

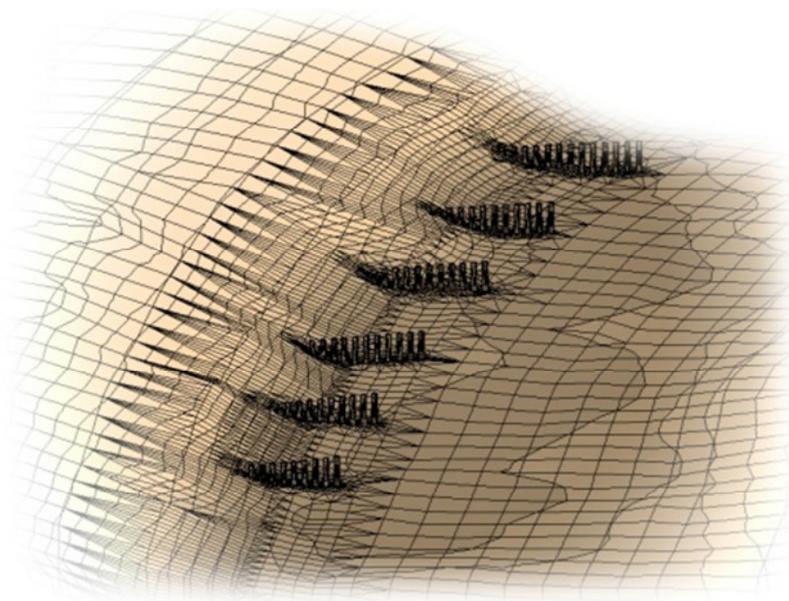
Universität Stuttgart



Institut für Wasserbau
Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft

Diplomarbeit

Zweidimensionale Modellierung verschiedener Buhnsysteme



Erstleser: PD Dr.- Ing. Walter Marx
Zweitleser: Dr.- Ing. Sven Hartmann, AOR
Betreuer: Jeffrey Tuhtan, M. Sc.
Dipl.- Ing. Matthias Kramer

vorgelegt von: Stephanie Geiger
Matrikelnummer: 2286602
Datum: November 2010

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Diplomarbeit selbstständig ohne Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe. Alle den benutzten Quellen wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit ist bislang keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht worden.

Bietigheim-Bissingen, den _____ Unterschrift: _____

Danksagung

Bei der Anfertigung der vorliegenden Diplomarbeit wurde ich von vielen Seiten direkt oder indirekt unterstützt, wofür ich mich an dieser Stelle recht herzlich bedanken möchte. Namentlich erwähnt sei dabei in erster Linie meine Betreuer Jeffrey Tuhtan, der durch seine vielen wertvollen Anregungen im Rahmen gemeinsamer Diskussionen und seine ständige Hilfsbereitschaft sehr zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen hat, und Matthias Kramer für seine Unterstützung bei der Vermessung, sowie für seine Hinweise, die neue Lösungsansätze aufzeigten.

Ebenso gilt Herrn PD Dr.- Ing. Walter Marx mein besonderer Dank für die Vergabe dieser interessanten Aufgabenstellung und für seine Betreuung während meiner Diplomarbeit.

Des Weiteren danke ich Herrn Dr.- Ing. Sven Hartmann für seine Unterstützung.

Auch genannt seien ausnahmslos alle Mitarbeiter des Instituts für Wasserbau, die das Forschen und Arbeiten in einem sehr angenehmen Klima ermöglicht haben.

Einen weiteren Dank möchte ich an Dominik Sander richten, der mich bei der Erstellung der Grafiken und des Layouts unterstützt hat.

Abschließend möchte ich mich herzlichst bei meinen Eltern, meiner Schwester und meinen Freunden bedanken, die mir während meines Studiums und der Erstellung dieser Diplomarbeit stets den für mich so wichtigen Rückhalt gegeben haben. Ihre großzügige Unterstützung und fortwährende Motivierung hat maßgeblich zum erfolgreichen Gelingen meines Studiums beigetragen.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	2
Danksagung	3
Inhaltsverzeichnis	4
1 Einleitung	6
Abschnitt 1 Theorie	
2 Buhnen in Fließgewässern	8
2.1 Definitionen und Eigenschaften	8
2.1.1 Anordnung von Buhnen	9
2.1.2 Aufbau von Buhnen	11
2.2 Hydraulik in Buhnenfeldern	12
2.2.1 Strömungsmuster bei Niedrigwasser	14
2.2.2 Strömungsmuster bei Hochwasser	16
2.2.3 Strömung durch Pfahlbuhnen	16
2.3 Morphologie in Buhnenfeldern	17
2.3.1 Allgemein	17
2.3.2 Sedimenttransport	18
2.4 Ökologie in Buhnenfeldern	21
Abschnitt 2 Fallstudie	
3 Erfassung der Felddaten	23
3.1 Das Untersuchungsgebiet	23
3.2 Die Bestandsdaten	24
3.3 Erhebung der Felddaten	26
3.3.1 Vermessung der Geländeoberfläche	26
3.3.2 Sedimentproben	26
3.4 Verarbeitung der Daten	28
4 Numerische Modellierung	31
4.1 SRH-2D	31
4.1.1 Hydraulik	31
4.1.2 Sedimenttransport	32
4.1.3 Module für die Modellierung	33
4.2 Modellkalibrierung	34
4.2.1 Allgemein	34

4.2.2	Verfeinerung des Netzes	35
4.3	Sensitivitätsanalyse	39
4.3.1	Reduzierung der Sedimentklassen	40
4.3.2	Anpassungslänge an den Gleichgewichtszustand	42
4.3.3	Aktive Schicht	46
5	Ergebnisse	50
5.1	Hydraulische Modellierung	50
5.1.1	Problembehandlung	50
5.1.2	Fließgeschwindigkeiten	52
5.1.3	Wassertiefen	60
5.2	Morphologische Modellierung	65
5.2.1	Problembehandlung	65
5.2.2	Shields Parameter	67
5.2.3	Erosion	69
5.3	Zusätzliche Modellierungen	74
6	Zusammenfassung und Ausblick	78
	Abbildungsverzeichnis	80
	Tabellenverzeichnis	83
	Literaturverzeichnis	84
	Anhang	86
Anhang A	Siebkurven	86
Anhang B	Modellierungsmodule	88
Flow Modul	88
Morph Modul	89
Mobile Modul	91
Anhang C	Reduzierung der Sedimentklassen	93
Anhang D	Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten	94
Anhang E	Strömungsmuster	96
Anhang F	Shields Parameter	98

1 Einleitung

Zur Stabilisierung des Wasserstandes bei Mittel- oder Niedrigwasser werden in Fließgewässern Regulierungsbauwerke wie Leitwerke oder Buhnen errichtet. Leitwerke sind dammartige Erdaufschüttungen, die parallel zum Ufer gebaut werden. Buhnen hingegen werden vom Ufer aus quer zur Strömung in Richtung Flussmitte positioniert. Der Buhnenbau in Fließgewässern wurde bereits im 18. Jahrhundert zur Ufersicherung eingesetzt (von Münnich, 1713). Allerdings unterscheiden sich die Bauarten zur heutigen Zeit. Zum Beispiel veröffentlichte 1888 die oberste königlich-bayerische Baubehörde im Fachbuch „Der Wasserbau an den öffentlichen Flüssen im Königreich Bayern“ folgende Beschreibung zum Bau einer Buhne:

„Baubüsche. Der Baubusch dient hauptsächlich zur raschen und meist wirksamen Verhinderung grösserer Schäden bei beginnenden Uferabbrüchen und besteht aus dem 4 bis 8 m langem in den Fluss eingehängtem Zopf- oder Gipfelende einer Tanne oder Fichte, oder aus Erlen- und Pappelbäumen sammt Aesten.“ (Königliche Oberste Baubehörde im Staatsministerium des Innern, 1888)

Bis zur heutigen Zeit ist es in Fließgewässern üblich Buhnen aus großen Steinquadern oder aus Beton zu bauen. Im Gegensatz dazu wird im Küstengebiet der Einsatz von Pfahlbuhnen als Schutz vor Abtragung bevorzugt. Diese durchlässige Bauart vermeidet die normalerweise entstehenden Totzonen durch abgeschwächte Längsströmungen zum Ufer. Untersuchungen und Experimente zum Küstenschutz durch Buhnen wurden in Deutschland (Trampenau, 2000) und in den Niederlanden (Perdok, 2002) durchgeführt. Die Auswirkungen von Buhnen in Fließgewässern standen im Blickpunkt der Arbeiten von Yossef (2002) und Wirtz (2004). Eine Zusammenfassung des Hintergrundwissens und der Stand der Technik veröffentlichte Yossef (2002) in einer Literaturstudie über die Auswirkungen von Buhnen. Wirtz (2004) analysierte Abschnitte der Elbe im Hinblick auf die Hydraulik und Morphologie, sowie der Ökologie der Buhnenfelder.

Den Einsatz von durchlässigen Pfahlbuhnen in Fließgewässern wurde von Uijttewaal (2005) und Castillo Rodriguez (2008) untersucht. In den Laborexperimenten von Uijttewaal stand die Bauart der Buhnen im Mittelpunkt. Er zeigt die Auswirkungen der Bauarten mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten auf die Fließgeschwindigkeiten in den Buhnenfeldern. Castillo Rodriguez untersuchte den Einsatz von Pfahlbuhnen im Hafengebiet, um den Sedimenteintrag in das Hafenbecken zu reduzieren. Dabei wurden die Ergebnisse der Laboruntersuchung mit denen der numerischen Modellierung verglichen.

In dieser Diplomarbeit sollen die Auswirkungen auf die Hydraulik und die Morphologie des Buhnenbaus, im Speziellen die von Pfahlbuhnen in Fließgewässern, durch eine numerische Modellierung qualitativ aufgezeigt werden.

Die Studie wird in zwei Teile gegliedert. Zu Beginn wird die Theorie der Buhnen im Hinblick auf die Bauarten, die Hydraulik und die Morphologie in den Buhnenfeldern dargestellt. Der zweite Teil befasst sich mit der Erhebung von Daten und deren Verarbeitung, sowie die numerische Modellierung. Als Vorlage dient ein Gewässerabschnitt des Neckars bei Freiberg am Neckar, der mit den Varianten ohne Buhneneinbauten, mit undurchlässigen Buhnen und durchlässigen Pfahlbuhnen untersucht wird.

