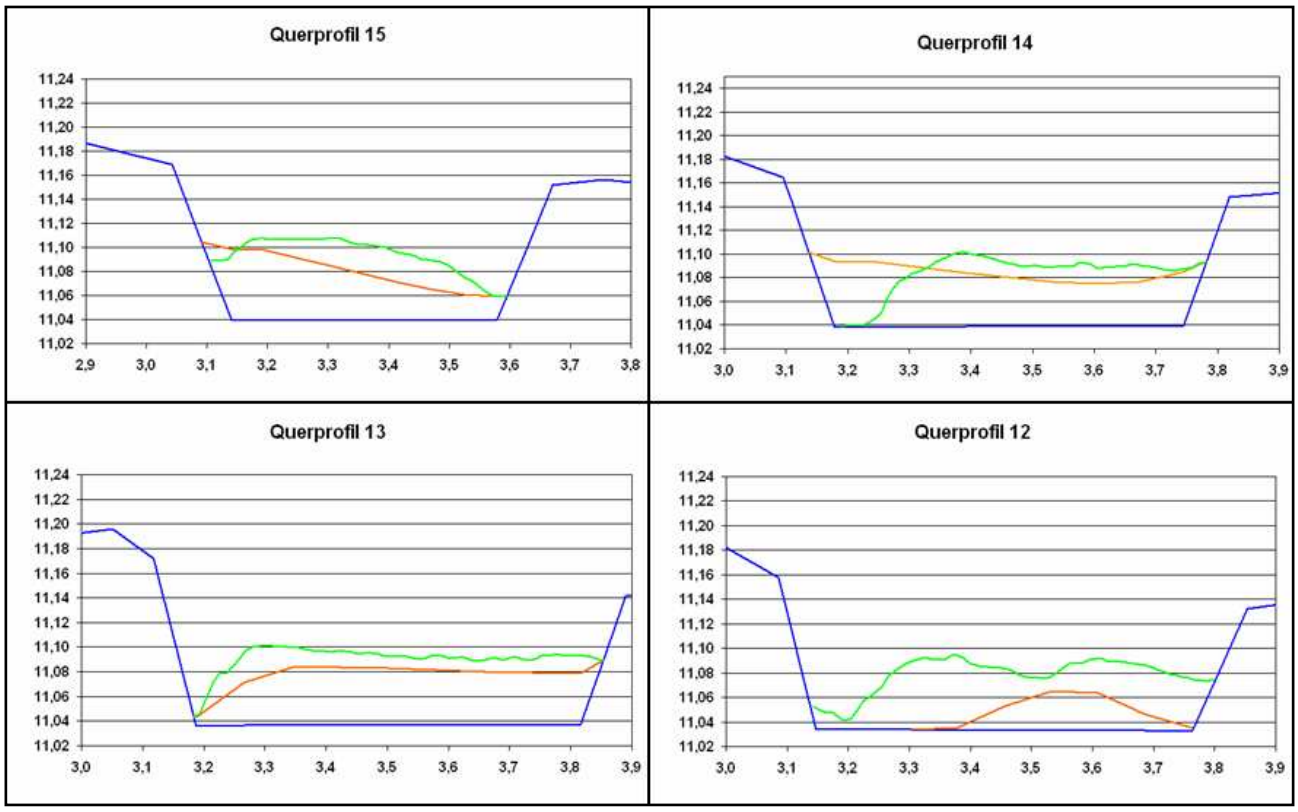


Abb. 39: Darstellung der Querprofile 15 bis 12 von HQ1

In den Querprofilen 19 und 18 sieht man, wie bereits bei den Lagebildern, nur eine Ablagerung in den numerischen Ergebnissen.

In Querprofil 17 ist eine Trennung von zwei Ablagerungsbereichen im Einlauf und weiter flussab ersichtlich. Im Gegensatz dazu gibt es im physikalischen Modellversuch einen einheitlichen Ablagerungsbereich, der bereits bei Querprofil 18 beginnt und in weiterer Folge flächig immer über dem numerischen Ablagerungshöhen liegt. Teilweise wird die maximale Ablagerungshöhe durch die numerische Simulation erreicht.

5.2.3 Wirkungsgrad der Geschiebefalle

Während der Versuchsdauer wurde durch die Geschiebezugabe im Modell ein Volumen von 0,083 m³ abgelagert, wovon sich im Nebenarm ein Volumen von 0,071 m³ befindet. Das Verhältnis der beiden Volumina ergibt dadurch einen Wirkungsgrad von 86% der Geschiebefalle.

Der Wirkungsgrad des physikalischen Modells beträgt dagegen nur 76 %. Der bessere Wirkungsgrad ist alleinig durch die Ablagerungen im Einlaufbereich begründet, da in allen anderen Profilen das numerische Modell großteils unter dem physikalischen liegt.

5.3 Versuch HQ10

Mit einem Durchfluss von 0,0499 m³/s steht bereits auch das gesamte Vorlandprofil unter Wasser, die Geschiebezugabe ist mit 28,2 g/s festgelegt.

Die Dauer der Versuchsdurchführung ist mit 1 Stunde und 32 Minuten beinahe nur mehr ein Drittel der HQ1 Versuchszeit. Wie in Abb. 40 ersichtlich gibt es vereinzelt bereits einen Geschiebeaustrag aus dem Modell, dieser hält sich allerdings mit weniger als 0,03 kg in vernachlässigbaren Grenzen und wird daher nicht bei der Berechnung des Wirkungsgrades berücksichtigt.

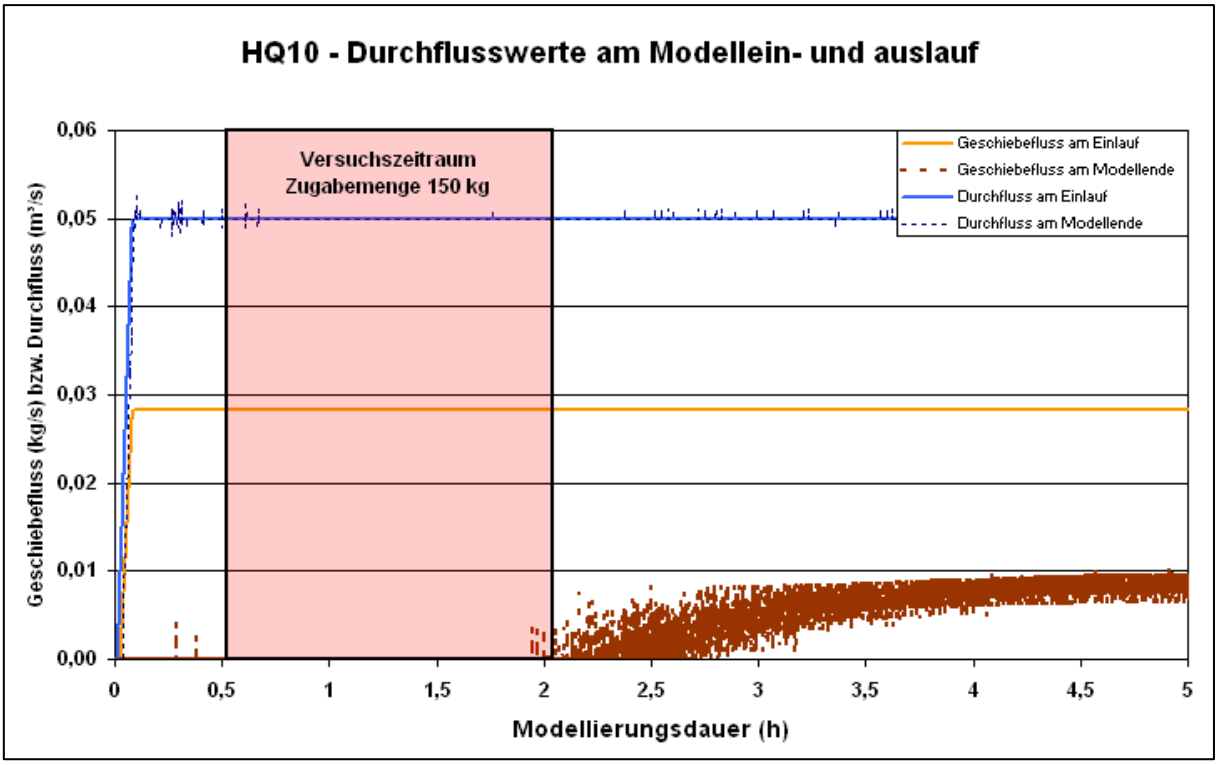


Abb. 40: Darstellungen des zeitlichen Ablaufes der Versuchsdurchführung mittels Ganglinien der Geschiebe- und Durchflussführung

5.3.1 Lagemäßige Verteilung der Ablagerungen

Bei dem HQ10 Versuch werden die einzelnen Stadien der Versuchsdurchführung ebenfalls in 25 Minuten Schritten dargestellt, jedoch mit einer Zugabe von je 42 kg.

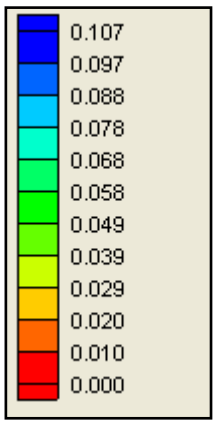
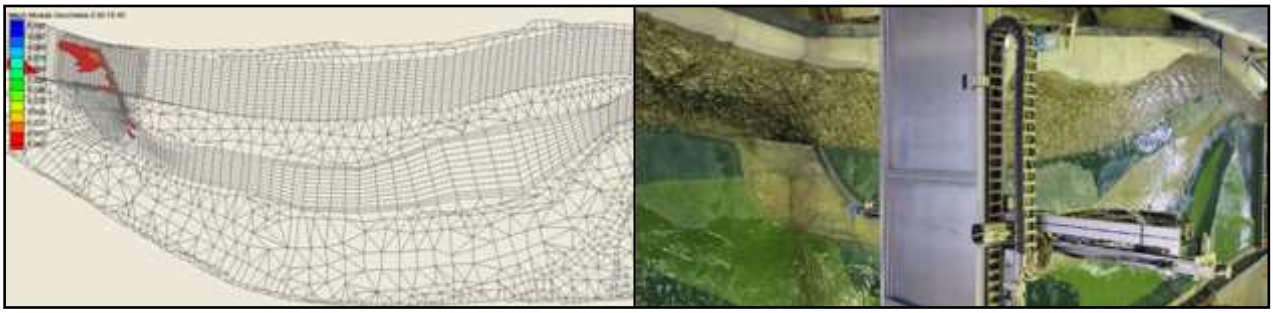


Abb. 41: Farbskala der Geschiebeablagerungshöhe in Metern

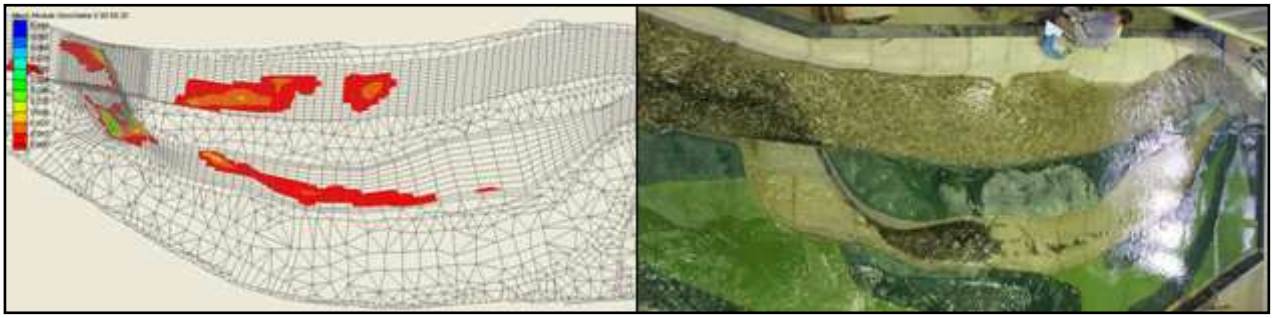
Die dargestellte 11-teilige Farbskala geht von 0 cm bis zu einer maximalen Ablagerungshöhe von 10,7 cm.
Alle folgenden Geschiebeablagerungbilder entsprechen dieser Skala.