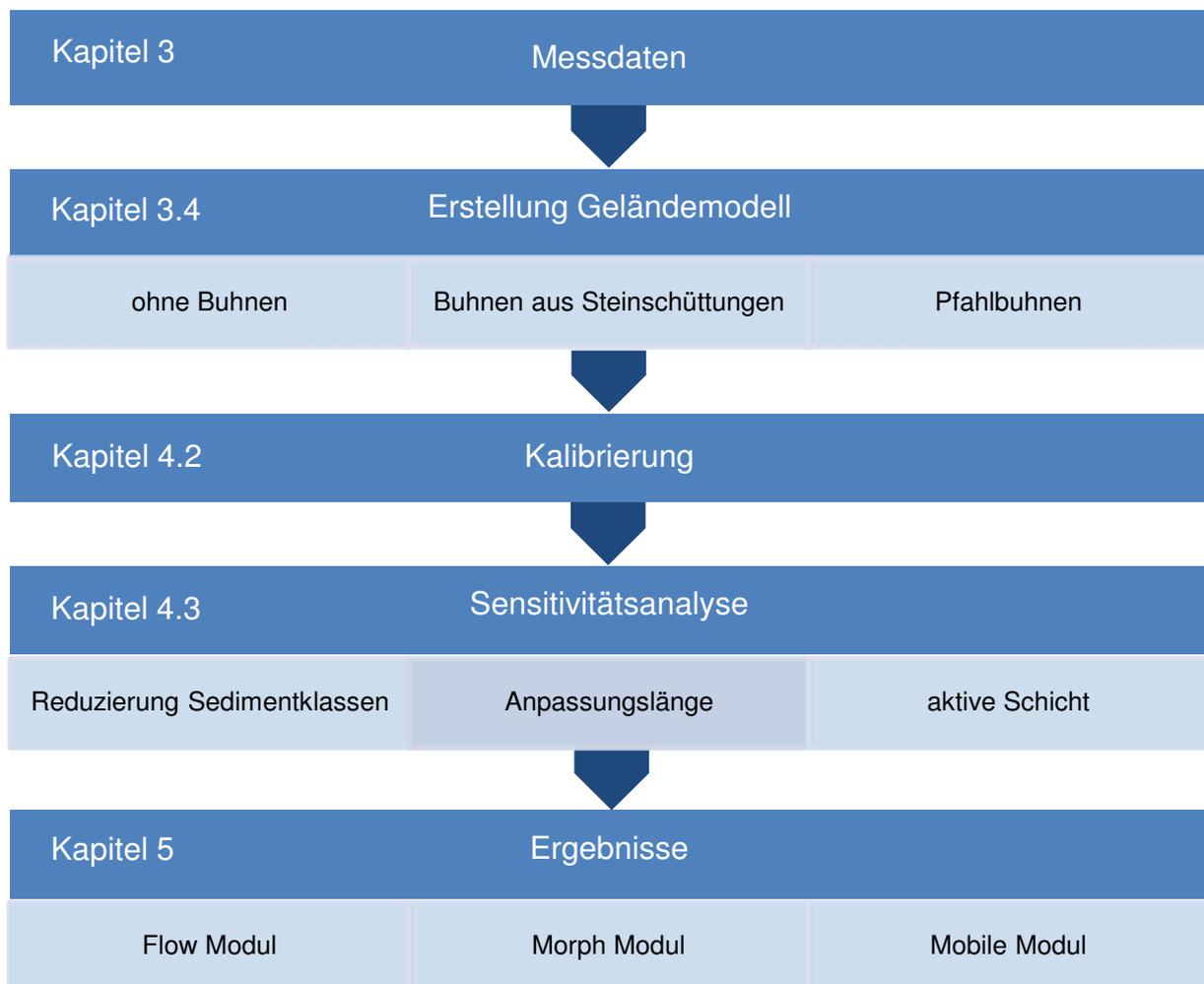


Abbildung 1.1 Übersicht der Modellierung

Abschnitt 1 Theorie

2 Buhnen in Fließgewässern

2.1 Definitionen und Eigenschaften

Buhnen zählen zu Flussbauwerken, die die Dynamik eines Fließgewässers erheblich beeinflussen. Um eine weitere Ausbreitung des Gewässers durch Abtragung des Ufers zu verhindern, werden Buhnen zur Stabilisierung eingesetzt. Diese stellen eine Alternative zu kostenintensiveren Leitwerken und Uferverbauungen dar. Während Leitwerke dem Fluss eine sichere und stetige Führung an Stellen mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten geben, wird die Streichlinie durch Buhnen nur punktuell fixiert (Schröder, 2001). Darüber hinaus werden Buhnen wegen ihrer ökologischen Vorteile bevorzugt eingesetzt. Ein weiterer Vorteil der Buhnen ist die Einengung der Fahrrinne für Schiffe bei Niedrig- oder Mittelwasser, wodurch eine Erhöhung des Wasserstandes in der Fahrrinne bewirkt wird. Die Fließgeschwindigkeit wird in der Fahrrinne erhöht, was wiederum zu einer Vertiefung der Fahrrinne durch eine erhöhte Sohlschubspannung führt (Wieprecht, 2008). Dies hat z. B. einen Vorteil für die Schifffahrt, wodurch Schiffe mit mehr Tiefgang den Fluss passieren können.

Ein Nachteil entsteht jedoch bei Hochwasser. Durch die Querschnittsverengung und schnellere Fließgeschwindigkeit wird das Rückhaltevermögen reduziert, wodurch eine Abflachung der Spitzenabflusskurve nicht mehr möglich ist. Abflussspitzen werden schneller flussabwärts getragen und können dort große Überschwemmungen mit Schäden anrichten. Eine weitere negative Auswirkung hat das Hochwasser auf die Buhne selbst. Durch den erhöhten Wasserstand werden die Buhnen überspült. Die hohen Fließgeschwindigkeiten am Buhnenkörper verursachen Schäden, deren Sanierung Kosten verursachen. Mit der Überspülung der Buhnen erhöht sich auch die Fließgeschwindigkeit im Buhnenfeld. Dort wird das abgelagerte, eventuell auch kontaminierte Sediment mobilisiert und flussabwärts gespült (Westrich, 1988).

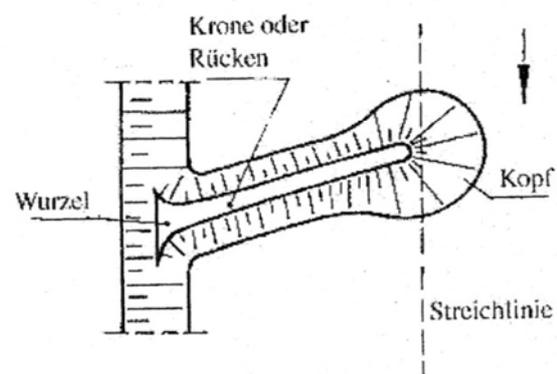


Abbildung 2.1 Grundriss einer Buhne (Schröder, 2001)

Buhnen bestehen aus der Buhnenwurzel, dem Buhnenrücken und dem Buhnenkopf (Abbildung 2.1).

Die Buhnenwurzel ist mit dem Ufer verbunden, um Umspülungen zu vermeiden. Der Buhnenrücken besteht einerseits aus einer Streichseite, die eine Neigung von 1:2 oder 1:3 besitzt. Andererseits hat der Buhnenrücken eine Rückseite mit der Neigung 1:2 bis 1:4. Der gesamte Buhnenkörper hat ein Gefälle zur Flussachse von 0,5 – 1 %. Der Buhnenkopf sollte wegen der hohen Reparaturkosten gegen Zerstörung durch das Wasser gesichert sein. Er besitzt eine Neigung von 1:4 bis 1:5 (Wieprecht, 2008).

2.1.1 Anordnung von Buhnen

Die Anordnung der Buhnen kann als inklinant, deklinant oder als Knickbuhne erfolgen.

Die inklinante Anordnung (Abbildung 2.2) ist sehr verbreitet. Die Buhne wird gegen den Strom gerichtet und leitet die Strömung zur Flussachse hin. Das Ufer wird so vor Erosion geschützt, da im nicht überströmten Zustand zwischen den Buhnen ein strömungsberuhigtes Feld entsteht.

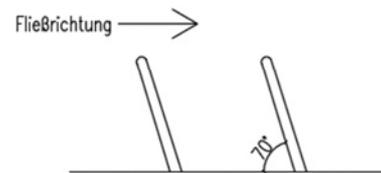


Abbildung 2.2 Inklinante Anordnung

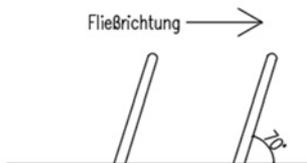


Abbildung 2.3 Deklinante Anordnung

Bei der deklinanten Anordnung (Abbildung 2.3) wird die Buhne stromabwärts gerichtet. Diese Ausrichtung hat den Nachteil, dass die Strömung auf das Ufer geleitet wird und dort Schaden anrichtet.

Die Knickbuhne (Abbildung 2.4) ist eine Kombination aus der inklinanten und der deklinanten Anordnung. An der Buhnenwurzel ist die Anordnung inklinant, am Buhnenkopf deklinant.

Der Abstand der Buhnen ergibt sich dadurch, dass die Strömung am Buhnenkopf sich unter einem Winkel von 6° ablösen und die darauffolgende Buhne etwa mittig treffen soll. Der Abstand kann mit folgender Gleichung berechnet werden.

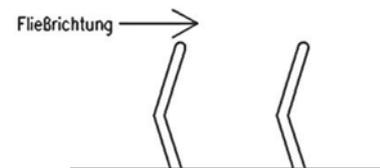


Abbildung 2.4 Knickbuhne

$$l_{ab} = \frac{1}{2} \times b_B \times \cot \alpha = 4,75 \times b_B$$

Gleichung 2.1 Buhnenabstand nach (Lattermann, 1999)

l_{ab}	[m]	Abstand der Buhnen
b_B	[m]	Abstand des Buhnenkopfes zum Ufer
α	[-]	Einströmwinkel

In Schifffahrtsstraßen sollte der maximale Abstand der Buhnen nicht breiter als ein bis zwei Flussbreiten sein, damit sich im schiffbaren Bereich eine gleichmäßige Strömung einstellt (Wieprecht, 2008).

Untersuchungen für zukünftige Anordnungen wurden von van Heereveld und Zijlstra (2007) durchgeführt, die sich auf die Bauart Island und Louvre (Abbildung 2.5) beschränken.

Die Island Buhne ist eine Knickbuhne mit einer Öffnung von ca. 60 m² nahe dem Buhnenkopf, an dem die Fließgeschwindigkeit am Größten ist. Der Buhnenkopf wird in Fließrichtung verlängert. Durch die Öffnung wird der Aufstau des Wasserspiegels

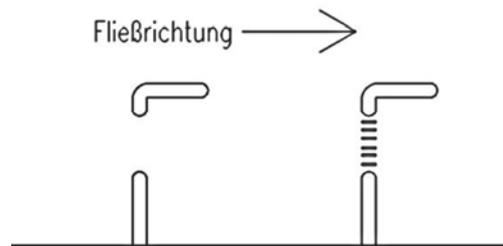


Abbildung 2.5 Island Buhne (links) und Louvre Buhne (rechts)

auf Grund des Buhnenkörpers verringert und etwa 300 Tage im Jahr um circa sieben cm gesenkt.

Die Louvre Buhne ist von der Bauart gleich der Island Buhne, nur dass in der Öffnung der Louvre Buhne vertikale Elemente verbaut sind, die einen Einfluss auf die Abflussverteilung haben.

Ein Vorteil beider Bauarten ist, dass bei niedrigeren Wasserständen sich die Sedimente durch die langsamere Fließgeschwindigkeiten in den Buhnenfeldern anstatt im Flussschlauch absetzen. Des Weiteren werden die strömungsbedingten Eintiefungen reduziert.

Pfahlbuhnen sind einzelne Pfähle, die in einer Reihe aufgestellt sind (Abbildung 2.6). Der Abstand zwischen den einzelnen Pfählen und der der Pfahlreihen können variieren (Raudkivi, 1996). Der Abstand der einzelnen Pfähle beeinflussen die Durchlässigkeit der Pfahlbuhnen und die Längsströmung. Der Abstand kann gleichbleibend über die Buhnenlänge sein oder von der Uferseite in Richtung Flussmitte größer werden.

Im Küstenbereich werden Pfahlbuhnen meist senkrecht zur Uferlinie gebaut, jedoch ist eine gewinkelte Anordnung ebenfalls möglich.

Der Abstand von Pfahlbuhnen in Fließgewässern wird wie bei undurchlässigen Buhnen mit ein bis zwei Mal der Buhnenlänge gewählt (Cao, 2007). Die Pfahlbuhnen reduzieren den Strömungsgradient zwischen Flussmitte und Ufer im Vergleich zu undurchlässigen Buhnen. Dies führt zu einer niedrigeren Sedimentationsrate in den Buhnenfeldern (Castillo Rodriguez, 2008).



Abbildung 2.6 Fotografie von Darren Burton: Pfahlbuhnen an der Küste von Bawdsey, England

2.1.2 Aufbau von Buhnen

Bei der geschlossenen, undurchlässigen Ausführung besteht der Buhnenkörper aus einer Kiesschüttung. Der Buhnenkopf und die Flanken werden wegen der Gefahr von Kolkbildungen aus Steinschüttungen gebaut. Die Buhnenoberfläche wird gepflastert (Wieprecht, 2008).

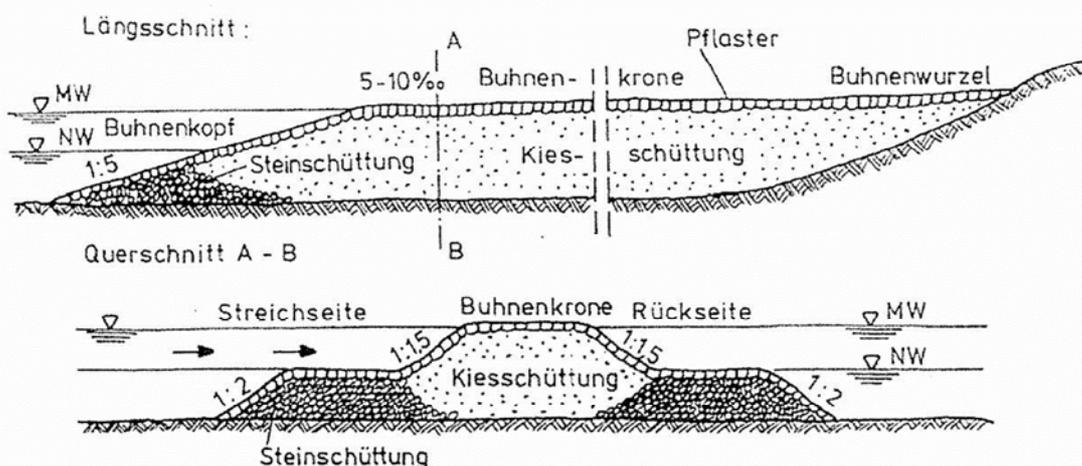


Abbildung 2.7 Aufbau einer Buhne (Wieprecht, 2008)

Die zur Küstensicherung eingesetzten Pfahlbuhnen werden meist aus Holz hergestellt. Die Pfähle können schlüssig nebeneinander oder mit Abstand eingesetzt werden. Zusätzlich bietet sich die Möglichkeit den Querschnitt der Pfähle mit horizontalen Querverbauungen zu reduzieren. Dies bringt zusätzliche Stabilität für das Bauwerk. Bei Buhnen aus Holz besteht die Gefahr der mechanischen Abnutzung durch äußere Einflüsse, wie starker Wellengang oder Witterungseinflüsse. Eine weitere Ursache für Schäden an Holzbuhnen sind

Kleinstlebewesen, wie Bakterien oder Würmer (Perdok, 2002), die das Holz perforieren oder zersetzen.

Bei Pfahlbuhnen aus Beton, wie sie zum Beispiel auch bei Brückenpfeilern eingesetzt werden, besteht die Gefahr der Kolkbildung, wodurch das Fundament bei ungenügender Sicherung an Festigkeit verliert ((Laursen & Toch, 1956) und (Yen, Lai, & Chang, 2000)). Zusätzlich kann der Betonpfahl noch durch Abrasion beschädigt werden, die durch die Strömung mit Schwebstoffen oder Geschiebe zwischen den Pfählen zustande kommt (Jacobs, 2002).

2.2 Hydraulik in Buhnenfeldern

Die Strömungsverhältnisse in einem Fließgewässer sind abhängig von verschiedenen Faktoren. Besteht das Fließgewässer aus einem idealisierten Gerinne können höhere Fließgeschwindigkeiten erreicht werden als bei einem stark verzweigten und verästeltem Flussabschnitt. In Krümmungen sind die Fließgeschwindigkeiten durch die zentrifugalen Kräfte am äußeren Radius größer als am inneren Krümmungsradius. Weiter beeinflusst die Rauheit der Sohle die Fließgeschwindigkeit und somit auch die Strömungsverhältnisse im Flussbett. Bei sehr hohen Rauheiten ist die Fließgeschwindigkeit kleiner als bei niedrigen Rauheiten. Der Einfluss der Sohlschubspannungen ist an der Wasseroberfläche am geringsten. Allerdings verringert die Luftreibung an der Wasseroberfläche die Fließgeschwindigkeit. Daraus lässt sich schließen, dass die Fließgeschwindigkeit in der Flussmitte, unterhalb der Wasseroberfläche am größten ist. In Bodennähe sind die Sohlschubspannungen höher und somit ist die Fließgeschwindigkeit niedriger.

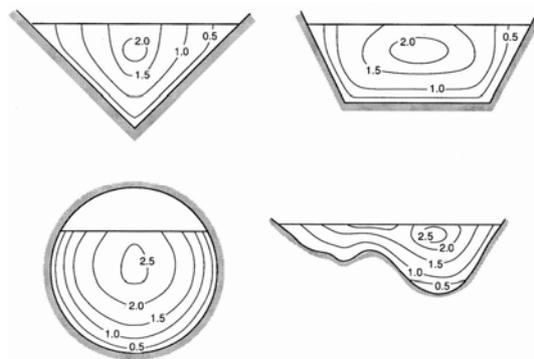


Abbildung 2.8 Geschwindigkeitsprofil in Gerinnequerschnitten (Helmig & Class, 2005)

Für einfache, z.B. trapezförmige Querschnitte lässt sich die Fließgeschwindigkeit durch den Ansatz von Manning-Strickler ermitteln.

$$v_m = k_{st} \times r_{hy}^{2/3} \times \sqrt{I_E}$$

Gleichung 2.2 Fließgeschwindigkeit nach Manning-Strickler

v_m	$\left[\frac{m}{s}\right]$	querschnittsgemittelte Fließgeschwindigkeit
k_{st}	$\left[\frac{m^{1/3}}{s}\right]$	Rauheitsbeiwert nach Strickler
r_{hy}	$[m]$	hydraulischen Radius
I_E	$[-]$	Energieliniengefälle

Der Rauheitswert nach Strickler kann aus der Literatur entnommen werden. (z. B. k_{st} für Flussbett mit fester Sohle ist $40 \frac{m^{1/3}}{s}$ (Helmig & Class, 2005))

$$r_{hy} = \frac{A}{l_u}$$

Gleichung 2.3 Hydraulischer Radius

r_{hy}	$[m]$	hydraulischen Radius
A	$[m^2]$	durchströmte Querschnittsfläche
l_u	$[m]$	benetzter Umfang

Die Berechnung nach Manning-Strickler ist allerdings nur bei stationärem Abfluss und eindimensionaler Strömung möglich.

Natürliche Gerinne mit Buhnen sind wegen der turbulenten Strömung dreidimensional zu betrachten. Die dreidimensionale Strömung lässt sich durch die Kontinuitätsgleichung (Gleichung 2.4) und die Navier-Stokes-Gleichung (Gleichung 2.5) beschreiben.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

Gleichung 2.4 Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial y u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial y u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{1}{\rho} f_i$$

Gleichung 2.5 Navier-Stokes-Gleichung

u_i	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Strömungsvektoren
p	$\left[\frac{N}{m^2}\right]$	Druck
ρ	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Dichte
ν	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$	kinematische Viskosität
f_i	$\left[\frac{kg}{m^2 s^2}\right]$	Massenkräfte

2.2.1 Strömungsmuster bei Niedrigwasser

In Buhnenfeldern, bei denen die Buhnen nicht überströmt werden, entsteht ein Strömungsmuster mit einem primären Wirbel in der Buhnenfeldmitte und kleineren Sekundärwirbeln in den Ecken. Der primäre Wirbel wird durch einströmendes Wasser (Scherzone) vom Hauptstrom erzeugt, diese tritt etwa im letzten Drittel der Buhnenfeldlänge ein (Anlanger, 2008). Das Wasser fließt in einem Winkel von ca. 6° in das Buhnenfeld (Wieprecht, 2008). Am Buhnenkopf der stromaufwärts gelegenen Buhne beginnt die Scherzone, diese entsteht durch die Geschwindigkeitsunterschiede der Strömung im Hauptgerinne und dem Buhnenfeld. Vom Buhnenkopf lösen sich innerhalb der Scherzone Wirbel, wodurch ein Eintrag an Sedimenten und Schwebstoffen in das Buhnenfeld stattfindet.

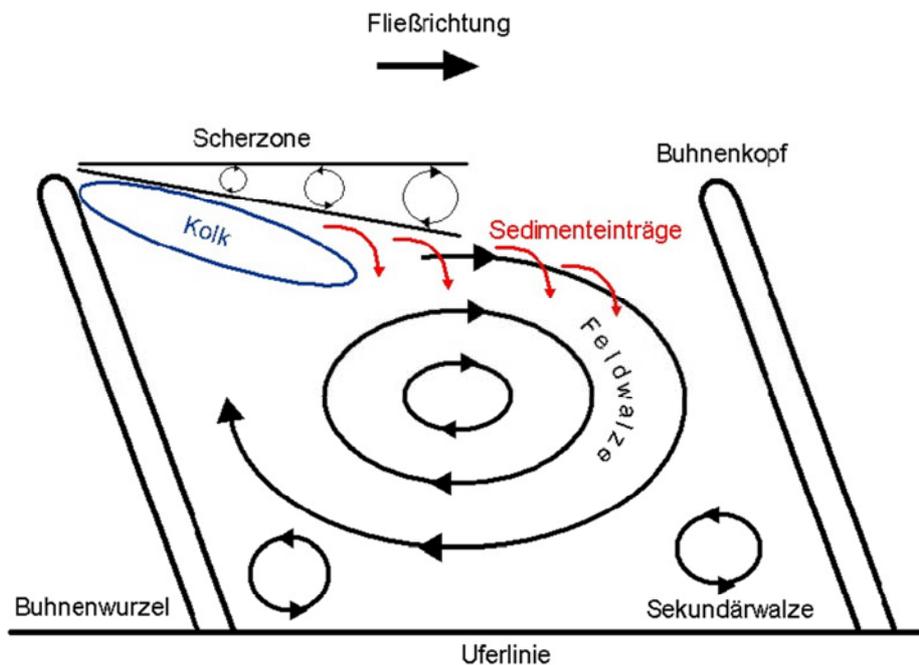


Abbildung 2.9 Walzenbildung im Buhnenfeld aus Wirtz (2004)

Klingeman et al. (1984) beschreiben sechs verschiedene Strömungsmuster innerhalb eines Buhnenfeldes. Diese sind abhängig von dem Winkel in dem der Hauptstrom auf den Buhnenkörper trifft und der Länge des Buhnenfeldes.

Im **Typ 1** dringt die Hauptströmung nicht in das Buhnenfeld ein. Sie wird außerhalb abgelenkt. Im Buhnenfeld entsteht ein großer Wirbel in der Feldmitte.

Beim **Typ 2** ist die Hauptströmung ebenfalls außerhalb des Buhnenfeldes. Allerdings entsteht hier ein zweiter Wirbel mit entgegengesetzter Richtung.

Liegen die Buhnen weiter auseinander, so tritt die Hauptströmung in das Buhnenfeld ein (**Typ 3**). Infolge dessen bildet sich ein zweiter Wirbel, wobei der flussaufwärts gelegene Wirbel stärker ausgebildet ist.

Im **Typ 4** dringt die Hauptströmung in das Buhnenfeld ein und der Wirbel wird aufgelöst, es entsteht eine starke Rückströmung.

Die Hauptströmung wird beim **Typ 5** von der oberstromliegenden Buhne so abgelenkt, dass die Strömung mittig zwischen den Buhnen auf das Ufer trifft. Es bilden sich Wirbel auf jeder Seite aus, welche das Ufer schützen.

Wird der Abstand der Buhnen nochmals vergrößert (**Typ 6**) trifft die Strömung direkt auf das Ufer, das vor Erosion nicht mehr geschützt ist, da sich der unterstromliegende Wirbel nicht mehr ausbildet.

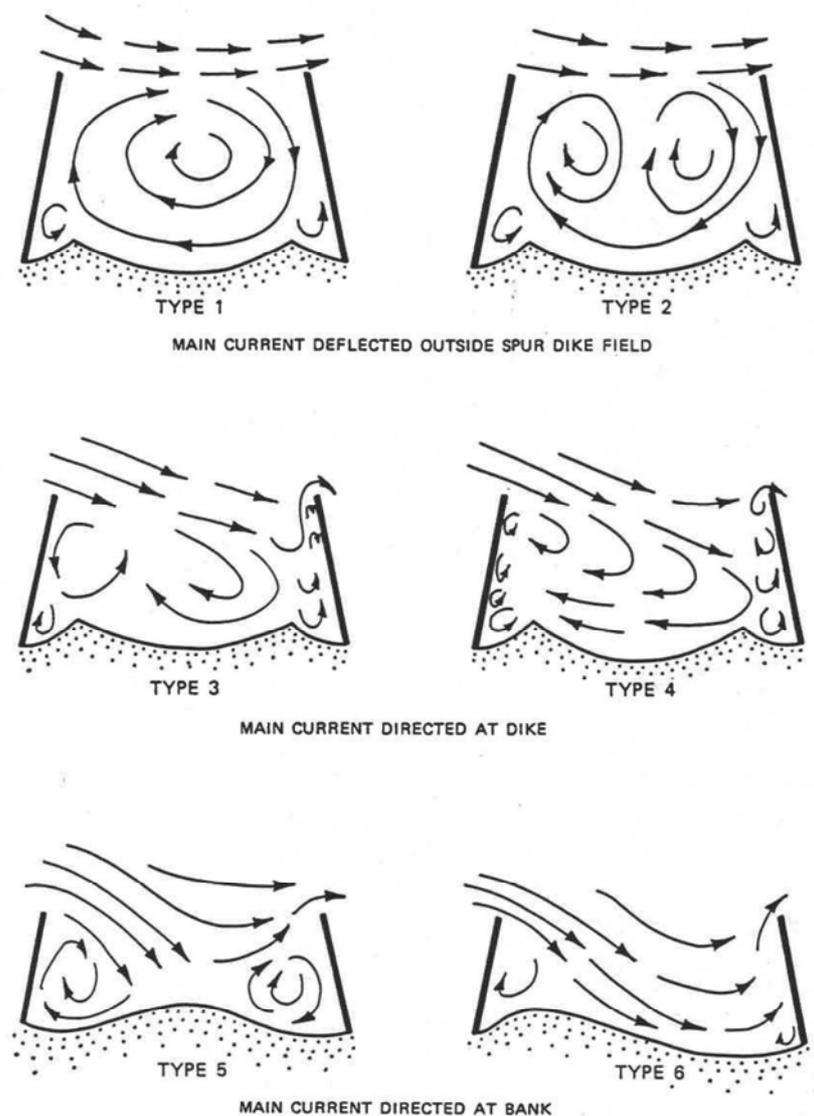


Abbildung 2.10 Strömungsmuster in Buhnenfeldern (Klingeman, Kehe, & Owusu, 1984)

2.2.2 Strömungsmuster bei Hochwasser

Überspülte Buhnen werden häufig in den Untersuchungen vernachlässigt. Zum einen sollen die Buhnen bei Niedrigwasser die Strömung beeinflussen und somit sind die Strömungsverhältnisse bei Niedrigwasser von höherer Bedeutung als die bei höheren Abflüssen. Zum anderen treten bei Überströmung der Buhnen sehr turbulente Strömungsmuster auf, die nur dreidimensional abgebildet werden können. Diese Komplexität stellt eine Einschränkung für die Berücksichtigung dieser Fälle dar. Tominaga et al (2001) untersuchten diese Strömungsverhältnisse mittels unterschiedlichen Überströmungshöhen mit dem Ergebnis, dass sich mit abnehmender Überströmungshöhe die Lage des sich bildenden Wirbels mit horizontaler Achse flussabwärts verschiebt.