Abb. 42: Darstellungsserie der Ablagerungen im Lageplan für den HQ10 Versuch

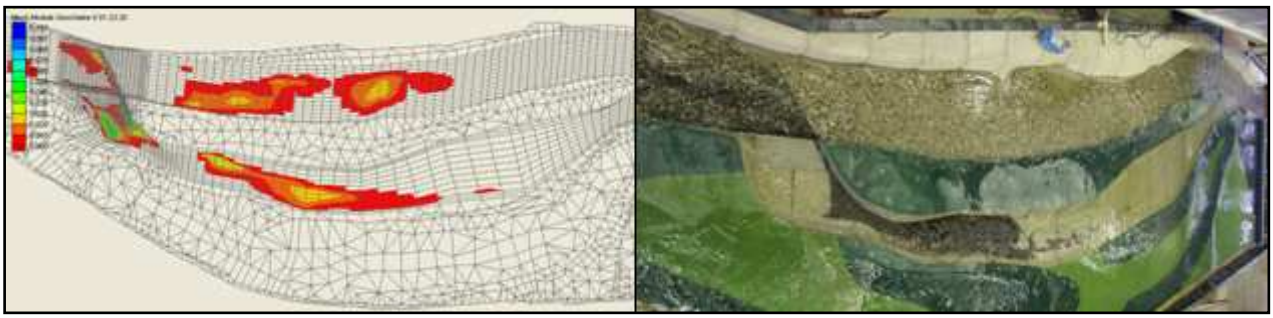
Zeit 0:00 Geschiebe 0 kg



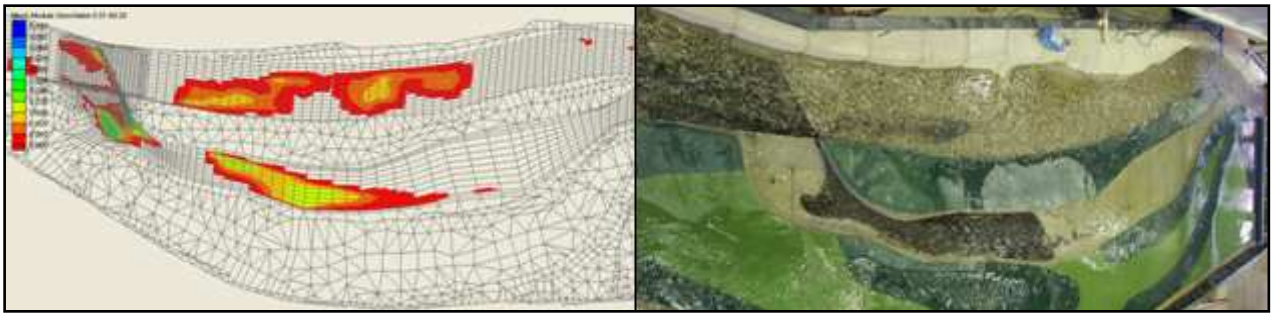
Zeit 0:25 Geschiebe 42 kg



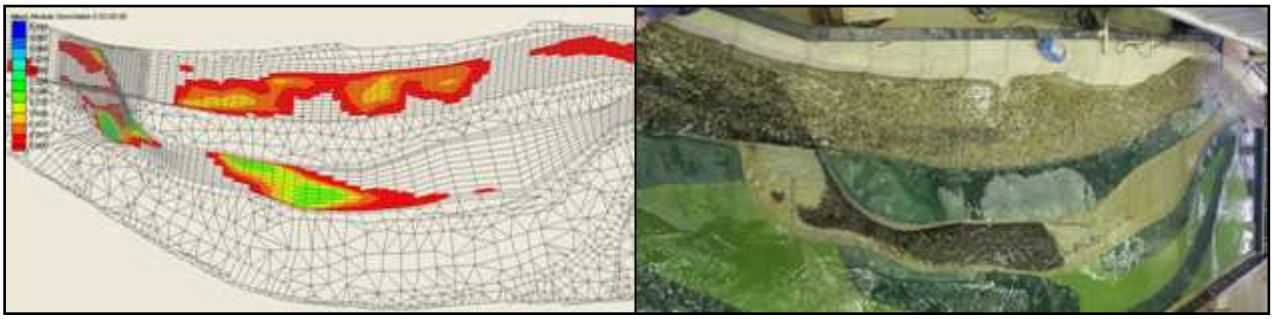
Zeit 0:50 Geschiebe 84 kg



Zeit 1:15 Geschiebe 127 kg



Zeit 1:32 Geschiebe 150 kg



Die Gegenüberstellung der Versuche HQ10 und HQ1 zeigt eine schlechtere Übereinstimmung im Raum und Zeit zwischen Numerik und physikalischen Modell.

Im numerischen Modell gibt es wieder zwei Ablagerungsbereiche die sich im physikalischen Versuch nicht ausbilden. Der Einlaufbereich im numerischen Modell ist von Anfang an mit Geschiebe belegt und bildet sich bis Versuchsende mit einer Höhe bis zu 6 cm aus.

In der Darstellung des physikalischen Modellversuchs bei dem Zeitschritt 0:00 ist wieder durch die Messeinrichtung verdeckt, wobei in diesem Fall der Nebenarm noch völlig leer ist.

Zusätzlich ist erkennbar das im Hauptgerinne flächigere und weiter flussab fortgeschrittene Sedimentationen sich ausbilden als dies im physikalischen Ergebnis der Fall ist.

5.3.2 Höhenmäßige Veränderungen in Querprofilen

Im Unterschied zum HQ1 Versuch werden die folgenden Gegenüberstellungen nur anhand von vier repräsentativ ausgewählten Querprofilen untersucht. Im folgenden handelt es sich dabei um die Profile 18, 16, 14 und 12.

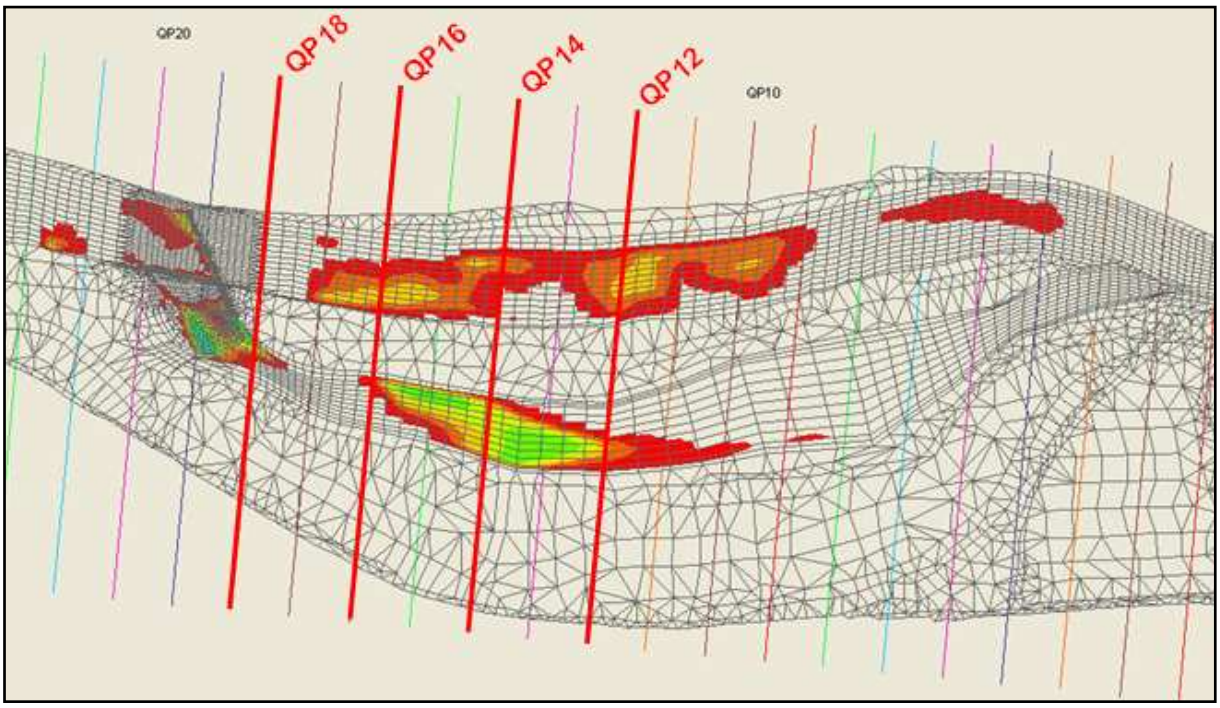


Abb. 43: Darstellung der ausgewerteten Querprofile im numerischen Modell bei HQ10

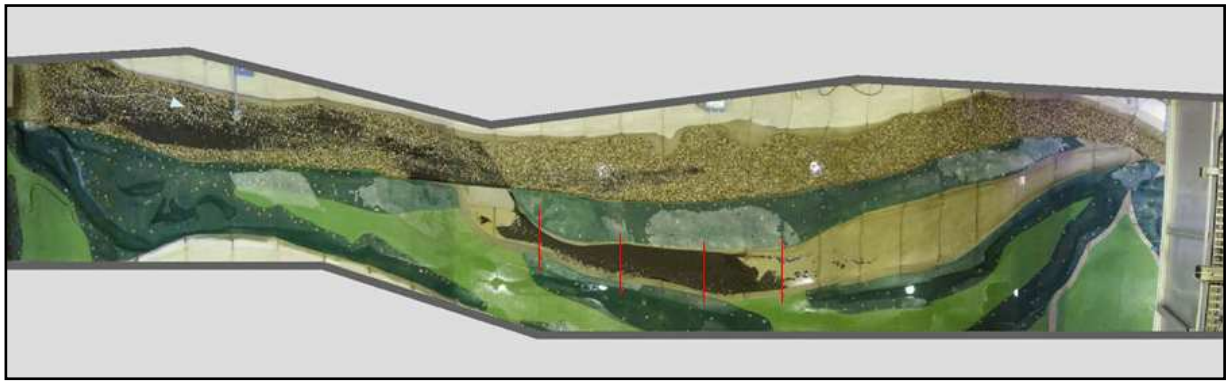


Abb. 44: Darstellung der ausgewerteten Querprofile im physikalischen Modell bei HQ10

Durch die Markierung der Querprofile in beiden Modell ist ersichtlich, dass die maximale Längsausbreitung der Ablagerungen im Nebenarm vergleichbar ist. Die Sedimentation die im numerischen Modell darüber hinausgeht ist unter 1 cm.

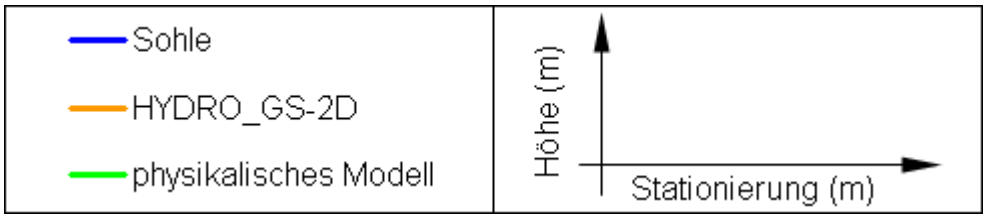


Abb. 45: Legende der Querprofile(links) und Beschriftung der Abszisse und Ordinate(rechts)

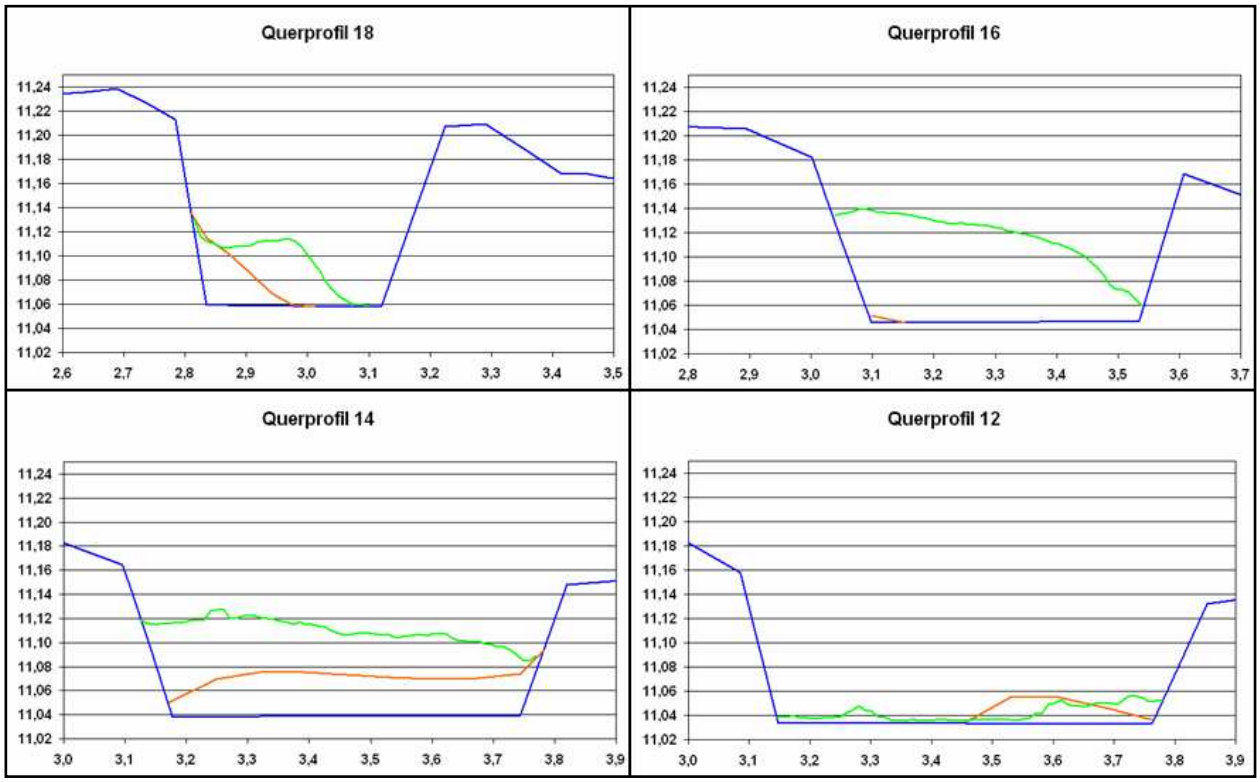


Abb. 46: Darstellung der Querprofile 18, 16, 14 und 12 bei HQ10

Besonders bei dem Querprofil 16 wird der Unterschied zwischen den beiden Modellen ersichtlich, wieder vor allem durch die Aufteilung in zwei Ablagerungsfelder. In den nicht dargestellten Querprofilen werden zwar Ablagerungshöhen von bis zu 6 cm erreicht, allerdings bleiben auch diese Höhen sowie Profil 14 unter dem physikalsichen Modellergebnissen.

5.3.3 Wirkungsgrad der Geschiebefalle

Durch die Geschiebezugabe im Modell wird ein Volumen von 0,081 m³ im gesmaten Modellgebiet abgelagert, wovon sich im Nebenarm ein Volumen von 0,048 m³ wiederfindet.

Das Verhältnis der beiden Volumina ergibt einen Wirkungsgrad von 59 % der Geschiebefalle.

Im physikalischen Modellversuch wird ein weit höherer Wirkungsgrad mit 85 % erzielt. Diese Differenz von 26 % wird durch Ablagerungsbilder im Lageplan und den Querprofilen bestätigt.

5.4 Versuch HQ30

Bei dieser Versuchsdurchführung wird ein Durchfluss von 61,7 l/s im Modellgebiet abgeführt. Die Geschiebefracht mit 38,8 g/s ist mehr als die 3-fache Fracht des HQ1 Versuches. Dadurch ergibt sich für die Zugabe der 150 kg eine Versuchszeit von 1 Stunde und 6 Minuten.