Die Strömungsgeschwindigkeit über dem Buhnenkörper ist größer als im Buhnenfeld, da der Wasserstand über dem Buhnenkörper geringer ist.

Die Strömungsrichtung bei überströmten Buhnen an der Oberfläche führt von der Uferseite zur Flussmitte hin (Yossef, 2002), wohingegen die Strömung direkt an der Buhnenkrone in die entgegengesetzte Richtung verläuft. Hinter der Buhne, in der Rückströmungszone, ist die Strömung ebenfalls an der Oberfläche zum Hauptgerinne gerichtet. In Sohlhöhe führt die Strömung von der Flussmitte in das Buhnenfeld.

2.2.3 Strömung durch Pfahlbuhnen

Auf Grund der Durchlässigkeit der Pfahlbuhnen wird eine abgeschwächte Strömung entlang des Ufers zugelassen, wodurch eine Wirbelbildung verhindert wird. Dies hat zur Folge, dass das Sediment durch die Pfähle in Längsrichtung transportiert wird und die Buhnenfelder nicht mehr verlanden (Trampenau, 2000).

Die Fließgeschwindigkeit in den Buhnenfeldern ist auf Grund der Pfähle als Hindernisse niedriger als im Hauptgerinne. Ein Vergleich der Fließgeschwindigkeiten in Buhnenfeldern mit durchlässigen Pfahlbuhnen und undurchlässigen Buhnen zeigt, dass diese bei der durchlässigen Variante wegen der ermöglichten Längsströmung höher ist.

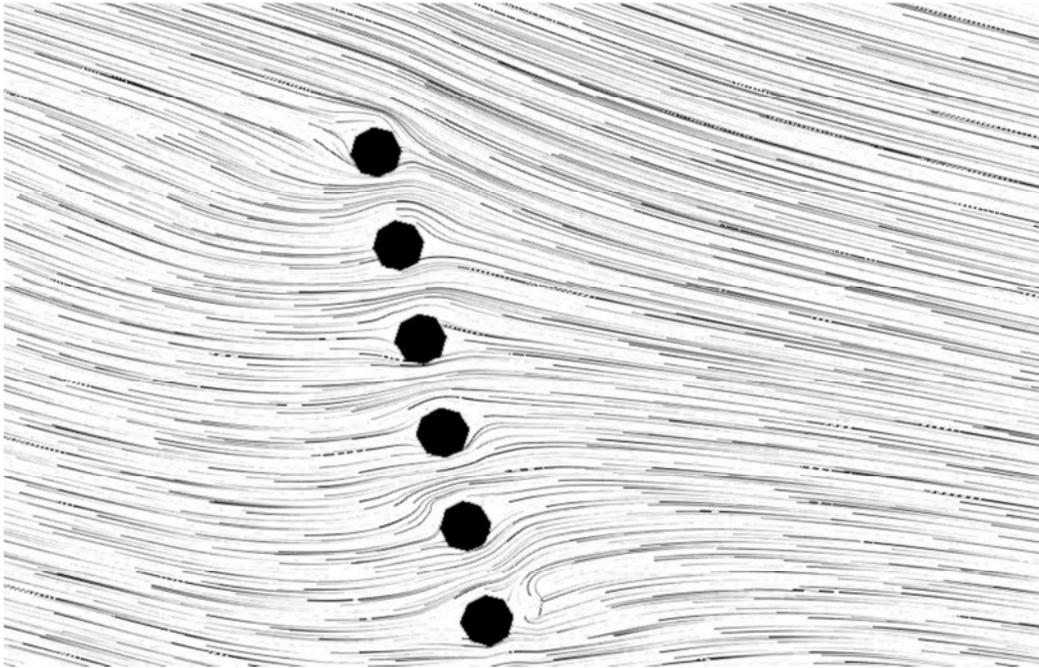


Abbildung 2.11 Strömungsmuster um Pfahlbuhnen

2.3 Morphologie in Buhnenfeldern

2.3.1 Allgemein

Die Gewässerstruktur verändert sich durch Sedimentation und Erosion, die auf Grund der Fließgeschwindigkeiten und Strömungsmuster in Fließgewässern auftreten.

Sedimentation findet an Stellen statt, an denen die Sinkgeschwindigkeit der Sedimente größer ist als die Fließgeschwindigkeit. Bei nicht überströmten Buhnen sinken die Sedimente auf Grund der langsameren Fließgeschwindigkeit in den Buhnenfeldern ab, wohingegen bei überströmten Buhnen durch die turbulente Strömung eine Remobilisierung stattfindet.

Bei der Sedimentabtragung kann man zwei Arten unterscheiden (Yossef, 2002). Zum einen den natürlichen Abtrag durch den Sedimenttransport in Fließgewässern, zum anderen durch die sogenannte Kolkbildung. Kolkerscheinungen sind lokale, sehr begrenzte Eintiefungen der Sohle, die durch sehr schnelle lokale Fließgeschwindigkeiten und Turbulenzen an Bauwerken in Fließgewässern wie Buhnenköpfen oder Brückenpfeilern entstehen. Solche Kolkerscheinungen wurden von Laursen und Toch (1956) im Hinblick auf die Auswirkungen verschiedener Bauwerksquerschnitte auf die Kolktaufe untersucht.

Die sich am Buhnenkopf ablösende turbulente Strömung verursacht die Kolkbildung entlang der Scherzone ((Wirtz, 2004) und (Hong Koo, 2007)).

Eine weitere Veränderung der Gewässersohle ist die Eintiefung des Hauptgerinnes durch die erhöhte Fließgeschwindigkeit auf Grund der Einengung des Gewässerquerschnitts durch den Buhnenbau (Yossef, 2002).

2.3.2 Sedimenttransport

Sedimente können auf zwei Arten transportiert werden (Westrich, 1988). Sehr feines Material wird in Schwebelagerung transportiert. Es findet keine Wechselwirkung mit der Sohle statt.

Der Transport in Sohlennähe wird von gröberen Sedimenten, die als Geschiebe transportiert werden, bestimmt. Ob die Sedimente als Schwebstoffe oder Geschiebe transportiert werden, hängt von der Partikelgröße, Form und Gewicht, sowie den hydraulischen Bedingungen ab.

Der Sedimenttransport setzt dann ein, wenn die Sohlschubspannung ($\tau_0 \left[\frac{N}{m^2} \right]$) größer als die kritische Sohlschubspannung ($\tau_{crit} \left[\frac{N}{m^2} \right]$) ist.

$$\tau_0 > \tau_{crit}$$

Gleichung 2.6 Bedingung für Sedimenttransport

Die Sohlschubspannung τ_{0x} und τ_{0y} in zweidimensionaler Betrachtung berechnen sich nach folgender Gleichung unter der Verwendung des Rauheitskoeffizienten nach Manning wie folgt:

$$(\tau_{0x}; \tau_{0y}) = \rho C_f (u; v) \sqrt{u^2 + v^2}$$

Gleichung 2.7 Sohlschubspannung

τ_{0x}, τ_{0y}	$\left[\frac{N}{m^2} \right]$	Sohlschubspannungen in x- bzw. y-Richtung
ρ	$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	Dichte
$u; v$	$\left[\frac{m}{s} \right]$	Fließgeschwindigkeiten in x- bzw. y-Richtung
C_f	$[-]$	Widerstandsbeiwert

Der Widerstandsbeiwert $C_f [-]$ berechnet sich folgendermaßen:

$$C_f = \frac{gn^2}{h^{\frac{1}{3}}}$$

Gleichung 2.8 Widerstandsbeiwert

n	$\left[\frac{s}{m^{1/3}} \right]$	Rauheit nach Manning
h	$[m]$	Wassertiefe
g	$\left[\frac{m}{s^2} \right]$	Schwerkraft

Ein Parameter, der den Sedimenttransport beschreibt, ist der dimensionslose Shields-Parameter. Ab einem Wert von 0,04 in Abhängigkeit von der Reynoldszahl ist davon auszugehen, dass Sedimenttransport stattfindet.

$$F^* = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho)dg}$$

Gleichung 2.9 Shields Parameter

F^*	$[-]$	Shields Parameter
τ_0	$\left[\frac{N}{m^2}\right]$	Sohlschubspannung
ρ_s	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Sedimentdichte
ρ	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Wasserdichte
d	$[m]$	Korndurchmesser
g	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Schwerkraft

Da Sedimente aus verschiedenen Korngrößen zusammengesetzt sind, wird der charakteristische Korndurchmesser angegeben. Dieser kann unterschiedliche Größen aufweisen. Ein charakteristischer Korndurchmesser ist der d_{50} . Dies ist der Durchmesser bei dem 50 Massenprozent der Sedimente unterschritten werden.

Eine weit verbreitete Möglichkeit um den Beginn des Sedimenttransportes zu bestimmen, ist die von Shields entwickelte Methode (Shields, 1936). Er stellt in einem Diagramm (Abbildung 2.12) zwei dimensionslose Größen gegenüber. Auf der Abszisse wird der Bewegungswiderstand des Kornes durch die Reynoldszahl aufgetragen.

Dem gegenüber wird auf der Ordinate der Shieldswert F^* (siehe Gleichung 2.8) aufgetragen.

$$Re^* = \frac{v^* d_{ch}}{\nu}$$

Gleichung 2.10 Berechnung der Reynoldszahl

Re^*	$[-]$	Reynoldszahl
v^*	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Schubspannungsgeschwindigkeit
d_{ch}	$[m]$	charakteristischen Korndurchmesser
ν	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$	kinematische Viskosität

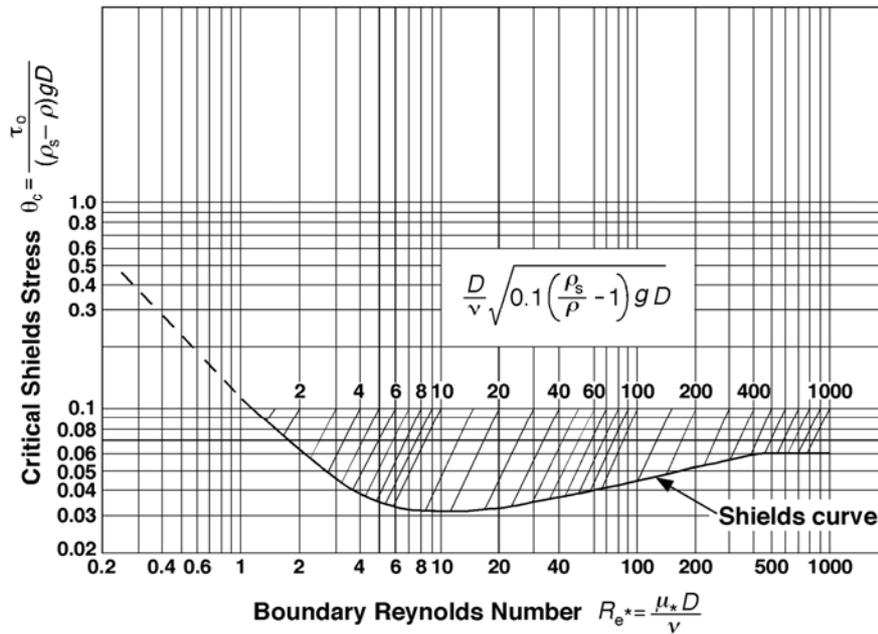


Abbildung 2.12 Shieldsdiagramm

Die Kurve im Diagramm (Abbildung 2.12) zeigt den Bereich des Transportbeginns. Oberhalb der Kurve findet Sedimenttransport statt, unterhalb ist keine Bewegung vorhanden.

Die Sedimenttransportkapazität kann nach verschiedenen Ansätzen berechnet werden. Die für diese Modellierung geeigneten Gleichungen wurden von Melesse Moges (2010) auf ihre Anwendbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnissen untersucht. Für die in dieser Fallstudie vorkommenden Sedimente eignet sich am Besten die Gleichung nach Meyer-Peter und Müller mit einer Modifizierung nach Wong und Parker.

$$\frac{q_{bi}}{\sqrt{g(s-1)d^3}} = 3.97 \left(\frac{r_{hy} I_E}{(s-1)d} - 0.0495 \right)^{1.5}$$

Gleichung 2.11 Sedimenttransport nach Meyer-Peter und Müller, modifiziert durch Wong und Parker

q_{bi}	$[m^3]$	transportiertes Sedimentvolumen
s	$[-]$	spezifische Dichte der Sedimente
r_{hy}	$[m]$	hydraulische Radius
d	$[m]$	Korndurchmesser
I_E	$[-]$	Energienliniengefälle

2.4 Ökologie in Buhnenfeldern

Das vorrangige Thema dieser Arbeit ist die Untersuchung der Hydraulik und der Morphologie. Dennoch wird in diesem Kapitel kurz auf die Ökologie um Buhnen und Buhnenfelder eingegangen.

Bauliche Eingriffe in das Gewässer, wie Buhnen, verändern die Struktur und die Hydraulik des Fließgewässers. Durch Sohl- und Uferbefestigungen mit Beton und großen Steinblöcken ist ein Rückgang der fluviatilen Strukturen zu erkennen (Koenzen & Palm, 1999).

Des Weiteren hat eine deutliche Abnahme der durchflossenen Gerinnebreite, welche durch Flussbegradigungen und Strömungskonzentration auf die Flussmitte durch Buhnen gegeben ist, zur Folge, dass ein starker Rückgang von vegetationsarmen Kiesbändern zu vernehmen ist. Dadurch gehen Laichplätze für bestimmte Fischarten verloren. Baumaßnahmen an Fließgewässern haben auch Änderungen der Ufervegetation zur Folge.

Brandes (1998) untersuchte die Vegetation um Buhnenfelder an der Elbe. Bei der Studie wurden 150 verschiedene Pflanzenarten gefunden, die allerdings in wasserstandsabhängigen Bereichen auftreten. In Jahren mit häufigen Hochwassern ist eine andere Vegetation zu finden als in Jahren mit vorwiegend Mittel- oder Niedrigwasser. Ebenfalls ein Ergebnis der Studie ist die Erkenntnis, dass beim Auftreten von verschiedenen Sedimentgrößen und einem Wechsel zwischen sehr flachen, bzw. steilen Ufern eine hohe Biodiversität zu finden ist.

Durch die langsame Fließgeschwindigkeit in Buhnenfeldern kommt es dort zu Sedimentablagerungen, die mit Schadstoffen belastet sein können. Daher besteht die Möglichkeit, dass Buhnenfelder temporäre Schadstoffdepots sind, die bei Ausspülung durch Hochwasser die Wasserqualität des Fließgewässers beeinflussen (Schwarz & Kozerski, 2003).

In Sedimentablagerungen befinden sich Lebewesen, die die Sohleigenschaften erheblich beeinflussen können. Das Ergebnis der Untersuchung von Heinzelmann (1993) ist, dass durch Verklebung oder Verkittung die kritische Schubspannung größer wird und somit den Sedimenttransport verringert. Hinzu kommt, dass Mikroalgen einen Biofilm auf der Sohloberfläche bilden und dadurch die Strömungsangriffsfläche der Sohle reduzieren. Eine Destabilisierung der Sohle durch Bodenauflockerung auf Grund von Würmern ist ebenfalls möglich. Diese beiden Faktoren wirken sich auf die Sohlerosion aus.

Die Substrateigenschaften der Sohle haben Auswirkungen auf die dort lebenden Fischarten. Fische benötigen je nach Alter unterschiedliche Habitateigenschaften. Buhnenfelder weisen durch unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten und Gewässerstruktur verschiedene Habitattypen auf (Wirtz, 2004). Durch die in Buhnenfeldern beruhigte Strömung entsteht ein Habitat für Fischlarven oder Jungfische. Auch strömungsliebende Fischarten finden am

Buhnenkopf oder unterhalb defekter Buhnen durch die hydraulische und morphologische Diversität geeignete Habitats.

Eine Untersuchung von Bischoff und Wolter (2001) zeigte, dass Buhnenköpfe ein geeignetes Habitat für strömungsliebende juvenile Fische sind. Buhnen mit Buhnenfeldern können somit die Habitatbedingungen für den Fischbestand verbessern.

Anlauf und Hentschel (2002) definierten ökologische Ziele für Buhnen:

- vielseitige Strukturen, Formen und Substratverteilungen
- große Flächen, mit kleinem Gefälle
- viele verschiedene Kleinstrukturen
- variable Kies- und Sandbänke
- mehr temporäre Habitats

Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt die Habitateigenschaften und die darin vorkommenden Fischarten eines bestimmten Buhnenfeldes an der Elbe (Abbildung 2.13).

Folgende Habitats wurden aufgenommen:

- Hartsubstrate in Buhnen mit Steinschüttungen in strömungsarmen und -starken Bereichen
- Weichsubstrate im Buhnenfeld
- Sand- und Schluffablagerungen
- Tümpelartige Stillgewässer
- Auenlehmbänke

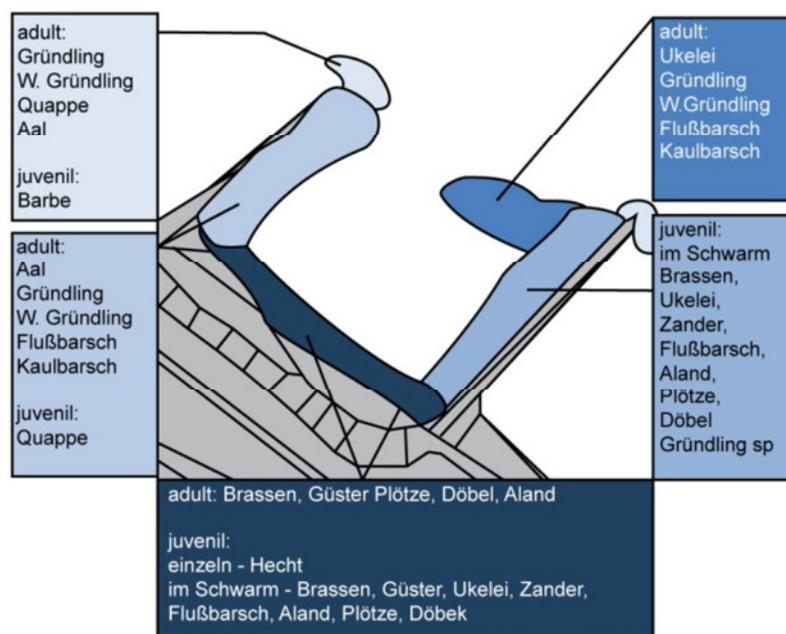


Abbildung 2.13 In Buhnenfeldern vorkommende Fischhabitats Anlauf und Hentschel (2002), modifiziert

Abschnitt 2 Fallstudie

3 Erfassung der Felddaten

Für die Fallstudie wird der Altarmabschnitt des Neckars bei Freiberg a.N. als Vorlage gewählt, da hier bereits Buhnen zur Ufersicherung existieren. In einer zweitägigen Messkampagne werden die Felddaten für die Modellierung aufgenommen.

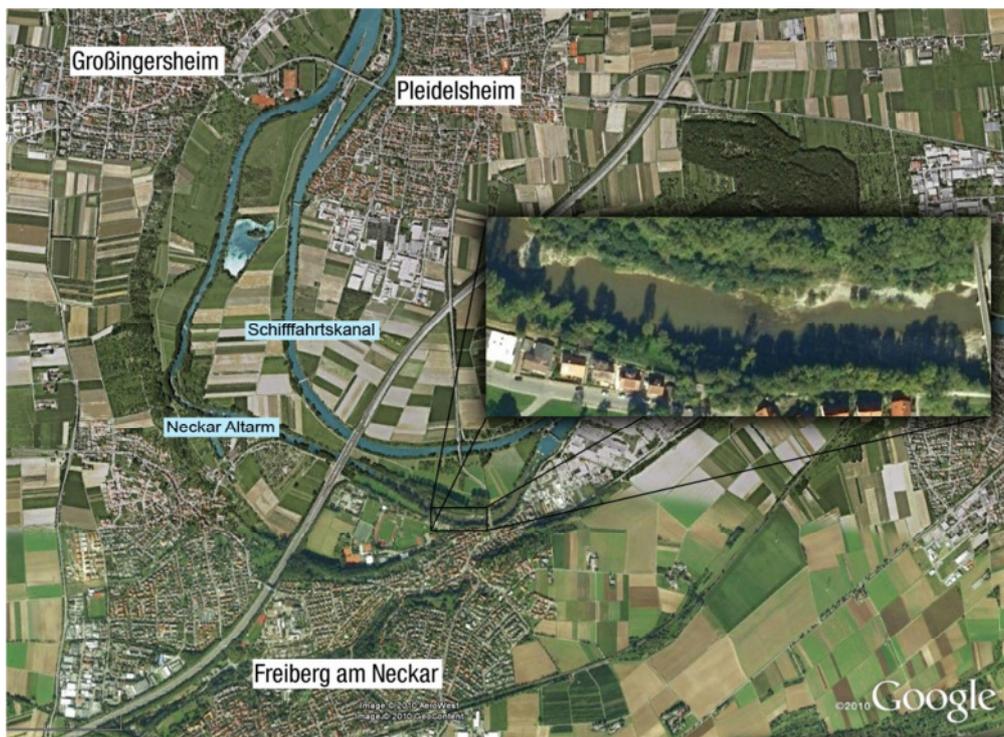


Abbildung 3.1 Luftbild des Untersuchungsgebiets (Google Earth, 2010)

3.1 Das Untersuchungsgebiet

Der Neckar fließt in Baden-Württemberg im Süden Deutschlands mit einem etwa 13.900 km² großen Einzugsgebiet auf einer Länge von 367 km von Villingen-Schwenningen bis Mannheim und mündet in den Rhein. Ab Plochingen (Flusskilometer 202) ist der Neckar durch Stauhaltungen und Flussbegradigungen schiffbar. Die Begradigung zur Schiffbarmachung und der Anschluss des Wasserkraftwerks Pleidelsheim führten dazu, dass bei Flusskilometer 153 der Altneckararm bei Niedrigwasser nur wenig Wasser führt. Das alte Flussbett wurde als FFH-Naturschutzgebiet ausgewiesen und sollte daher eine Mindestwassermenge von 1 m³/s führen. Um den Abfluss in dem Schiffahrtskanal und das Kraftwerk relativ konstant zu halten, werden ab einem Abfluss von mehr als 90 m³/s die Wassermengen über das Wehr Beihingen in den Altneckararm abgeleitet. Bei stark

auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten im Hochwasserfall wird in der Krümmung das linke Außenufer sehr stark erodiert.

Der Uferabbruch war so stark, dass eine Gefährdung der naheliegenden Wohnhäuser nicht mehr auszuschließen war. Im Jahr 2004 wurde das Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart beauftragt einen Modellversuch zur Ufersanierung durchzuführen. Auf dieser Grundlage plante das Ingenieurbüro Winkler und Partner GmbH 2007 eine Ufersicherung mit sechs Bühnen aus Steinschüttungen im Abstand von 20 Metern (Abbildung 3.2).



Abbildung 3.2 Steinbühnen in Freiberg am Neckar

3.2 Die Bestandsdaten

Durch den früheren Bühnenbau und die Modellversuche existieren bereits Vermessungsdaten, welche vom Vermessungsbüro Repple zur Verfügung gestellt werden. Um die heutige Situation darstellen zu können, werden die Vermessungsdaten nach dem Bühnenbau vom Vermessungsbüro Repple mit den Planungsunterlagen des Ingenieurbüros Winkler und Partner GmbH ergänzt. Zur Verwendung der Vermessungsdaten im Modellierungsprogramm müssen diese noch mit dem CAD-Programm AutoCAD in die richtige Lage des Weltkoordinatensystems transformiert werden.

Die erhaltenen Daten sind für eine Modellierung noch nicht vollständig, weshalb fehlende Querschnitte nach dem Bühnenbau selbst aufgenommen werden (siehe Kapitel 3.3).

Die zur Modellierung benötigten Wasserstands- und Abflussdaten werden der Internetseite des Wasser- und Schifffahrtsamtes Stuttgart und der Hochwasser-Vorhersagezentrale der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg entnommen. Da keine Wasserstands-Abfluss-Beziehungen für den Altarm zur Verfügung stehen, werden die Modellversuche des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart als Anhaltswerte verwendet (Westrich, Schmid, & Hammer, 2005).

Für die Modellierung werden drei Geländemodelle erstellt. Für die Modelle ohne Buhnen und mit Pfahlbuhnen werden die Geländeaufnahmen vor dem Buhnenbau verwendet. Die Aufnahmen nach dem Buhnenbau werden für das Modell mit undurchlässigen Buhnen verwendet. Dies hat den Vorteil, dass die hydraulische Modellierung der Buhnen in einem im Gleichgewichtszustand befindlichen System durchgeführt werden.

3.3 Erhebung der Felddaten

Um das Geländemodell vor und nach dem Buhnenbau darstellen zu können, müssen die ergänzenden Geländedaten aufgenommen werden. Die Gewässersohle wird durch Messpunkte mittels eines Tachymeters vermessen, um die Distanz der Messpunkte zu einem Referenzpunkt aufzunehmen.

Die Vermessungsdaten werden durch eine Koordinatentransformation und Höhenverschiebung in das Weltkoordinatensystem der Bestandsdaten eingefügt.