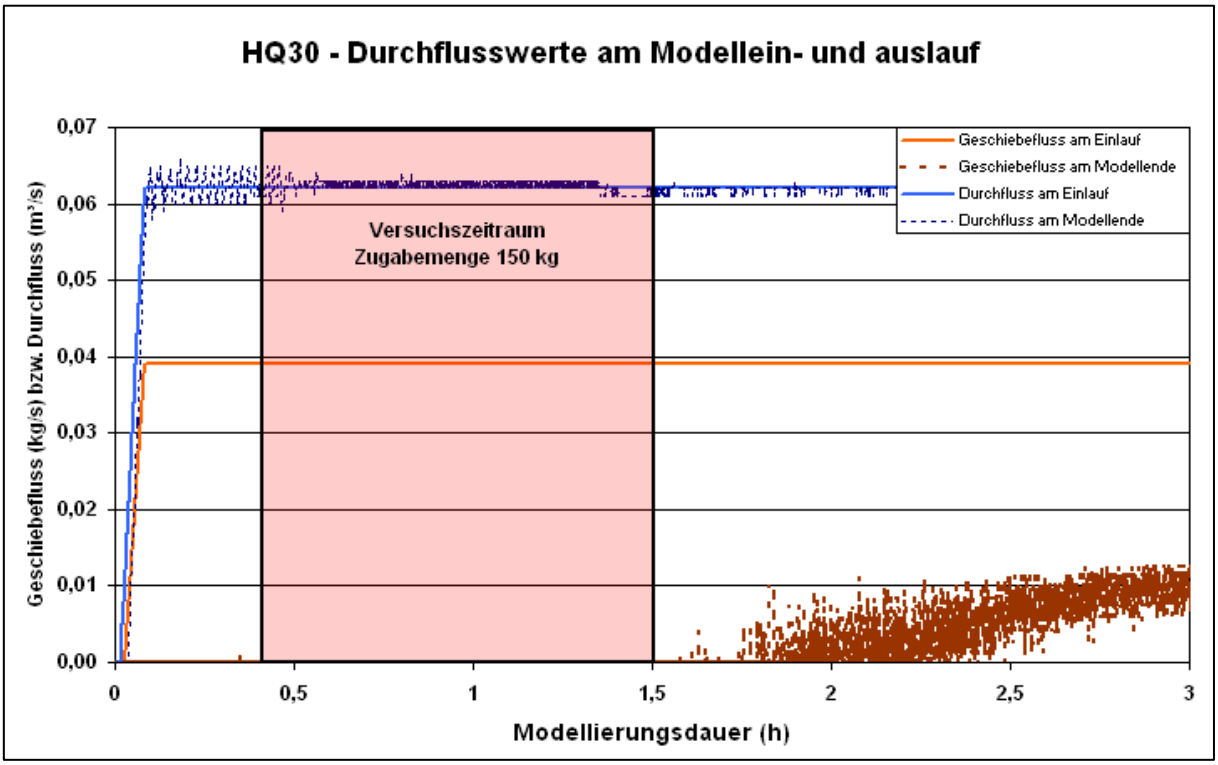


Abb. 47: Darstellungen des zeitlichen Ablaufes der Versuchsdurchführung mittels Ganglinien der Geschiebe- und Durchflussführung

In Abbildung 47 ist das Zeitraumfenster für den Versuch HQ30 dargestellt, dabei wandert kein Geschiebe über den Nodestring am Modellauslauf.

5.4.1 Lagemäßige Verteilung der Ablagerungen

Auch bei dem HQ30 Versuch werden die einzelnen Stadien der Versuchsdurchführung in 25 Minuten Schritten dargestellt, jedoch bereits mit einem Plus von je 59 kg von Darstellung zu Darstellung.

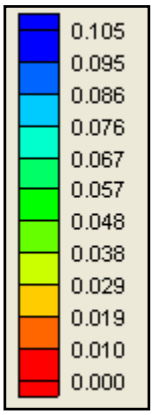
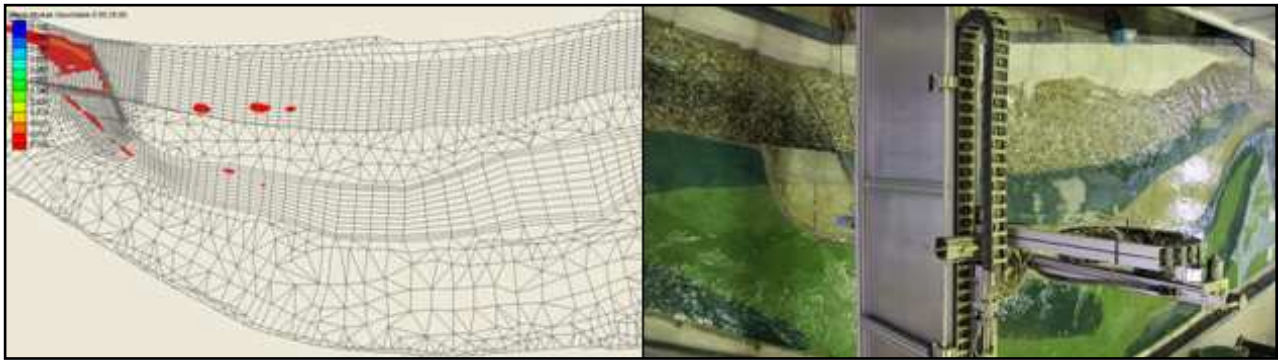


Abb. 48: Farbskala der Geschiebeablagerungshöhe in Metern

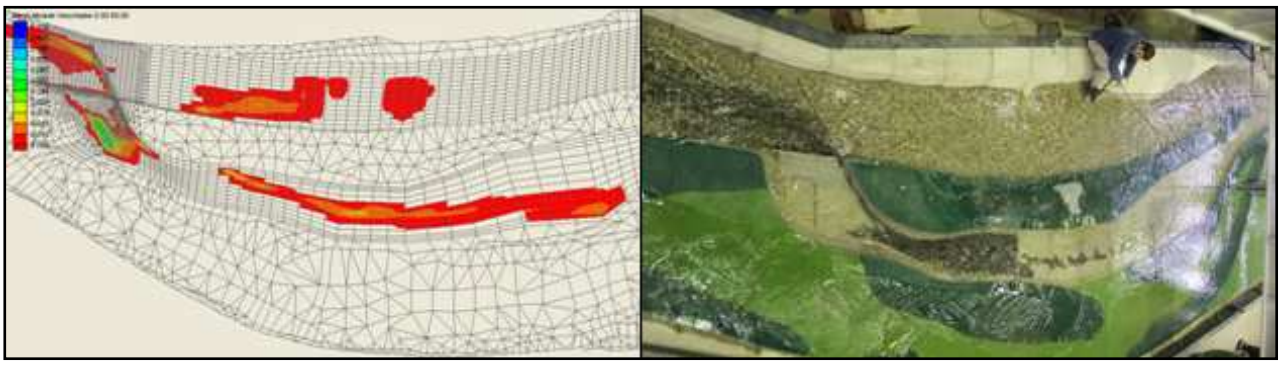
Die dargestellte 11-teilige Farbskala geht von 0 cm bis zu einer maximalen Ablagerungshöhe von 10,5 cm.
Alle folgenden Geschiebeablagerungbilder entsprechen dieser Skala.

Abb. 49: Darstellungsserie der Ablagerungen im Lageplan für den HQ30 Versuch

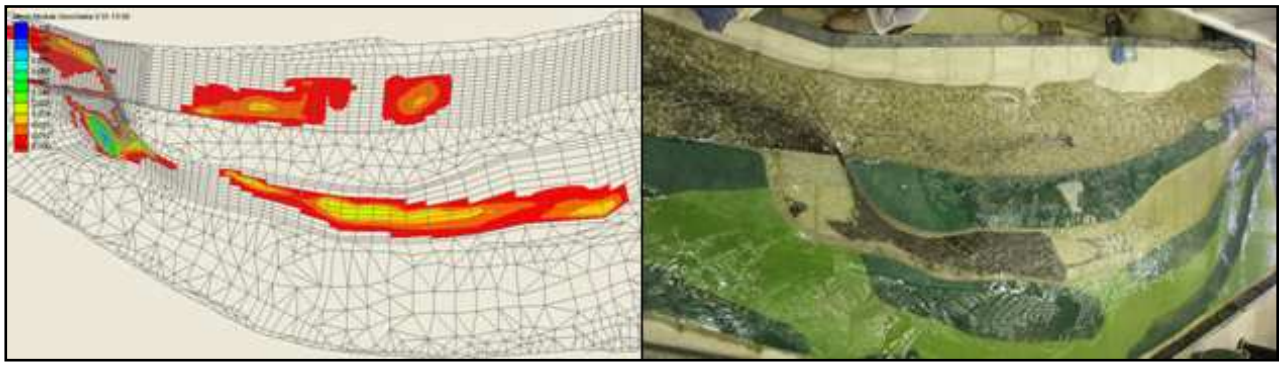
Zeit 0:00 Geschiebe 0 kg



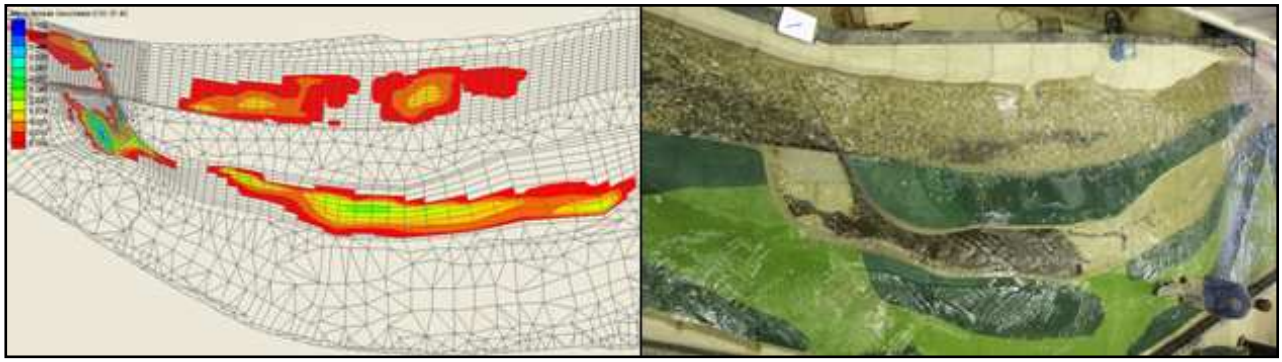
Zeit 0:25 Geschiebe 59 kg



Zeit 0:50 Geschiebe 117 kg



Zeit 1:06 Geschiebe 150 kg



Auch bei dem HQ30 Versuch kommt es im numerischen Modell zu einer Zweiteilung der Sedimentationsbereiche. Allerdings lagert sich am Ende der Versuchsdauer bei dem physikalischen Versuch im Einlaufbereich Geschiebe ab.

Besonders groß ist der Unterschied der beiden Modell in der Längsverteilung, dieser Unterschied kommt besonders in der Querprofildarstellung zur Geltung.

5.4.2 Höhenmäßige Veränderungen in Querprofilen

Für den HQ30 Versuch wurden die Querprofile 19, 18, 15 und 13 ausgewählt.

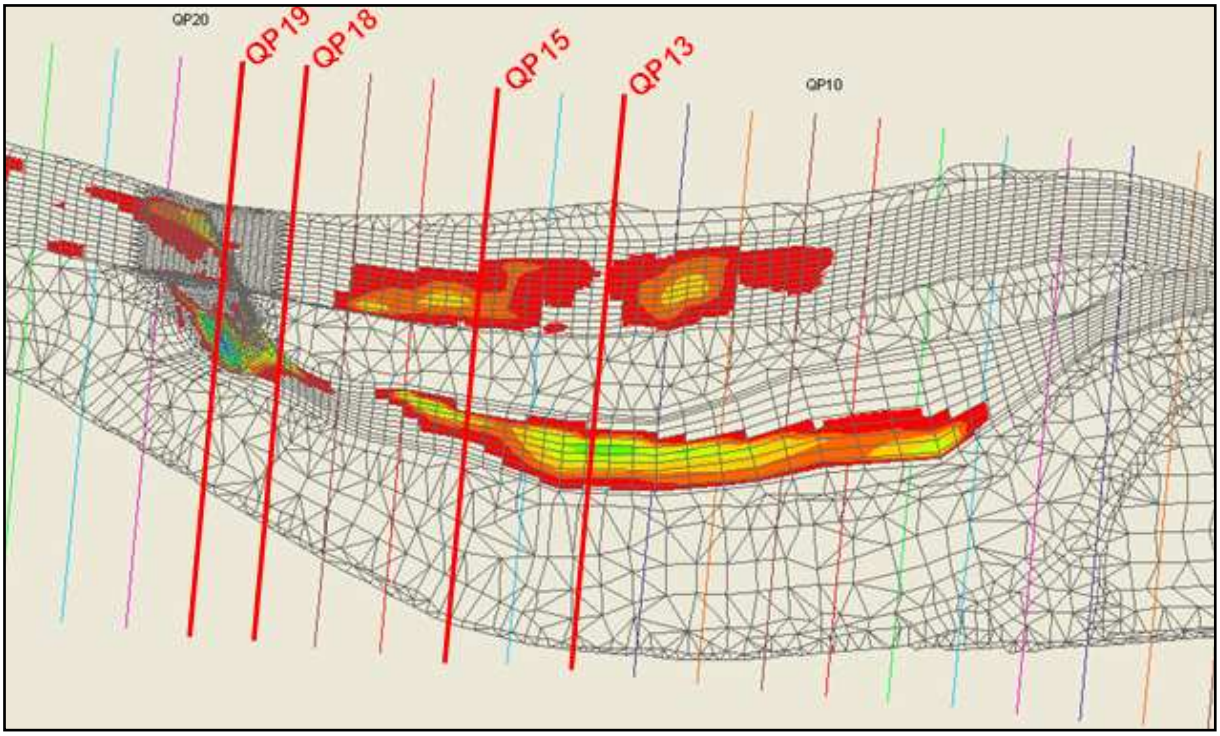


Abb. 50: Darstellung der ausgewerteten Querprofile im numerischen Modell bei HQ30

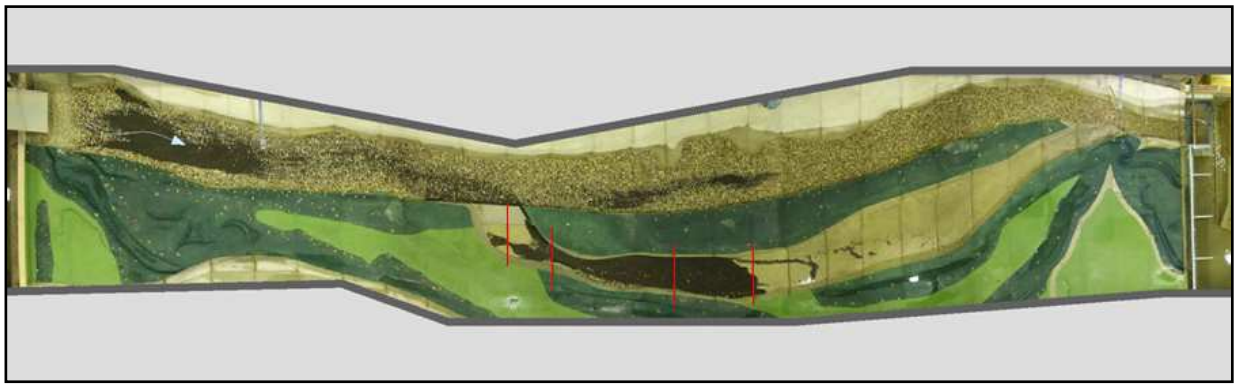


Abb. 51: Darstellung der ausgewerteten Querprofile im physikalischen Modell bei HQ30

In der Darstellung der Querprofile im Lageplan wird die bereits im Kapitel 5.4.1 angesprochene Differenz der Längenausbreitung erkenntlich. Im physikalischen Modell enden die Ablagerungen bei Querprofil 13, wobei sich im numerischen Modell die Ablagerung noch bis zum Profil 7 mit Ablagerungshöhen von bis zu 3 cm ausbilden.