3.3.1 Vermessung der Geländeoberfläche

Für die Aufnahme der Geländepunkte wird ein Tachymeter verwendet.

Nach Aufstellen des Tachymeters werden Referenzpunkte aufgenommen und markiert. Die Referenzpunkte bieten bei erneutem Aufstellen oder Versetzen des Tachymeters die Möglichkeit, alle gemessenen Datensätze in ein Koordinatensystem zu integrieren. Eine Versetzung des Tachymeters ist in diesem Flussabschnitt nötig, da der Flussabschnitt eine Krümmung beschreibt, wodurch nicht alle Punkte von einer Stelle einsehbar sind. Ein weiterer Grund ist, der Bewuchs des Gewässerufers, der durch seine Höhe eine Messung verhindert.

Nach Aufnahme der Punkte werden diese mit X -, Y - und Z - Koordinaten vom System in Tabellenform ausgegeben.

3.3.2 Sedimentproben

Für die spätere Modellierung werden Rauheitswerte der verschiedenen Bereiche im Gewässer benötigt. Hierfür wird der Gewässerabschnitt nach den Substratflächen kartiert (Abbildung 3.4). Für die einzelnen Substratflächen wird eine Siebkurve aufgenommen, die aus Proben von verschiedenen repräsentativen circa 40 cm mal 40 cm großen Substratfläche entnommen werden. Diese werden in mehreren Siebstufen mit abnehmender Lochgröße nach Korndurchmesser getrennt, gewogen und in Siebkurven ausgewertet. Die Messwerte sind dem Anhang A zu entnehmen. Die Siebkurven der Substrate eins und fünf sind in den Abbildung 3.5 und Abbildung 3.6 zu sehen.

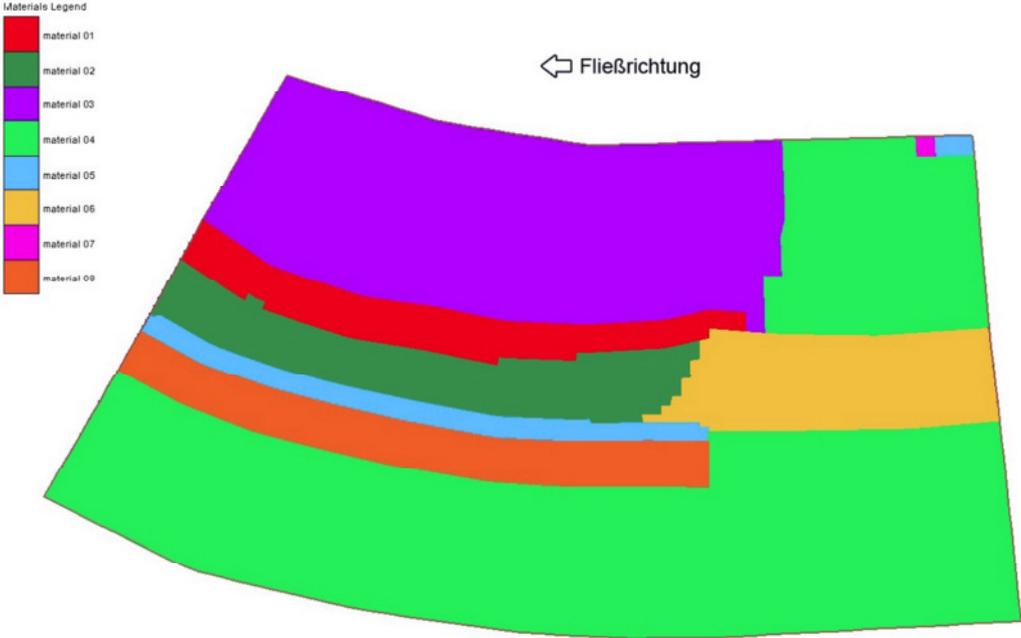


Abbildung 3.4 Flächen mit unterschiedlichen Substrateigenschaften

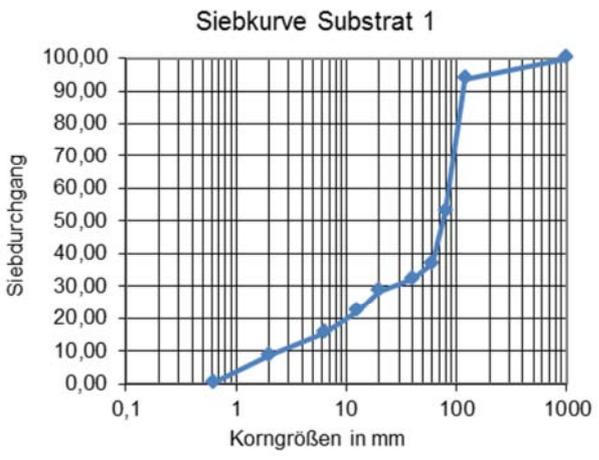


Abbildung 3.5 Siebkurve Substrat 1

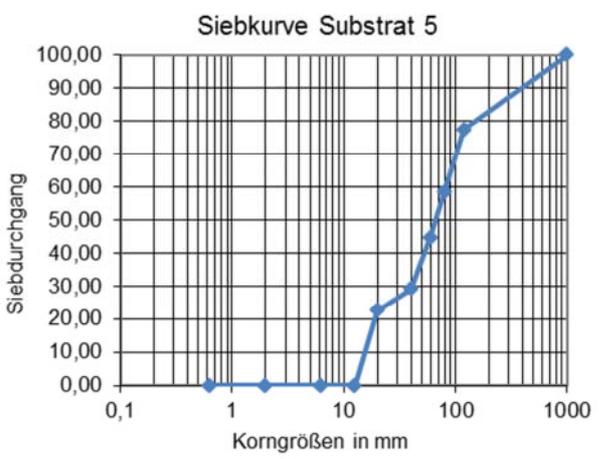


Abbildung 3.6 Siebkurve Substrat 5

Aus den Siebkurven wird der Rauheitswert nach Strickler mittels der Gleichung 3.1 bestimmt und in den Rauheitswert nach Manning (Gleichung 3.2) umgewandelt.

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

Gleichung 3.1 Bestimmung des Stricklerwerts

$$n = \frac{1}{k_{st}}$$

Gleichung 3.2 Bestimmung des Rauheitswertes nach Manning

k_{st}	$\left[\frac{m^{1/3}}{s} \right]$	Beiwert nach Strickler
d_{90}	$[m]$	Korndurchmesser bei 90 Massenprozent
n	$\left[\frac{s}{m^{1/3}} \right]$	Rauheitswert nach Manning

Beiwerte nach Strickler		
Substrat	Rauheitswert	Beschreibung
1	40	Kleinere Steine im Bereich des Gleitufers
2	38	Größere Steine in der Flussmitte
3	20	sehr feiner Sand in den temporären Überflutungsflächen erhöhter Rauheitswert wegen der Vegetation
4	20	Felsige Oberfläche der Bühnen
5	42	Kiesablagerungen vor allem in den Bühnenfeldern
6	70	große Steinplatten

Tabelle 3-1 vorkommende Rauheiten nach Strickler

Aufnahmen der Substrate sind dem Anhang A beigefügt.

3.4 Verarbeitung der Daten

Aus den Vermessungsdaten wird ein dreidimensionales Geländemodell erstellt, wofür die Daten als Scatterpunkte eingelesen werden. Daraus wird ein Maschennetz erzeugt, indem die Z-Koordinaten als Höhen dem Netz zugeordnet werden. Für eine genauere Abbildung der Formen wird das Netz an bedeutenden Stellen verfeinert.

Für das Geländemodell vor dem Bühnenbau (Abbildung 3.7) werden die externen Vermessungsdaten verwendet.

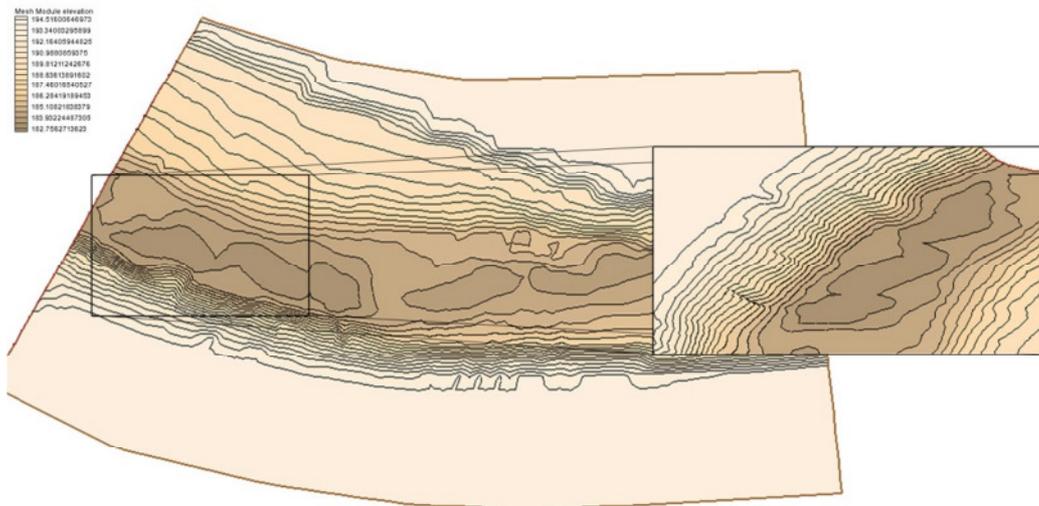


Abbildung 3.7 Geländemodell ohne Buhnen

Aus den selbst aufgenommenen Vermessungsdaten wird das Geländemodell mit Buhnen erstellt, wie es heute in dem Gewässerabschnitt vorzufinden ist (Abbildung 3.8). Um mehr Berechnungsergebnisse durch eine höhere Knotendichte im Bereich der Buhnen zu erreichen, werden die Maschen des Netzes an den Buhnen verfeinert.

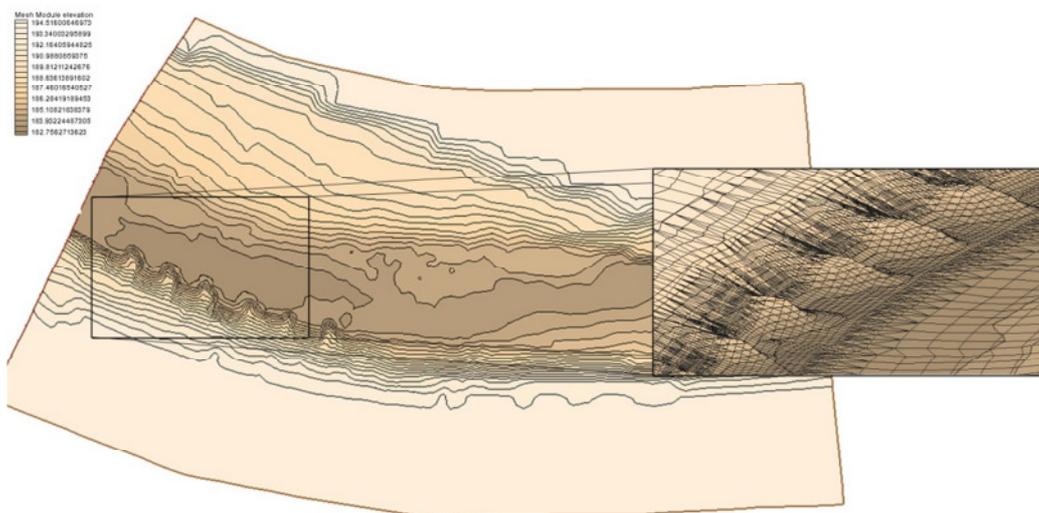


Abbildung 3.8 Geländemodell mit Buhnen

Da für den Gewässerabschnitt bei Freiberg am Neckar keine Vermessungsdaten mit Pfahlbuhnen existieren, wird das Geländemodell ohne Buhnen als Basis genommen. Für die Modellierung werden die Pfähle in AutoCAD anstatt der Steinbuhnen in die bestehende externe Zeichnung konstruiert. Daher haben sie die gleiche Länge und Winkel zum Ufer wie die Steinbuhnen. Die einzelnen Pfähle haben einen Durchmesser von 0,5 m und einen Abstand von 1 m. Daraus ergibt sich eine Durchlässigkeit von 50 %. Die Lage der Pfähle wird aus AutoCAD ausgelesen und als Scatterdaten in das Geländemodell eingefügt. An den

Stellen der Pfähle werden für eine exakte Darstellung (Abbildung 3.9) neue Knoten und Elemente erzeugt. Für die Abbildung der Pfahlbuhnen durch ein achteckiges Prisma mit senkrechten Flächen werden die Eckknoten durch manuelle Eingabe von zwei Höhen erzeugt. Eine Höhenkoordinate entspricht der Sohlhöhe, die weitere der Pfahloberkante. Das Netz wird um die Pfahlbuhnen nochmals verfeinert.