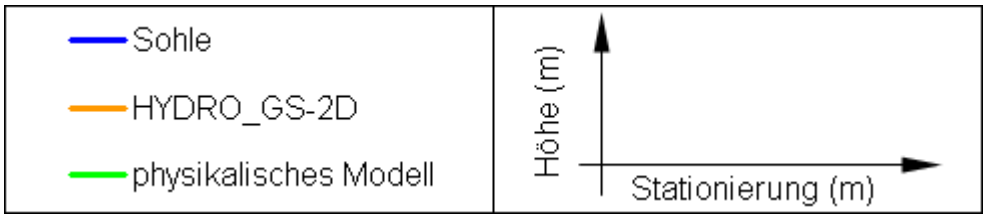


Abb. 52: Legende der Querprofile(links) und Beschriftung der Abszisse und Ordinate(rechts)

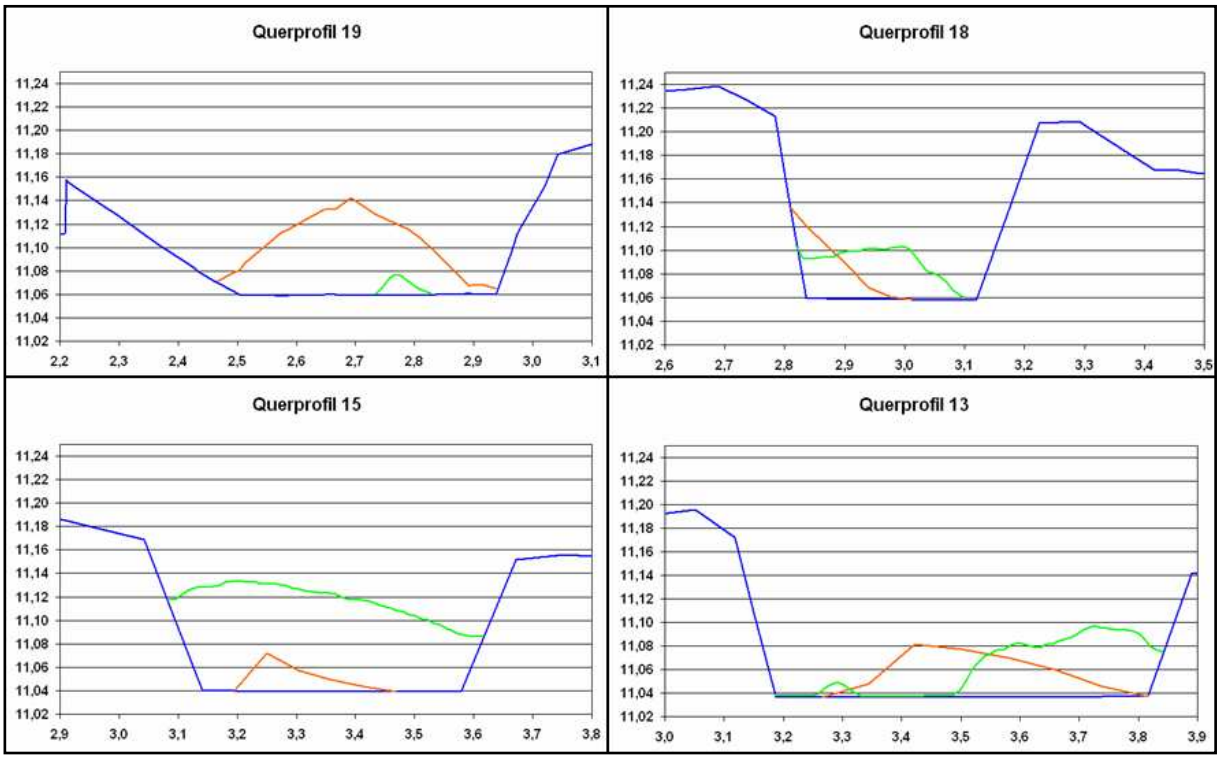


Abb. 53: Darstellung der Querprofile 19, 18, 15 und 13 bei HQ30

Die Ablagerungen im physikalischen Modell sind nun bereits bis in den Einlaufbereich vorgewachsen, allerdings um 6 cm unter dem numerischen Ergebnissen.

Die Ablagerungshöhe variiert teilweise sehr stark, jedoch stimmt die Lage der Ablagerungen in den einzelnen Querprofil gut überein, wie auch bei den Querprofilen bei HQ10.

5.4.3 Wirkungsgrad der Geschiebefalle

Während der Versuchsdauer wurde durch die Geschiebezugabe im Modell ein Volumen von 0,082 m³ abgelagert. Im Nebenarm befindet sich ein Volumen von 0,058 m³ und dadurch stellt sich ein Wirkungsgrad mit 71% der Geschiebefalle ein.

Im physikalischen Modellversuch wird ein konstanter Wirkungsgrad mit 84 % erreicht. Die Differenz von 13 % ist geringer als bei dem HQ10 Versuch, jedoch ist hier die Verteilung der Mengen sehr unterschiedlich.

5.5 Versuch HQ100

Der HQ100 Versuch schickt 75,3 l/s Wasser durch das Modell mit der mehr als 5-fachen Geschiebemenge von HQ1 mit 52,1 g/sec.

Bereits nach 48 Minuten sind 150 kg in das Modellgebiet eingebracht. Während dem Versuchszeitraum wandert zugegebenes Geschiebe bereits aus dem Modellgebiet hinaus.

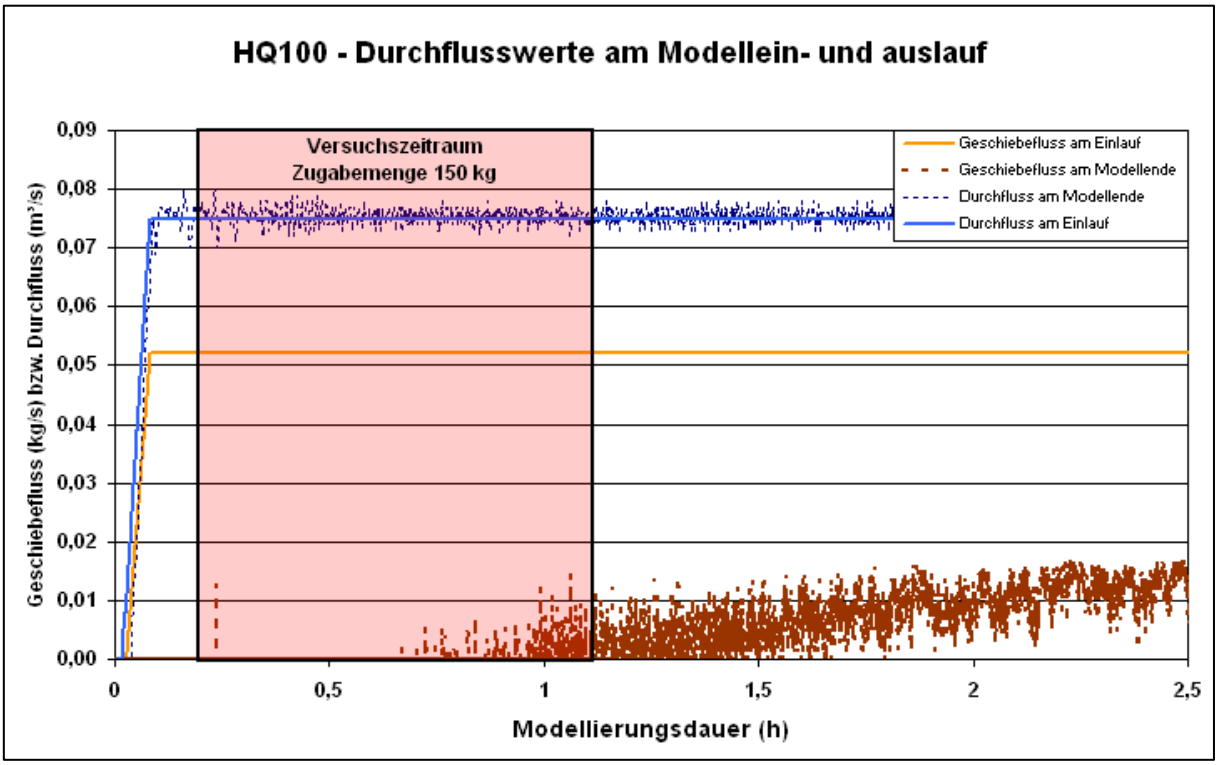


Abb. 54: Darstellungen des zeitlichen Ablaufes der Versuchsdurchführung, anhand Geschiebeganglinie.

Bei der HQ100 Auslaufganglinie des Geschiebes kommt es verstärkt zu vereinzelten Geschiebestößen aus dem Modellgebiet. In Summe beläuft sich die Geschiebemenge auf unter 1 kg. Der Austrag kann daher vernachlässigt werden, da er nur 0,7 % der gesamten Geschiebezugabe ausmacht. Im physikalischen Modell wandert kein zugegebener Sand aus dem Modell hinaus.

5.5.1 Lagemäßige Verteilung der Ablagerungen

Bei dem HQ100 Versuch werden die einzelnen Stadien der Versuchsdurchführung in 17 Minuten Schritten dargestellt, mit einem Plus von je 53 kg in den Darstellungen.

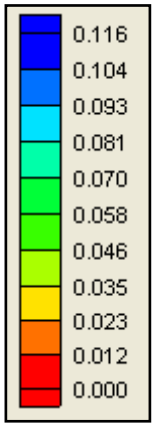
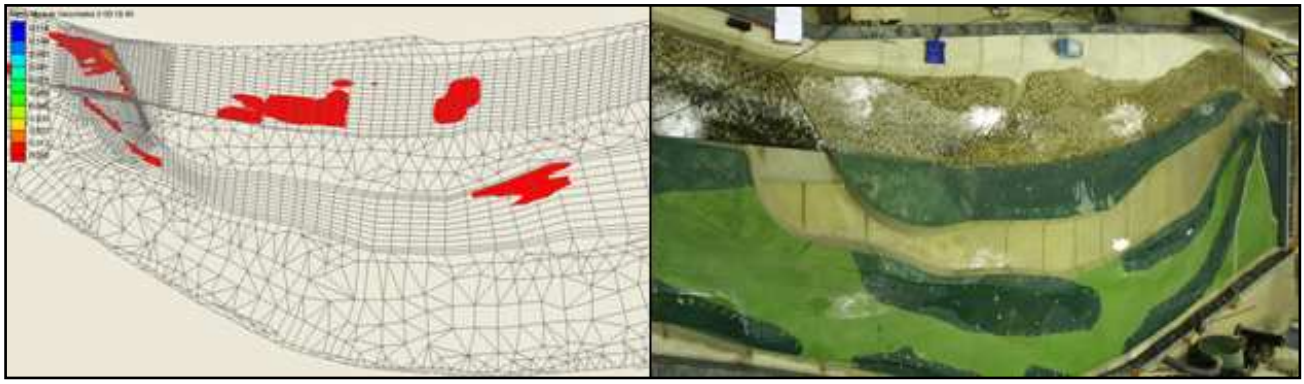


Abb. 55: Farbskala der Geschiebeablagerungshöhe in Metern

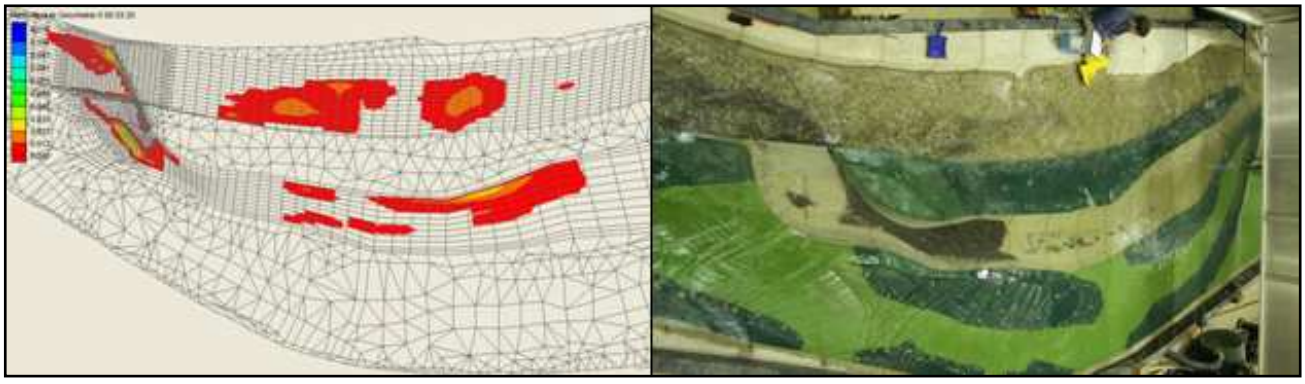
Die dargestellte 11-teilige Farbskala geht von 0 cm bis zu einer maximalen Ablagerungshöhe von 11,6 cm.
Alle folgenden Geschiebeablagerungbilder entsprechen dieser Skala.

Abb. 56: Darstellungsserie der Ablagerungen im Lageplan für den HQ100 Versuch

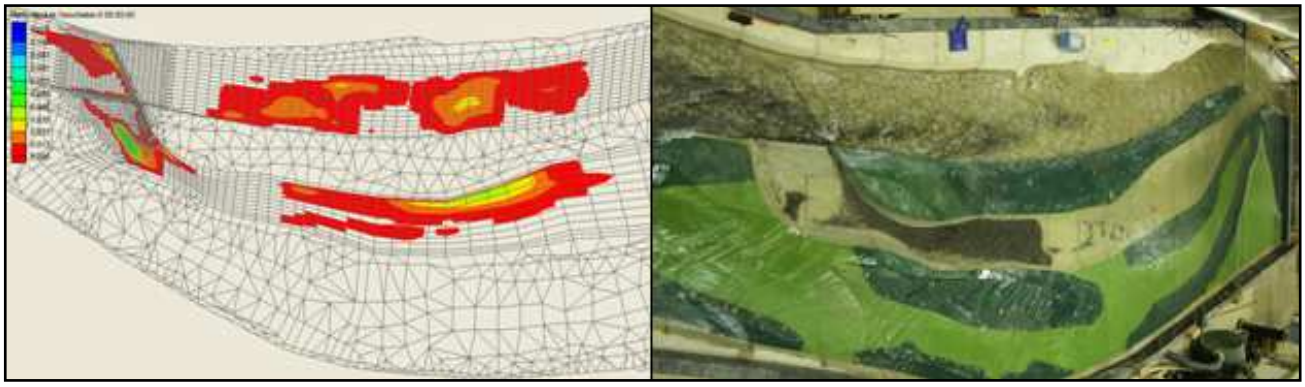
Zeit 0:00 Geschiebe 0 kg



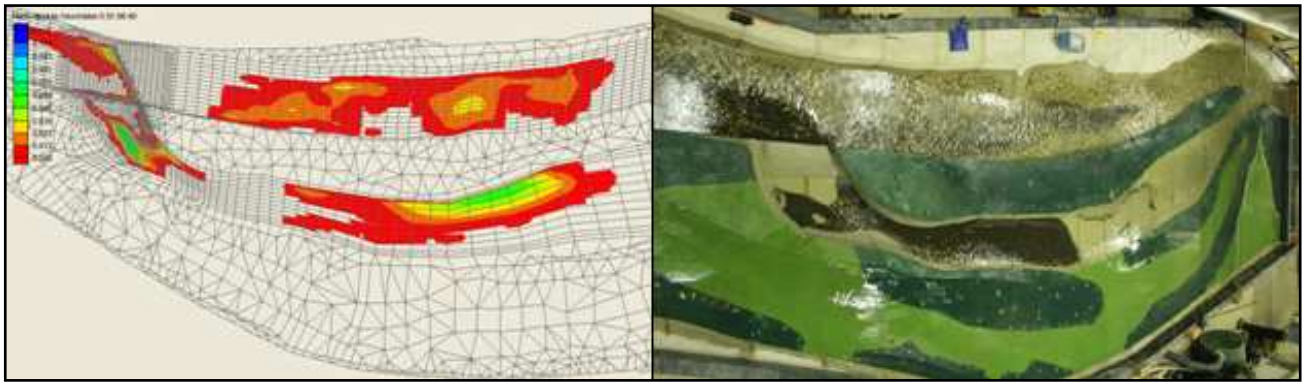
Zeit 0:17 Geschiebe 53 kg



Zeit 0:34 Geschiebe 106 kg



Zeit 0:48 Geschiebe 150 kg



Bei diesem Versuch kommt es zu einer noch stärkeren Trennung der beiden Sedimentationsbereiche im Nebenarm des numerischen Modells. Im Gegensatz zum Nebenarm ist die Ausbreitung des Geschiebes im Hauptgerinne ähnlich dem physikalischen Ergebnissen.

5.5.2 Höhenmäßige Veränderungen in Querprofilen

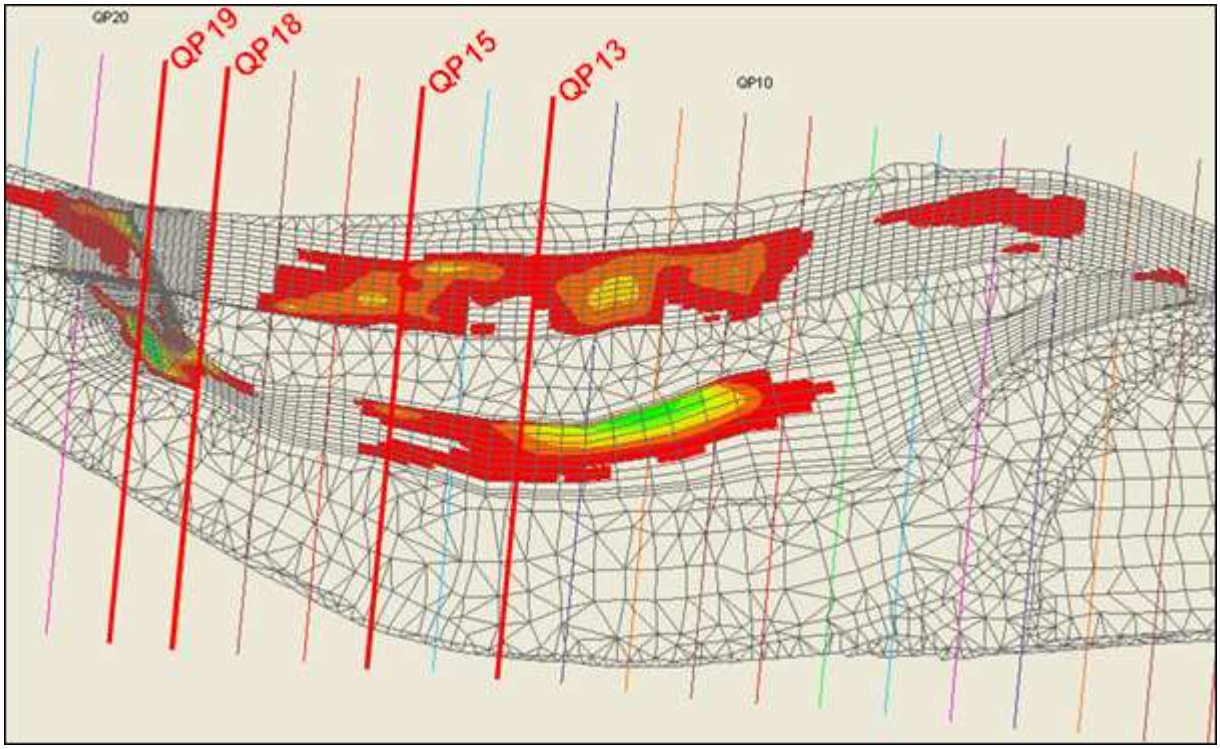


Abb. 57: Darstellung der ausgewerteten Querprofile im numerischen Modell bei HQ100

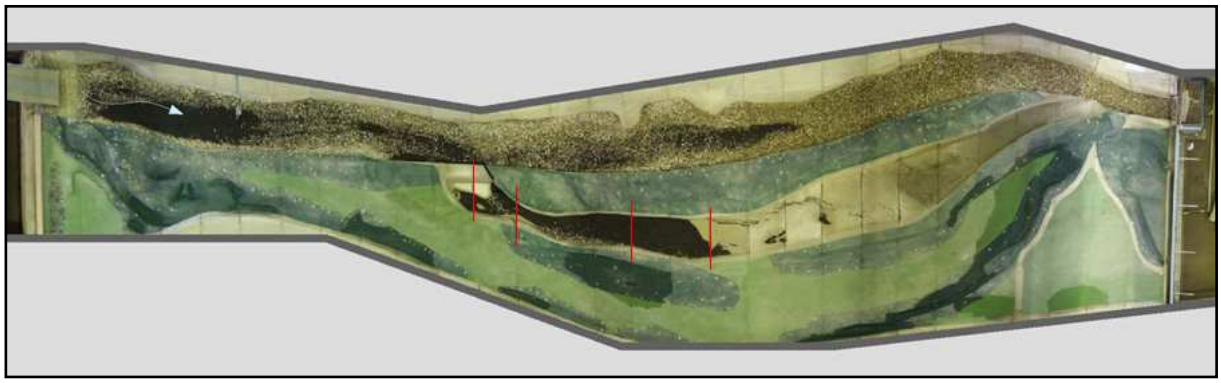


Abb. 58: Darstellung der ausgewerteten Querprofile im physikalischen Modell bei HQ100

Auch in dieser Gegenüberstellung der Darstellung der Querprofile wird ersichtlich, dass die Ablagerungen im Nebenarm, gering auch im Hauptgerinne, um bis zu 4 bis 5 Profile über das Niveau des physikalischen Modells hinauswandern. Die Abstände zwischen den einzelnen Profilen betragen 50 cm, somit reicht die Ablagerung um mehr als einen Meter im numerischen Modell weiter.

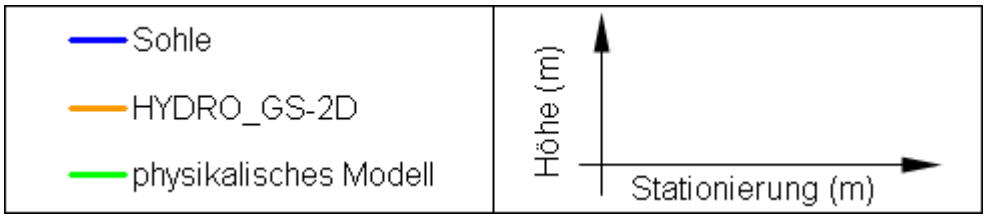


Abb. 59: Legende der Querprofile(links) und Beschriftung der Abszisse und Ordinate(rechts)

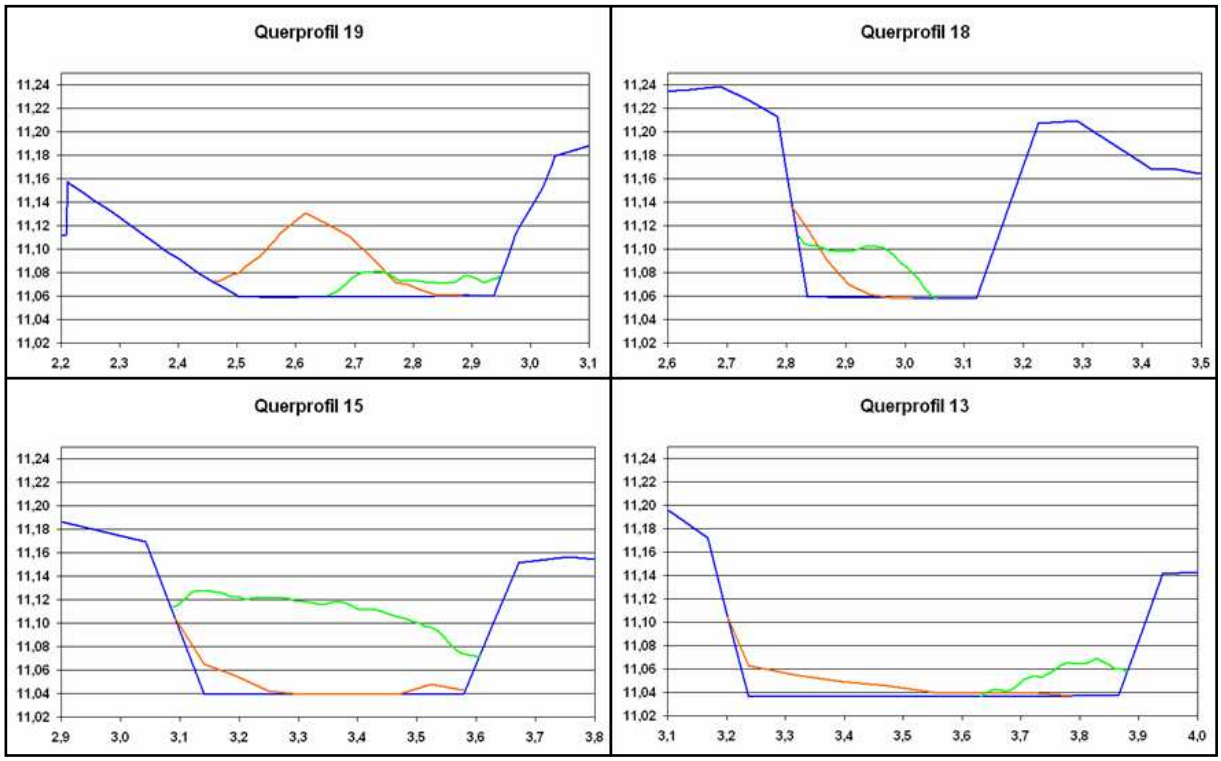


Abb. 60: Darstellung der Querprofile 19, 18, 15 und 13 bei HQ10

Ähnlich den Ablagerungen in der Lage variieren auch die Querprofile sehr stark voneinander. Der Großteil der Sedimentation in Nebenarm findet im numerischen Ergebnis zwischen den Querprofilen 13 und 9 statt, d.h. in einem Bereich der im physikalischen Modell nicht erreicht wird.

5.5.3 Wirkungsgrad der Geschiebefalle

Bei dem HQ100 Versuch wurde im Modell ein Volumen von 0,080 m³ abgelagert, wovon sich im Nebenarm ein Volumen von 0,039 m³ befindet. Das Verhältnis der beiden Volumina ergibt einen Wirkungsgrad von 49% der Geschiebefalle.

Im physikalischen Modellversuch wird ähnlich dem HQ1 Versuch ein Wirkungsgrad von 75 % erreicht. Die Differenz von 26 % ist gleich der vom HQ10 Versuch.

5.6 Ergebnis

Die Darstellungen zeigen, dass bei dem HQ1 Versuch im Lageplan und in den einzelnen Querprofilen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den beiden Modellen erzielt werden konnte. Die einzige größere Abweichung davon stellt die Aufteilung in zwei getrennte Sedimentationsbereiche im Nebenarm des numerischen Modells dar.

Mit steigendem Durchfluss und steigender Geschiebezugabe zeigen sich größere Abweichungen von den physikalischen Ergebnissen. Das Geschiebe wandert ab dem HQ1 Versuch deutlich weiter als in den vergleichbaren physikalischen Versuchen. In Abb. 61 wird dieser Unterschied besonders deutlich. In der Abbildung ist das maximal erreichte Profil bei Ende der Versuchsdurchführung dargestellt. Alle vier Versuche des physikalischen Modellversuches befinden sich dabei zwischen Profil 13 und Profil 12, d.h. bei den unterschiedlichen Durchflussmengen mit einer konstanten Geschiebezugabe von je 150 kg variiert die maximale Erstreckung im Nebenarm innerhalb von 50 cm. Die Ergebnisse des physikalischen Modellversuches können deshalb als konstant bezeichnet werden.