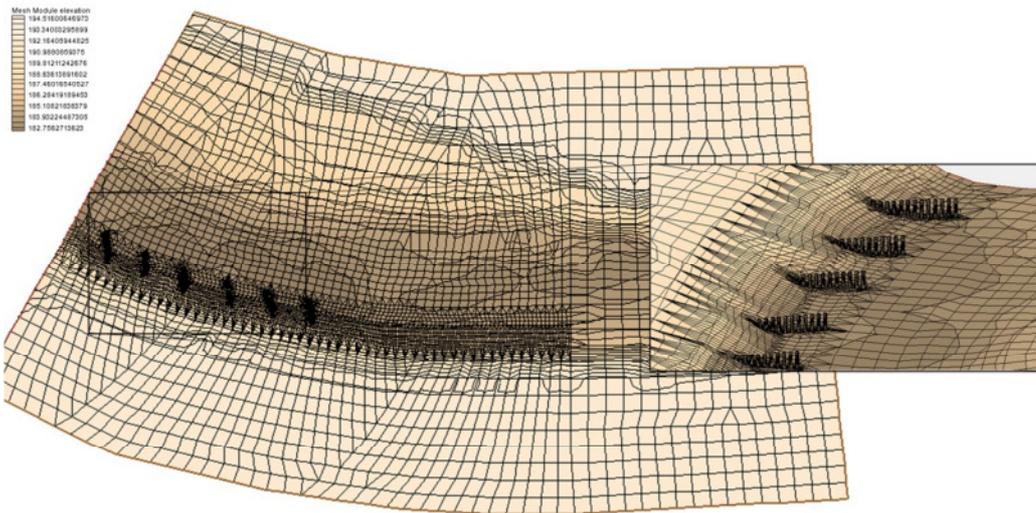


Abbildung 3.9 Geländemodell mit Pfahlbuhnen

Für die Modellierung müssen an den Rändern des Geländemodells Randbedingungen festgelegt werden. Die obere Randbedingung für die Einströmung kann beispielsweise der Abfluss sein. Die Ausströmung (untere Randbedingung) des Modells kann indes als Wasserspiegellage oder superkritisch definiert werden. Da für höhere Abflüsse keine Messdaten (z.B. Wasserspiegellage) zur Verfügung stehen, muss die untere Randbedingung errechnet werden. Hierfür wird das vorhandene Maschennetz ober- und unterstrom durch Einfügen weiterer Elemente als einfaches Gerinne erweitert.

Die untere Randbedingung wird als superkritisch angenommen, d.h. es stellt sich unterstrom ein schießender Abfluss ein, der keine Auswirkungen auf den oberstrom liegenden Gewässerabschnitt hat. Einen schießenden Abfluss wird erzeugt, in dem das Sohlgefälle des unten angehängten Abschnitts sehr steil modelliert wird. Durch die Modellierung der Wasserspiegellage kann für das ursprüngliche Geländemodell eine untere Randbedingung ermittelt werden. Die Wasserspiegellage ergibt sich aus den errechneten Werten der Knotenpunkte, die in ihrer Lage der unteren Randbedingung entsprechen.

4 Numerische Modellierung

Die in dieser Arbeit aufzuzeigenden Unterschiede zwischen dem Einsatz von herkömmlichen Steinbuhnen und Pfahlbuhnen anhand von Strömungsverhalten und Sedimenttransport werden mit dem zweidimensionalen Hydraulikprogramm SRH-2D berechnet. Zur Erstellung des Geländemodells und zur anschließenden Auswertung der Modellierungsergebnisse wird das SMS-Programm von Aquaveo verwendet. Als Datengrundlage für SMS (The Surface-Water Modelling System) können vielseitige Datenformate wie Karten, Fotos, CAD- und GIS-Dateien oder topographische Daten dienen. Mit den Eingangsdaten wird ein Maschennetz erzeugt, dessen Elementen Materialeigenschaften zugeordnet werden können. Für die dreidimensionale Darstellung können den Knoten Höhenwerte zugewiesen werden. Nach der Modellierung können die Ergebnisse mit SMS visualisiert werden.

4.1 SRH-2D

Das zweidimensionale Hydraulikprogramm SRH-2D wurde von der Behörde für Wasserwirtschaft und Wasserversorgung (Bureau of Reclamation) des amerikanischen Innenministeriums entwickelt. Es beinhaltet die hydraulische Modellierung, Sedimenttransport, sowie Temperatur- und Vegetationsmodelle. In dieser Arbeit werden die hydraulische Modellierung und das Sedimenttransportmodell eingesetzt.

SRH-2D ist mit anderen 2D-Programmen vergleichbar. Die Vorteile von SRH-2D liegen darin, dass das Maschennetz sehr flexibel sein kann. So kann es eine Mischung aus quadratischen und dreieckigen Elementen berechnen und stellt den Übergang zwischen einem strömenden und schießenden Abfluss sehr gut dar.

4.1.1 Hydraulik

Eine dreidimensionale Strömungsberechnung ist in den meisten Fließgewässern nicht notwendig, da die Gerinne eher flachen und somit die vertikalen Strömungen vernachlässigbar sind. SRH-2D berechnet die Fließgeschwindigkeiten als tiefengemittelte Größen.

Die Strömung wird in SRH-2D durch die zweidimensionale St. Venant-Gleichung (Gleichung 4.1) ermittelt.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = e$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial huu}{\partial x} + \frac{\partial hvu}{\partial y} = \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + D_{xx} + D_{xy}$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hvv}{\partial y} = \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + D_{yx} + D_{yy}$$

Gleichung 4.1 zweidimensionale St. Venant - Gleichungen

t	[s]	Zeit
x, y	[m]	kartesische Koordinaten
h	[m]	Wassertiefe
u, v	$\left[\frac{m}{s}\right]$	tiefengemittelten Geschwindigkeiten in x- bzw. Y-Richtung
e	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Niederschlagsrate
g	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Schwerkraft
T _{xx} , T _{xy} , T _{yy}	$\left[\frac{m^2}{s^2}\right]$	tiefengemittelten Wirbelspannungen
D _{xx} , D _{xy} , D _{yx} , D _{yy}	$\left[\frac{m^2}{s^2}\right]$	Dispersionsterme
z	[m]	Wasserspiegellage
ρ	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Wasserdichte
τ _{bx} , τ _{by}	$\left[\frac{N}{m^2}\right]$	Sohlschubspannung

Für diese Gleichungen wird das Finite-Volumen-Verfahren als Diskretisierungsansatz verwendet.

Zur Berechnung werden alle Informationen der Polygonmitte zugeordnet und auf die Polygonfläche integriert. Das Geländemodell kann daher aus willkürlichen Elementen (Dreieck- oder Rechteckpolygone) bestehen.

4.1.2 Sedimenttransport

SRH-2D kann die Veränderungen der Sohle durch Erosion und Sedimentation berechnen. Hierfür wird die Annahme getroffen, dass die zeitliche Änderung der Sohle im Gleichgewicht dem Sedimenttransport entspricht.

In der Sedimenttransportgleichung können die Sedimente zur Berechnung in Klassen (k) eingeteilt werden. Die folgende Gleichung beinhaltet die Sedimentkonzentration, die für jede Klasse (k) berechnet wird.

$$\frac{\partial hC_k}{\partial t} + \frac{\partial huC_k}{\partial x} + \frac{\partial hvC_k}{\partial y} = \frac{1}{L_b} \left(q_k^* - hC_k \sqrt{u^2 + v^2} \right)$$

Gleichung 4.2 Sedimenttransportgleichung

h	[m]	Wassertiefe
t	[s]	Zeit
C _k	$\left[\frac{kg}{ms} \right]$	tiefengemittelte Sedimentkonzentration pro Volumen
x, y	[m]	kartesische Koordinaten
u, v	$\left[\frac{m}{s} \right]$	tiefengemittelte Geschwindigkeiten in x-, bzw. y-Richtung
L _b	[m]	Korrekturlänge des Nichtgleichgewichtszustandes
q _k [*]	$\left[\frac{kg}{ms} \right]$	Gleichgewichtssedimenttransportkapazität

Die Berechnung der Sedimenttransportkapazität q_k^* kann durch vier Ansätze ermittelt werden:

- Nach Engelund und Hansen (1972)
- Nach Parker (1990)
- Nach Wilcox und Crowe (2003)
- Nach Meyer-Peter und Müller (1948) modifiziert nach Parker und Wang (2006)

Für die Berechnungen bei dieser Untersuchung wird die Gleichung nach Meyer-Peter und Müller (Gleichung 2.11) verwendet. Für Untersuchungen mit allen Gleichungen wird auf Melesse Moges (2010) verwiesen, dieser zeigt die Unterschiede der Modellierungsergebnisse bei Verwendung der Gleichungen auf.

4.1.3 Module für die Modellierung

Die Modellierung mit SRH-2D besteht aus drei Schritten.

Im ersten Schritt wird nach der Erstellung des Geländemodells ein Vorprogramm (**SRHpre**) gestartet, in dem verschiedene Parameter eingegeben werden. Beispiele für veränderbare Parameter sind die Randbedingungen, der Rauheitskoeffizient, Berechnungszeitschritte, Sedimentverteilungen oder die Sedimenttransportgleichungen.

Verschiedene Eingabedateien des Vorprogramms sind im Anhang C beigelegt. Dieses Programm überprüft die eingegebenen Daten auf Vollständigkeit und Fehler. Der Vorteil dabei ist, dass eventuelle Fehler schon vor der eigentlichen Berechnung behoben werden können. Das Vorprogramm berechnet aus allen eingegebenen Elementen eine Ausgabedatei, die für die eigentliche Berechnung als Eingabe dient. Die Ausgabedateien können im zweiten Schritt in das Berechnungsprogramm **SRH-2D** eingelesen werden. Bei

der Berechnung können unterschiedliche Zeitschritte oder nur das Endergebnis berücksichtigt werden.

Durch SRH-2D ergibt sich die Möglichkeit drei verschiedene Berechnungen durchzuführen. Zum einen eine rein hydraulische Modellierung (Flow-Modul), bei der die Ausgabedatei die Wasserspiegellagen, Wassertiefen, Sohlschubspannungen und Fließgeschwindigkeiten beinhaltet.

Des Weiteren ist eine Modellierung mit dem Morph-Modul möglich, das zusätzlich den Shields Parameter und den kritischen Korndurchmesser für die Sohlschubspannung berechnet. Im Mobile-Modul wird der Sedimenttransport berücksichtigt. Als Ergebnis erhält man neben den hydraulischen Parametern noch die Erosionstiefe und die Sedimentkonzentration.

Um die Ergebnisse visuell aufzeigen zu können, müssen die Dateien mit einem Umwandlungsprogramm (**SRH2SMS**) im dritten Schritt in Dateien sortiert nach Parameter umgewandelt werden. Diese können zur Veranschaulichung in SMS eingelesen werden.

4.2 Modellkalibrierung

4.2.1 Allgemein

Auf Grundlage der Vermessungsdaten wird ein dreidimensionales Geländemodell des zu modellierenden Abschnitts erstellt. Zu Beginn werden eine große Maschenweite und einheitliche Rauheitswerte für die einzelnen Sedimentflächen gewählt. Die untere Randbedingung wird durch die Wasserstandsmessungen vorgegeben. Wegen des Fehlens der Wasserstand-Abfluss-Beziehungen besteht die erste notwendige Kalibrierung darin, eine passende obere Randbedingung, in diesem Fall einen passenden Abfluss zu dem gemessenen Wasserstand zu erhalten. Die beste Annäherung der gemessenen und berechneten Wasserstände am unteren Modellrand, gibt es bei einem Abfluss von $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Auf dieser Basis werden die Rauheitswerte nach Manning den zugehörigen Sedimentflächen zugeordnet, die anhand der aufgenommenen Vermessungsdaten abgegrenzt werden. Die Rauheitswerte werden so lange verändert, bis ein optimales Ergebnis der gemessenen und berechneten Wasserstände erreicht wird. Dabei ist es wünschenswert, dass die Rauheitswerte realistischen Werten entsprechen. (siehe Kapitel 3.3.2)

Bei höheren Abflüssen wird die untere Randbedingung durch Erweiterung des Geländemodells (siehe Kapitel 3.4) unter Berücksichtigung einer superkritischen Randbedingung ermittelt.

Die unterschiedlichen Geländemodelle haben bei gleichem Abfluss verschiedene Wasserspiegellagen, was auf die Aufnahmen der Sohlhöhen an unterschiedlichen

Zeitpunkten zurückzuführen ist. Deshalb ist für die Abflüsse 100 m³/s und 400 m³/s eine Modellierung mit allen Varianten (ohne Buhnen, mit Buhnen und mit Pfahlbuhnen) durchzuführen, um die jeweilige Randbedingung zu bestimmen.

4.2.2 Verfeinerung des Netzes

Auf eine Verfeinerung des gesamten Netzes, wie es üblich ist, wurde hier verzichtet, da das Programm nur eine bestimmte Anzahl an Knotenpunkten für eine stabile Durchführung der Berechnung zulässt. Daher wird nur der für die Studie vorrangige Bereich (Abbildung 4.1) verfeinert. Die gesamte Prüfung der Netzverfeinerung wird bei einem Abfluss von 400 m³/s durchgeführt.