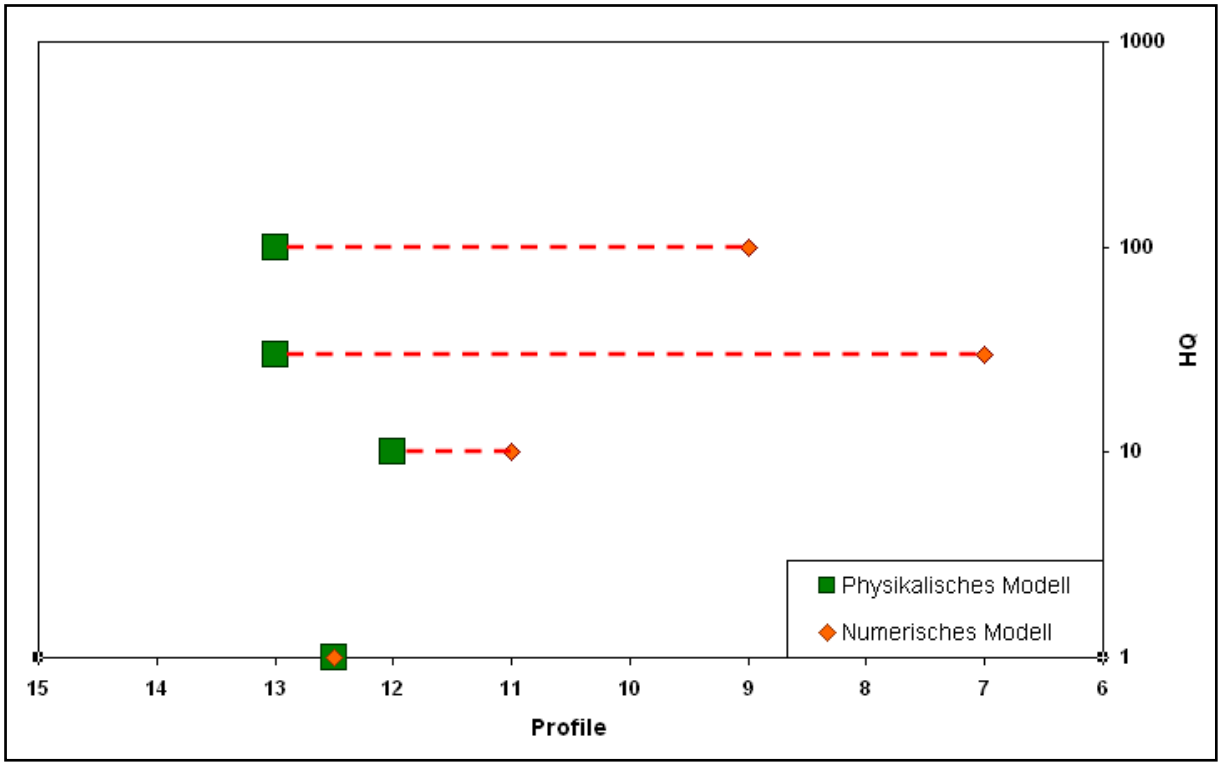


Abb. 61: Maximal erreichtes Profil nach Ende der Versuchsdurchführung

Die Variabilität der numerischen Ergebnisse in Hinblick auf die maximale Ausdehnung der Geschiebeablagerungen im Nebenarm erstreckt sich von Profil 12,5 bis zu Profil 7, d.h. über

einen Strecke von 275 cm. Besonders deutlich zeigt sich die Differenz bei dem HQ30 Versuch. Der Unterschied zwischen physikalischen und numerischen Modell liegt bei 300cm.

Die gesamte Erstreckung des physikalischen Modells, für den HQ30 Versuch, erreicht von Profil 19 bis zu Profil 13 eine Länge von 3 m. Dahingegen verteilt sich der numerische auf eine Länge von 6 m und somit auf die doppelte Länge des physikalischen.

Die unterschiedlichen Längserstreckungen bilden sich nicht erst im Versuchsverlauf aus, sondern sind bei HQ10, HQ30 und HQ100 bereits von Beginn an vorhanden und bilden sich im weiteren Verlauf durch ein Breiten- und Höhenwachstum der Ablagerungen nur noch deutlicher aus. Der Versuch HQ1 hingegen spiegelt klar ein kontinuierliches Längen- und Breitenwachstum, ähnlich einer Deltabildung, bei der klar die einzelnen Phasen einer Längs- und einer Breitenentwicklung abgegrenzt werden können (SCHUSTER, 2006). Dieses Wachstum steht auch in deutlicher Übereinstimmung mit dem physikalischen Verlauf der Geschiebeablagerung.

In Abbildung 62 sind die beiden Ausprägungen der maximalen Längenerstreckung im Nebenarm in einem Streudiagramm gegenübergestellt. Die grau strichlierte Linie stellt die komplette Übereinstimmung der beiden Ergebnisse dar und durch die große Abweichung der einzelnen Versuchsergebnisse kann die Abweichung festgehalten werden.

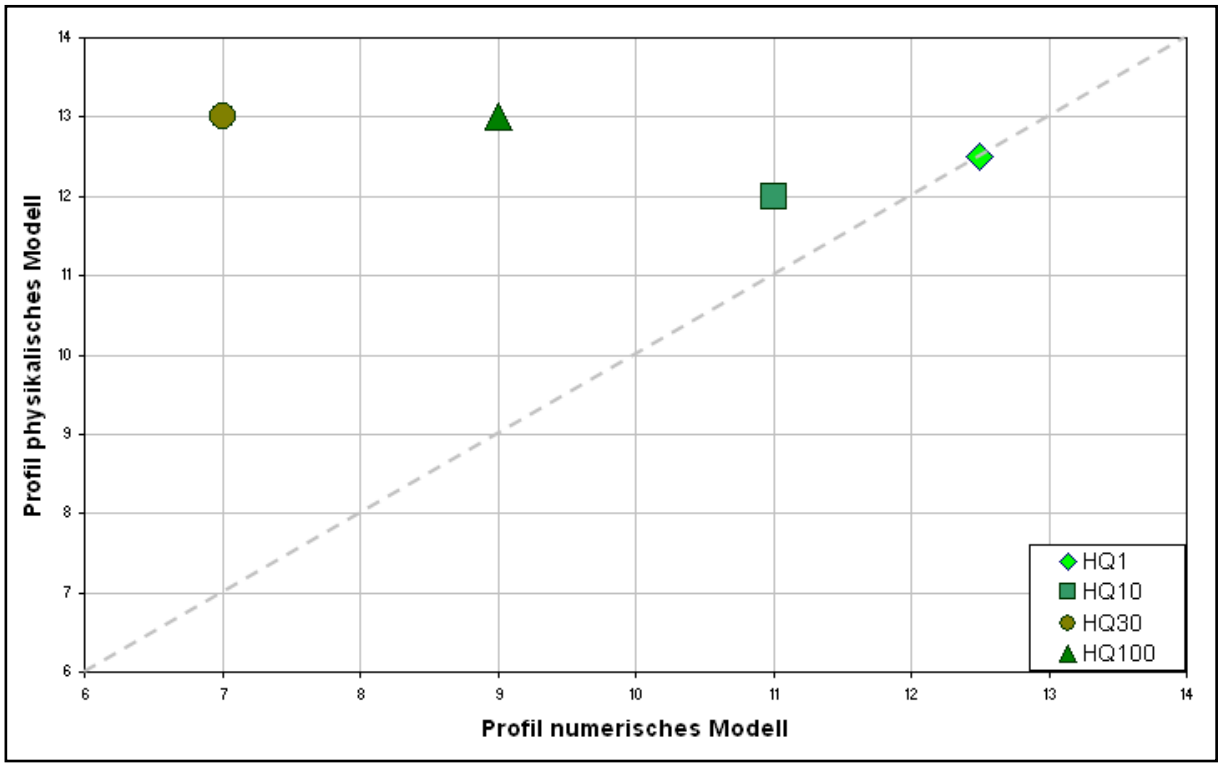


Abb. 62: Streudiagramm der maximalen Erstreckung der Geschiebeablagerung im Nebenarm des physikalischen und numerischen Modells

Die Tabelle 11 stellt die Wirkungsgrade von numerischen und physikalischen Modell vergleichend dar. Die Ermittlung der Wirkungsgrade des physikalischen Modellversuchs erfolgte durch Wiegen des trockenen Sandes im Nebenarm nach der Versuchsdurchführung und Division durch die Gesamtzugabe von 150 kg. Für die Berechnung des Wirkungsgrades für die numerischen Ergebnisse wurde das Volumen herangezogen. Das Volumen kann in der Postprocessing Software SMS direkt abgelesen werden.

Auch die Wirkungsgrade zeigen ein ähnliches Bild wie die Vergleiche der bisherigen Ergebnisse. Die numerischen Prozentwerte schwanken sehr stark in einem Bereich von 45 % bis 86 %, d.h. über einen Bereich von 41%. Die Wirkungsgrade des physikalischen Modells hingegen befinden sich in engen Grenzen von 75 % bis zu 85 % und variieren daher nur um 10 %.

	Versuch – Zugabe 150kg		Nebenarm	Wirkungsgrad numerisches Modell (%)	Wirkungsgrad physikalisches Modell (%)	Differenz (%)
	Zeit	Volumen (m^3)	Volumen (m^3)			
HQ1	04:10	0,083	0,071	86	76	10
HQ10	01:32	0,081	0,048	59	85	-26
HQ30	01:06	0,082	0,058	71	84	-13
HQ100	00:48	0,080	0,039	49	75	-26

Tab. 11: Gegenüberstellung der Wirkungsgrade von physikalischen und numerischen Modellversuch

Das arithmetische Mittel der Wirkungsgrade HQ1 bis HQ100 des physikalischen Modells weißt mit 80 % eine sehr hohe Effektivität der Geschiebefalle aus. Im Gegensatz dazu liegt das arithmetische Mittel der numerischen Wirkungsgrade aller vier Versuche mit 66 % unter den physikalischen Ergebnissen.

6. Diskussion und Zusammenfassung

Ein Ziel der Arbeit war die Untersuchung der Einsatzbereiche und der Vergleich von numerischen und physikalischen Modellen für Geschiebetransportbetrachtungen. Ein weiteres, daraus abgeleitetes Ziel war die Qualität der numerischen Ergebnisse einer 2-dimensionalen Berechnung aufzuzeigen.

Alle Versuche, sowohl Physikalische als auch Numerische, wurden unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Veränderliche Parameter waren jeweils nur der Durchfluss und die Geschiebezugabe. Das Medium Wasser konnte, aufgrund der Parameter Gefälle und Durchfluss, den zugegebenen Basaltsand entweder transportieren, oder falls die kritische Schubspannung unterschritten wurde, ablagern. Das Geschiebe wurde für den physikalischen Modellversuch derart gewählt, dass es bei jeder Durchflussmenge als Geschiebe transportiert wird. Ebenso war die Körnungslinie des Sandes sehr eng gestuft, um Einflüsse aus der Kornverteilung, wie etwa selektiven Transport und dadurch Sohlpflästerung und Sortierung oder Interaktionen der einzelnen Kornfraktionen, ausschließen zu können. Eine weitere Vereinfachung der Natur durch das physikalische Modell ist die Vernachlässigung von Schwebstoffen. Durch diese Voraussetzungen bestanden ideale Bedingungen für die Durchführung der numerischen Versuche mit HYDRO_GS-2D, da in der aktuellen Version nur eine Korngröße berücksichtigt wurde. Die Erstellung des Berechnungsnetzes erfolgte exakt auf Basis des physikalischen Modellversuches, besonders auch im Hinblick auf die verwendeten Strickler Rauhigkeiten und die dreifache Überhöhung im Modell. Dadurch kann anhand der gewählten Indikatoren, Ablagerungsdarstellungen im Lageplan und in Querprofilen, sowie ein Vergleich der Wirkungsgrade der Geschiebefalle ein anschaulicher und guter Vergleich der beiden Ergebnisse durchgeführt werden. Ebenso konnte durch die Verwendung des physikalischen Modells eine besonders zuverlässige und umfangreiche Datenbasis, im Vergleich zu Naturdaten, geschaffen werden.

Die Berechnungen mit HYDRO_GS-2D erfolgten auf einem kalibrierten und validierten Berechnungsnetz für die untersuchten Hochwässer im Ursprungszustand ohne Nebenarm. Dabei wurden in Analogie zum physikalischen Modellversuch die Berechnungsläufe ohne Sandzugabe durchgeführt. Nach dem anschließenden Einbau des Nebenarmes in das Netz wurden die Versuchsserien gestartet.

Es zeigte sich sehr schnell, dass es im Einlaufbereich des Nebenarmes zu umfangreichen Ablagerungen im numerischen Modell kam, die im physikalischen Modell kleiner waren. Der Einlaufbereich des physikalischen Modellversuches verlandete zwar auch bei den Versuchen

HQ10, HQ30 und HQ100, jedoch kam es dabei zu einer rückschreitenden Sedimentation. Die Ablagerungen im numerischen Modell entstanden, im Gegensatz dazu, unabhängig der weiteren Ablagerungen und traten unmittelbar nach Versuchsbeginn ein. Der Grund für die Ablagerungen ist, dass die Strömung im physikalischen Modell wesentlich komplexer ist als im numerischen. Deshalb wurden die Netzelemente im Nebenarmeinlaufbereich verfeinert (Abb. 63), das bedeutet, dass in dem Bereich die Anzahl der ursprünglichen Netzelemente nahezu vervierfacht wurde. Mit diesem Netz wurden alle Versuche berechnet und mit den physikalischen Ergebnissen verglichen.

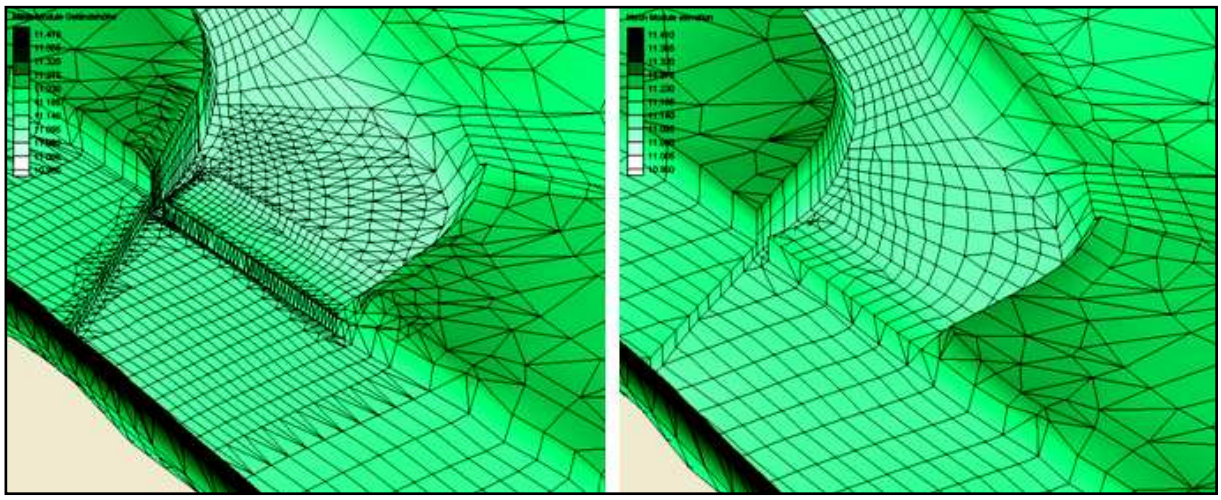


Abb. 63: Darstellung der Netzelemente im Einlaufbereich. Links mit dem verfeinerten Netz. Rechts vor der Netzänderung.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die numerische Simulation gute Ergebnisse bezüglich des Geschiebetransports gibt. Das Geschiebe wandert über das Streichwehr und die Geschiebegasse in den Nebenarm. Nur in Detailbereichen, wie dem Einlaufbereich, kommt es zu Unterschieden. Durch die Verfeinerung des Netzes (Abb. 63) in diesem Bereich konnte weder die Sedimentation beseitigt, noch ein genereller Einfluss der höheren Netzdichte nachgewiesen werden. Ein Einfluss der Netzgeometrie kann daher ausgeschlossen werden. Das in Abbildung 64 dargestellte Strömungsbild stimmt gut mit den Beobachtungen des physikalischen Modellversuchs überein. Es bilden sich größere Kehrströmungen aus, die durch Farbversuche im physikalischen Modell bestätigt werden können. In Abbildung 65 sind die Strömungslinien des Einlaufbereiches und deren Fließgeschwindigkeiten dargestellt. Durch den Wirbel kommt es zu lokal geringen Fließgeschwindigkeiten (in der Abb. 65 entspricht der rote Bereich einer Geschwindigkeit von 0,0 bis 0,3 m/s). Anhand von Fließgeschwindigkeitsmessungen in einzelnen Profilen kann

auch hier eine sehr gute Übereinstimmung der mittleren Fließgeschwindigkeiten im numerischen und physikalischen Modell nachvollzogen werden.

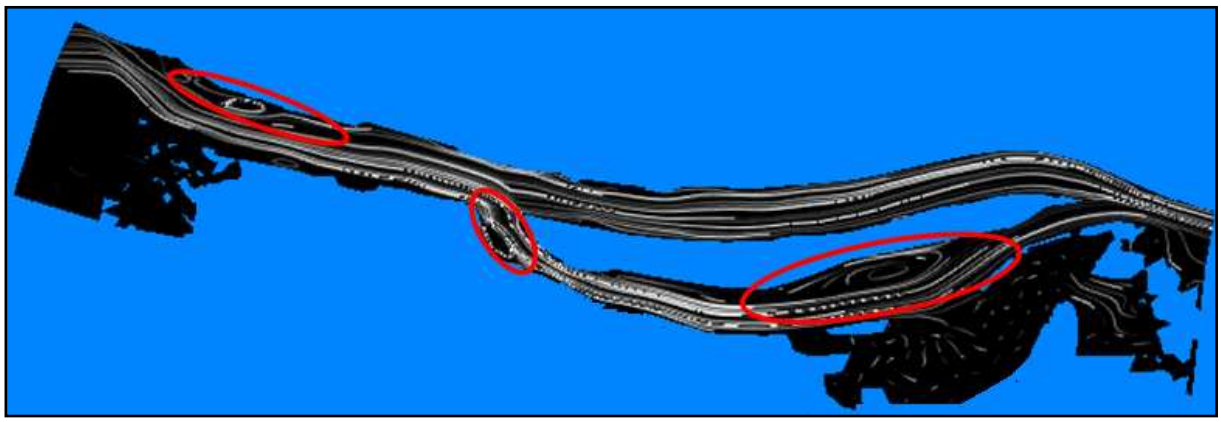


Abb. 64: Darstellung des Strömungsbildes (Flow Trace) des HQ1 Versuches mit rot markierten Bereichen von Kehrströmungen.

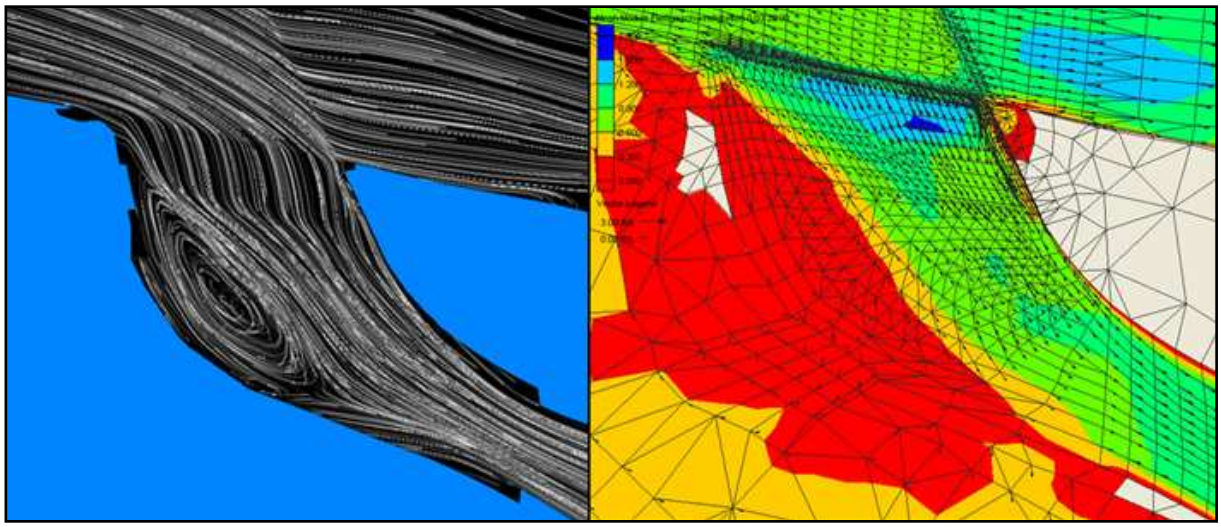


Abb. 65: Links: Darstellung des Strömungsbildes (Flow Trace) im Einlaufbereich. Rechts: Selber Bereich mit Geschwindigkeitsvektoren und der Strömungsgeschwindigkeit in einer farblichen Zonierung

Durch das Streichwehr kommt es zu einer Änderung der Abflussverhältnisse, es findet ein Übergang von strömend zu schießend statt. In der Abbildung 66 sind jeweils für die einzelnen Versuche die Froude-Zahlen *Fr* je Knotenpunkt, jeweils zu Beginn und Ende der Versuchsdurchführung dargestellt. Die roten Flächen stellen Bereiche mit schießendem Abfluss dar. Es ist ersichtlich, dass der sich durch das Streichwehr bildende schießende Abfluss bereits auf der Streichwehrrampe oder am Ende der Streichwehrrampe in den strömenden Zustand wechselt und kurz nach der Nebenarmkrümmung in einer Engstelle ein weiterer Übergang vom strömenden hin zum schießenden Abfluss stattfindet. Bei den

Beobachtungen des physikalischen Modellversuchs konnte der erste schießende Abfluss und dessen Grenze ebenfalls durch einen klar ausgeprägten Wechselsprung nachvollzogen werden. Der zweite Bereich mit schießendem Abfluss wurde ebenso durch das physikalische Modell bestätigt. Allerdings zeigte sich bei Abflüssen größer als HQ1 im physikalischen Modell der schießende Bereich geringer als in den dargestellten Froude-Zahlen.

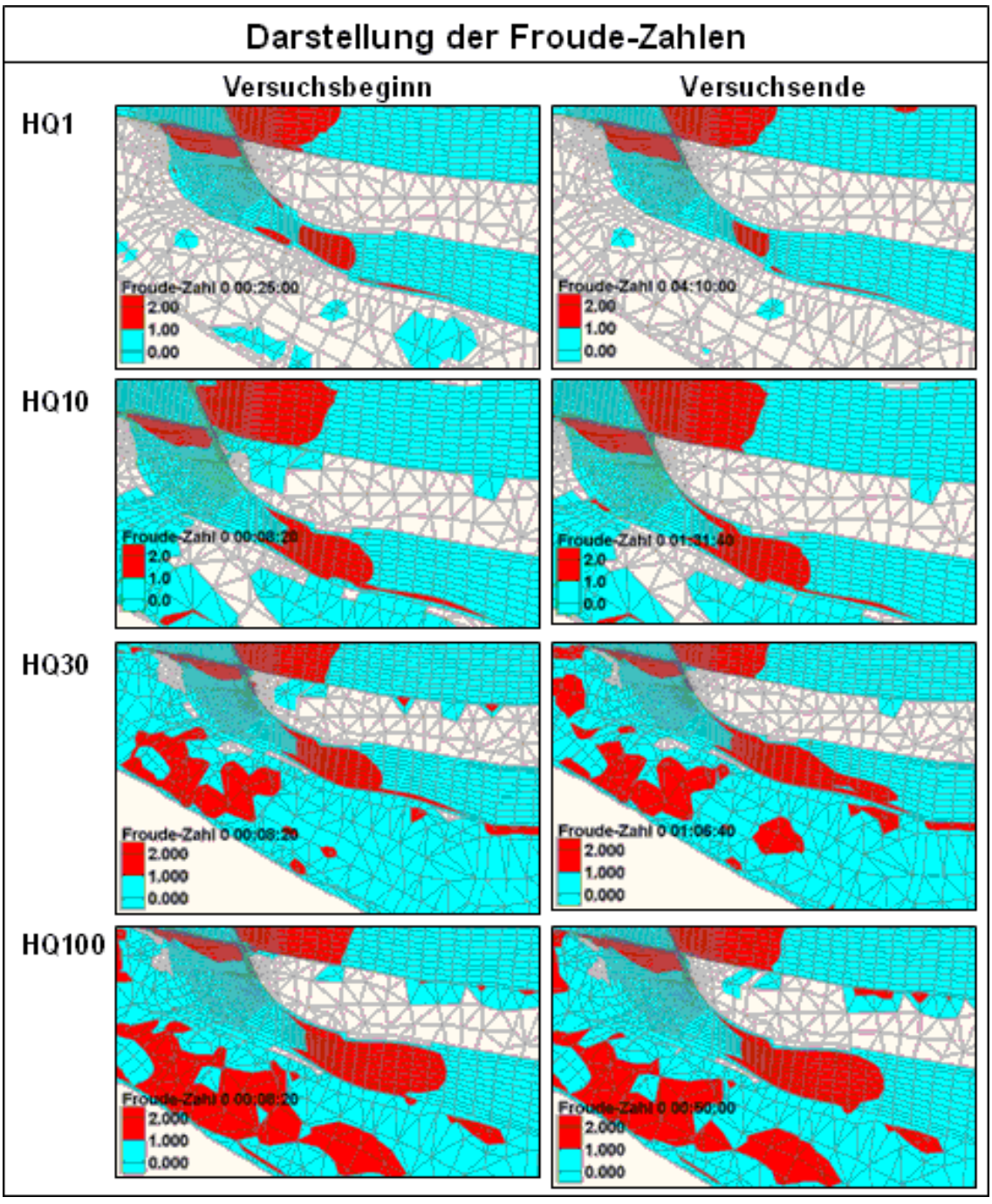


Abb. 66: Froude-Zahlen der einzelnen Versuche zu Beginn und Ende der Versuchsdauer

Für den HQ30 Versuch wurden die Sohlschubspannungen τ ermittelt und in Abbildung 67 dargestellt. Darin sind die Bereiche die größten τ-Werte, bis zu 19 kN/m², auf der Streichwehrrampe zu finden. Begründet durch den bereits angesprochenen größeren schießenden Bereich und den dadurch höheren Schubspannungen nach der Einlaufkrümmung kommt es zu einer deutlichen Trennung der Sedimentationsbereiche.

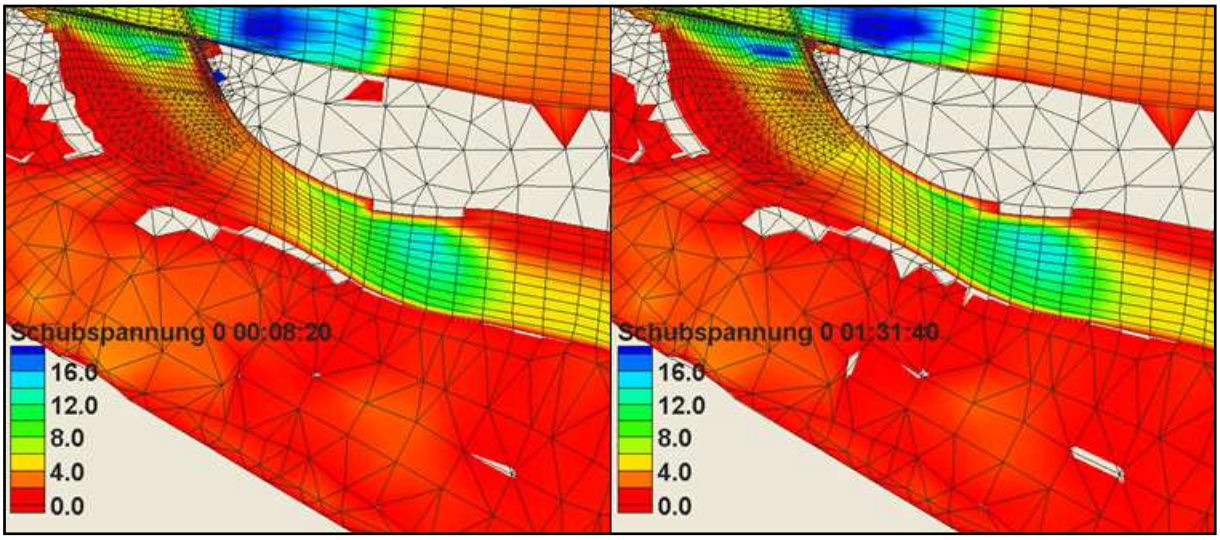


Abb. 67: Sohlschubspannungen (kN/m²) zu Beginn (links) und Ende (rechts) des HQ30 Versuches

Mittels der Formel 2.11 wurde die kritische Sohlschubspannung τ_{Gr} mit einem Wert von 0,154 kN/m² ermittelt. Zur besseren graphischen Abgrenzung sind in Abbildung 68 (rechts) nur Schubspannungen größer τ_{Gr} farblich dargestellt. Demgegenüber wurden die Geschiebeablagerungen gestellt.

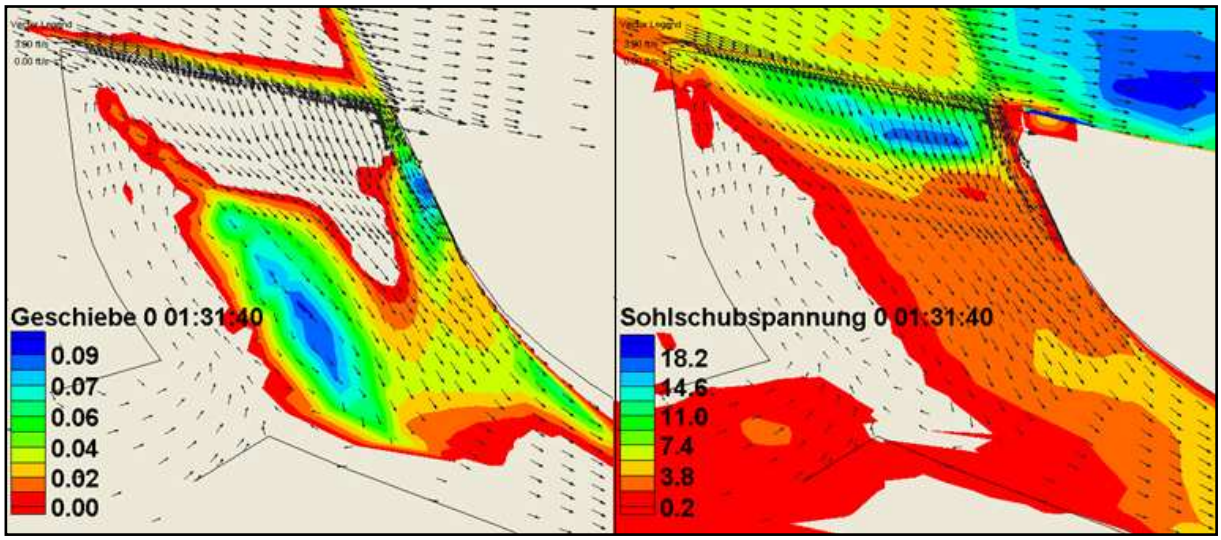


Abb. 68: Geschiebeablagerung (links) und Sohlschubspannung τ dargestellt ab τ_{Gr} mit 0,154 kN/m² (rechts) für den HQ30 Versuch mit Geschwindigkeitsvektoren

Die vorangegangen Abbildungen geben eine plausible Erklärung für die Ablagerungen im numerischen Modell. Dennoch kommt es im physikalischen Modellversuch zu keinen sofortigen Ablagerungen im Nebenarm, diese tritt erst aufgrund der rückschreitenden Sedimentation ein. Die Ursache hierfür wird in der starken Turbulenz des Einlaufbereiches vermutet. Durch die Bauwerke, Streichwehr und Geschiebegasse, wird die Strömung um nahezu 90° umgelenkt. Zusätzlich wird, bei einem Du rchfluss größer HQ1, die Strömung von Vorlandabflüssen beeinflusst (siehe Strömungsvektoren Abb. 68). Nach KUHLMANN (2007) wird der Transport von Impuls, Wärme und Konzentration durch die starke Fluktuation des Geschwindigkeitsfeldes in einer turbulenten Strömung sehr verstärkt. Durch diese Wirbel wird im physikalischen Modell der Sand nicht abgelagert sondern weiter transportiert. Die beste Lösung für ein derartiges Problem, wäre die direkte Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen (siehe Kapitel 2.9). Diese sogenannte direkte numerische Simulation (DNS) erfordert einen extrem hohen numerischen Aufwand (KUHLMANN, 2007). Diese Erkenntnisse bestätigen auch die genannten Einsatzbereiche hydraulischer und numerischer Modelle von JUGOVIC (2005) und sprechen für einen Einsatz von physikalischen Modellversuchen bei komplexen Strömungsverhältnissen.

Der geringere Wirkungsgrad der Geschiebefalle im numerischen Modell, basiert in den Ablagerungen im Einlaufbereich. Aufgrund von Rückstaueffekten wird weniger Material in den Nebenarm transportiert. Dieses Verhalten wurde auch in unterschiedlichen physikalischen Versuchen festgestellt.

Trotz der genannten Abweichungen in den lage- und höhenmäßig dargestellten Ablagerungen wurde gezeigt, dass die numerische Modellierung mittels HYDRO_GS-2D den Geschiebetransport und die Effektivität der Geschiebefalle gut nachbilden kann. So kann im Vergleich zu einem physikalischen Modellversuch, relativ rasch eine Aussage getroffen werden, ob eine Geschiebefalle mit diesem Dimensionen, der lokalen Situierung und den gewählten Einlaufbauwerken grundsätzlich funktioniert. Zu berücksichtigen sind in jedem Fall bei allen, auch dreidimensionalen, numerischen Modellen (ZENG et al., 2008) die mathematischen Grundlagen, die derzeit weder die Gesamtheit der auftretenden Strömungen noch den davon abhängigen Geschiebetransport, in Abhängigkeit von der Situation, in seiner vollen Komplexität nachbilden können.

Ein zukünftiger Forschungsschwerpunkt des physikalischen Modellversuchswesens sollte in detaillierten Aufzeichnungen und Untersuchungen des Geschiebetransportes mit unterschiedlichen Kornfraktionen und dessen Sedimentations- und Erosionsverhalten in oben genannten komplexen Strukturen sein. Diese Ergebnisse sind notwendig um numerische Geschiebetransportmodelle zu überprüfen, aber auch dafür, die Modelle daran zu kalibrieren.

Ein Modell stellt immer nur ein Abbild der Natur mit einer Reihe von Annahmen und Vereinfachungen dar, so auch das physikalische. Ein weiteres Ziel zukünftiger Untersuchungen sollte daher auch der Vergleich mit in der Natur stattfindenden Geschiebeereignissen sein.

Im Kapitel 2 wurde Geschiebe und dessen Transport erläutert. Die Herausforderung für die weitere Entwicklung von HYDRO_GS-2D stellt die weitere Berücksichtigung oben angeführter Vorgänge dar. Vorrangig für einen weiteren Einsatz der Software ist vor allem die Erweiterung auf fraktionierten Geschiebetrieb. Ebenso die Berücksichtigung einer Deckschicht mit einer zur Unterschicht differenten Kornzusammensetzung muss in zukünftige Berechnungen Eingang finden. Beide Ziele sollen lt. NUJIC (2008) im Herbst 2008 in HYDRO_GS-2D integriert sein. Zum einen die Erweiterung auf mehrere Fraktionen ähnlich dem fraktionierten Schwebstoffstransport im Modul HYDRO_ST-2D und zum anderen die Zwei-Schichten Technik.

Der Einsatz der Software HYDRO_GS-2D erfordert viel Wissen und Erfahrung auf dem Gebiet der Geschiebesimulation, womit abschließend auf den Satz von Leonardo da Vinci (1452 – 1519) verwiesen sei:

„Bei Abhandlungen über das Wasser sei stets die experimentelle Erfahrung voranzustellen."

7. Literaturverzeichnis

BEFFA, C. J. (1994): Praktische Lösung der tiefengemittelten Flachwassergleichungen, Mitteilungen der VAW, Nr. 133, Zürich.

DVWK – Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (1992) Geschiebemessungen, DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 127/1992, Verlag Paul Parey, Hamburg.

DVWK – Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (1999) Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern, DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 127/1999, Wirtschafts- Verl.-Ges. Gas und Wasser, Bonn.

DVWK – Deutscher Verband für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2003) Feststofftransportmodelle für Fließgewässer. ATV-DVWK-Arbeitsbericht, Arbeitsgruppe WW-2.4.

GESSLER, J. (1965): Der Geschiebetriebbeginn bei Mischungen untersucht an natürlichen Abpflästerungserscheinungen in Kanälen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasser- und Erdbau. ETH Zürich. Nr. 69.

GLAZIK, G. (2000): Geschiebe und Schwebstoffbewegung in offenen Gerinnen, Technische Hydrodynamik, Band 1, Bollrich G., Verlag Bauwesen Berlin

GUNZ, C., (2004): Hochwasserstudie Stadt Steyr, Technischer Bericht

GÜNTER, A. (1971): Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen. Mitteilungen der VAW. Nr. 3. ETH Zürich

HABERSACK, H. (1997): Raum-zeitliche Variabilitäten im Geschiebehaushalt und dessen Beeinflussung am Beispiel der Drau. Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer. Band 144.

HABERSACK, H. (2007): Feststoffhaushalt und Flussmorphologie, Studienblätter, IWHW – Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau. Universität für Bodenkultur Wien.

HJULSTRÖM, F. (1935): Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris, Bulletin of the Geological Institution of the University of Upsala.

JÄGGI, M. (1992): Sedimenthaushalt und Stabilität von Flussbauten, Mitteilung der VAW, Nr. 119. Zürich.

JUGOVIC, C.J. (2005): Studienblätter zu Wasserbauliches Modellversuchswesen. IWHW – Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau. Universität für Bodenkultur Wien.

KNIGHTON, D. (1998): Fluvial Forms and Processes. Rivers. London (Arnold).

KOLOSEUS, R. (2008): Variantenuntersuchung mittels physikalischen Modellversuchs zum Hochwasserschutz an der Steyr, Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur

KRESSER, W. (1964): Gedanken zur Geschiebe- und Schwebstofffführung der Gewässer. Österr. Wasserwirtschaft 16, H. 1/2.

KUHLMANN, H. C. (2007): Numerische Methoden der Strömungsmechanik, Studienblätter, Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung. TU Wien.

LFU (2003): Hydraulik naturnaher Gewässer. Teil 4 – Numerische Modelle zur Strömungssimulation. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe.

MANGELSDORF & SCHEURMANN, (1980): Flussmorphologie – Ein Leitfaden für Naturwissenschaftler und Ingenieure. Oldenbourg Verlag.

MEYER-PETER, E., MÜLLER, R. (1949): Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs, Schweizer Bauzeitung, 67. Jahrgang, Nr. 3, Bern.

NACHTNEBEL, H.-P. (2002): Gewässerkunde und Hydrometrie, Studienblätter, IWHW – Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau. Universität für Bodenkultur Wien.

NACHTNEBEL, H.-P. (2003): Hydrologie, Studienblätter, IWHW – Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau. Universität für Bodenkultur Wien.

NUJIC, M. (1998): Praktischer Einsatz eines hochgenauen Verfahrens für die Berechnung von tiefengemittelten Strömungen. Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München. Heft 62/1998. München.

NUJIC, M. (2003): HYDRO_AS-2D ein zweidimensionales Strömungsmodell für die wasserwirtschaftliche Praxis, Benutzerhandbuch.

NUJIC, M. (2007): HYDRO_GS-2D, 2d-Geschiebetransportmodell, Arbeitsblatt Geschiebe

NUJIC, M. (2008): Anwendertreffen HYDRO_AS-2D, Niederschrift der präsentierten Berichte vom 11.März 2008 an der Universität der Bundeswehr München

ÖWAV (2006): Arbeitsausschuss „Fließgewässermodellierung“ – Arbeitsbehelf Hydrodynamik. Grundlagen, Anwendung und Modelle für die Praxis.

ÖWWV (1992): Schutzwasserbau Gewässerbetreuung Ökologie, Grundlagen für wasserbauliche Massnahmen an Fliessgewässern. Österreichischer Wasserwirtschaftsverband Fachgruppe „Wasserbau und Ökologie“, Arbeitsausschuss „Schutzwasserbau“, Herausgeber: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft gemeinsam mit ÖWWV. Wien.

PARK, J.-H. (2003): Ein konservatives MPV-Verfahren zur Simulation der Strömungen in allen Machzahlbereichen. Dissertation. Institut für Aero- und Gasdynamik der Universität Stuttgart.

PATT, H., JÜRGING, P., KRAUS, W. (1998): Naturnaher Wasserbau – Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern. Springer – Verlag. Berlin, Heidelberg, New York.

RIBBERINK, J. (1987): Mathematical modelling of one-dimensional morphological changes in rivers with non-uniform sediment. Ph.D. thesis at Delft University of Technology. Niederlande.

SCHWANENBERG, D. (2003): Die Runge-Kutta-Diskontinuous-Galerkin-Methode zur Lösung konvektionsdominierter tiefengemittelter Flachwasserprobleme. Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

SCHRÖDER, R., ZANKE, U., (1994): Technische Hydraulik. Kompendium für den Wasserbau. 2. Auflage. Springer Verlag.

SCHUSTER, G. (2006): Optische Auswertung von Verlandungen in Stauräumen an hydraulischen Modellen. Diplomarbeit, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau. Universität für Bodenkultur Wien.

SENDZIK, W. (2003): Fraktionierung von Geschiebetransportraten in morphodynamisch-numerischen Modellen. Diplomarbeit, Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen. Universität Hannover.

SHIELDS, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung, Mitteilungen Heft 26, Preuss. Versuchsanstalt für Wasser- und Schiffbau, Berlin.

VISCHER, D. (1981): Verlandung von Flussstauhaltungen und Speicherseen. Mitteilung VAW Nr. 53.9-26.

VISCHER, D., HUBER, A. (2002): Wasserbau – Hydrologische Grundlagen, Elemente des Wasserbaus, Nutz- und Schutzbauten an Binnengewässern, 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

ZANKE, U. (1982): Grundlagen der Sedimentbewegung. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York

ZANKE, U. (1990): Der Beginn der Geschiebebewegung als Wahrscheinlichkeitsproblem, Wasser und Boden, Heft 1.

ZEPP, H. (2002): Grundriss Allgemeine Geographie: Geomorphologie. UTB für Wissenschaft; Bd. 2164. Paderborn, München, Wien, Zürich, Schöningh.

ZENG J., CONSTANTINESCU G., WEBER L. (2008): A 3D non-hydrostatic model to predict flow and sediment transport in loose-bed channel bends, Journal of Hydraulic Research Vol. 46, No. 3 (2008), pp. 356–372