Das grobe Netz hat in dem relevanten Bereich eine Maschenweite von 1 m und besitzt insgesamt 3529 Knoten und 3928 Elemente.

Die Fließgeschwindigkeiten werden mit dem Flow-Modul berechnet. Durch Beobachtungspunkte werden die Fließgeschwindigkeiten an den vorgegebenen Punkten ausgelesen und dienen im weiteren Verlauf als Referenzwerte.

Bei einer Verfeinerung des Netzes im relevanten Bereich besteht das mittlere Netz aus 6930 Knoten und 8379 Elementen mit einer Maschenweite von 0,5 m. Eine nochmalige Verfeinerung ergibt ein feines Netz aus 14316 Knoten und 17331 Elementen mit einer Maschenweite von 0,25 m.

Die Beobachtungspunkte können in SMS die gemessenen Werte mit den Referenzwerten verglichen und in einem Fehlerbalken grafisch dargestellt werden.

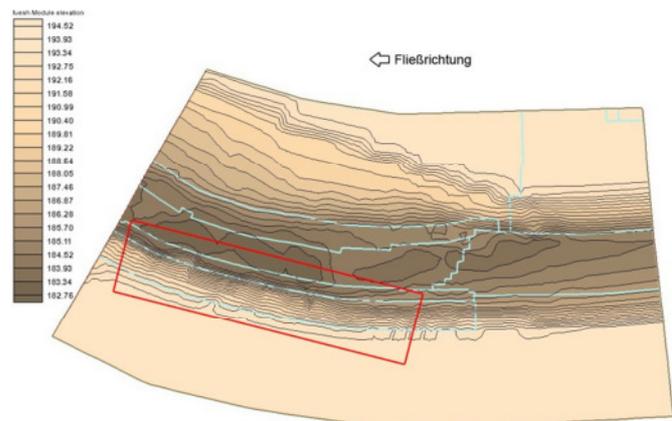


Abbildung 4.1 Verfeinerungsbereich

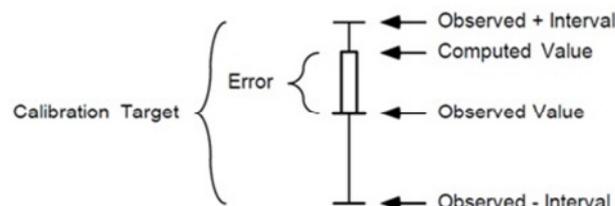


Abbildung 4.1 Fehlerbalken (Aquaveo, 2004)

Die Mitte des Fehlerbalkens entspricht dem Referenzwert. Das Intervall kann der Benutzer selbst wählen. Für die Überwachung der Fließgeschwindigkeit wird ein Intervall von 0,1 m/s gewählt.

Die Richtung des Balkens gibt an, ob der berechnete Wert höher oder niedriger zum Referenzwert ist. Die Farbe des Balkens zeigt die Abweichung des berechneten Wertes zum Referenzwert an. Liegt der berechnete Wert innerhalb des Intervalls, zeigt dies die Farbe Grün. Wird ein gelber Balken gezeigt, so ist der Fehler kleiner als 200 % des Intervalls. Bei einem Fehler von mehr als 200 % des Intervalls wird ein roter Balken gezeigt. Die folgenden Abbildungen zeigen den Vergleich der Fließgeschwindigkeiten des groben Netzes, mit dem des mittleren Netzes, sowie die des feinen Netzes mit Fehlerbalken.

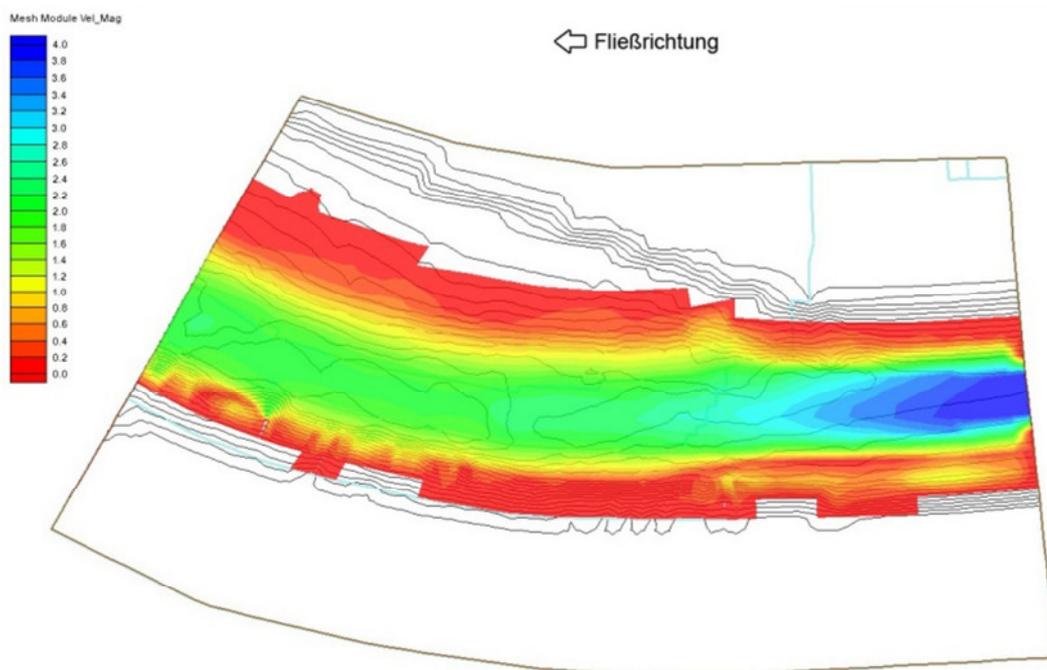


Abbildung 4.2 Fließgeschwindigkeit [m/s] Grobes Geländemodell

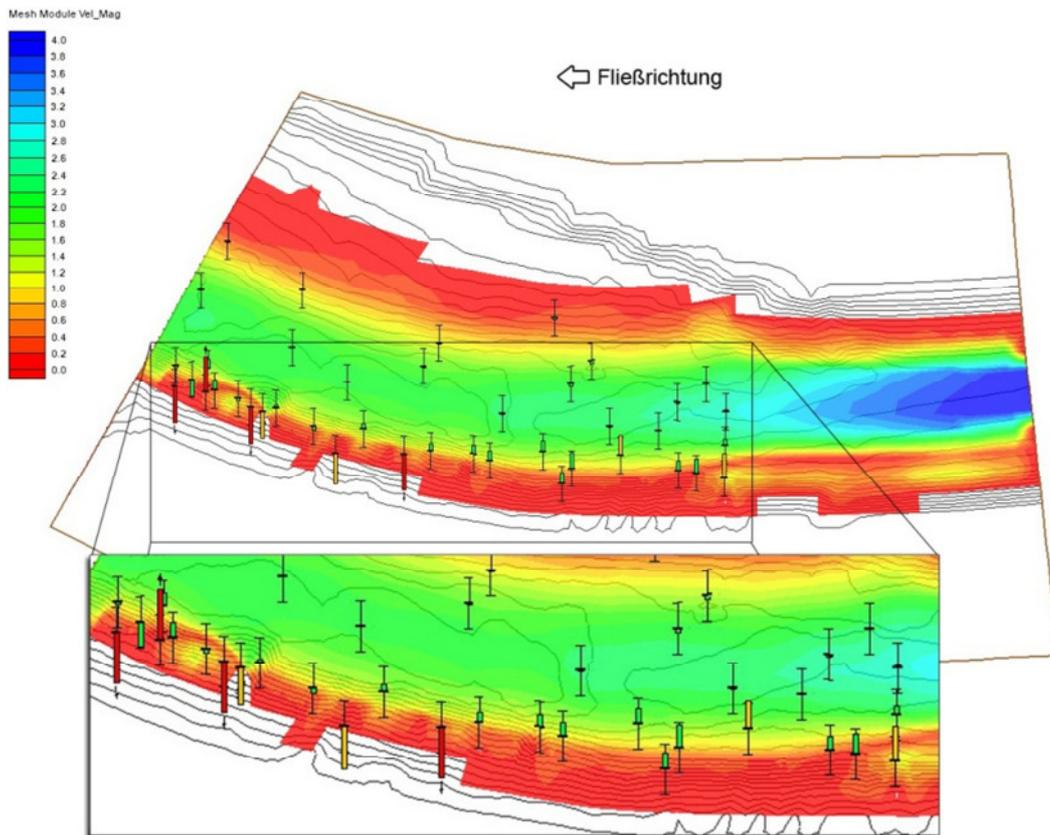


Abbildung 4.3 Fließgeschwindigkeit [m/s] Mittleres Geländemodell

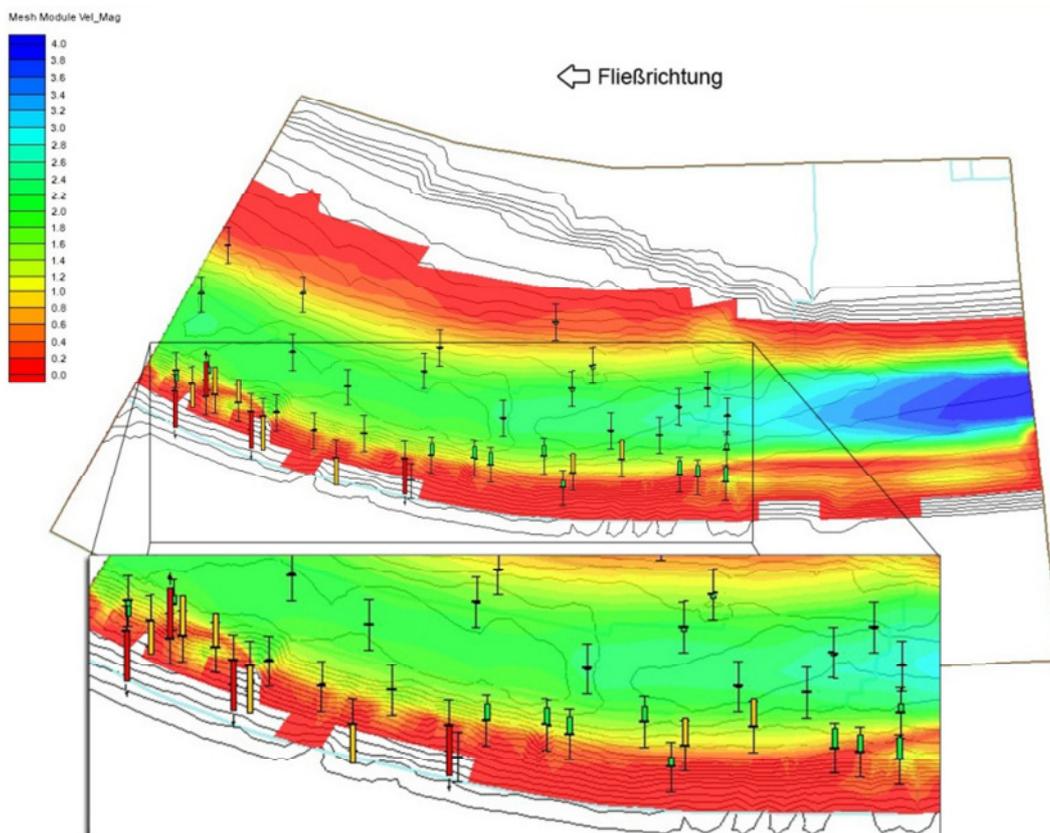


Abbildung 4.4 Fließgeschwindigkeit [m/s] Feines Geländemodell

Abbildung 4.5 zeigt die Abweichung der gemessenen Werte des mittleren Netzes zu den Referenzwerten (linke Seite), sowie die Abweichungen im Detail (rechte Seite).

Dasselbe gilt für die Abbildung 4.6, jedoch mit dem Unterschied, dass die Referenzwerte mit den Werten des feinen Netzes verglichen werden.

Nr.	x	y	Referenz	mittleres Mesh		feines Mesh	
				v in m/s	Differenz	v in m/s	Differenz
16	3515116,31	5422515,48	2,791	2,801	-0,01	2,799	-0,008
17	3515115,92	5422501,86	2,012	2,044	-0,032	2,045	-0,033
18	3514892,73	5422534,27	1,306	1,3	0,006	1,247	0,059
19	3514892,16	5422525,69	0,615	0,151	0,464	0,322	0,293
21	3514904,71	5422523,35	0,202	0,41	-0,208	0,518	-0,316
22	3514923,07	5422517,05	0,827	0,381	0,446	0,297	0,53
23	3514927,98	5422515,39	1,352	1,207	0,145	1,168	0,184
24	3514957,69	5422498,42	0,231	0,06	0,171	0,076	0,155
26	3515020,39	5422495,42	1,038	1,092	-0,054	1,109	-0,071
27	3515049,49	5422486,02	0,138	0,201	-0,063	0,177	-0,039
28	3515073,34	5422497,88	1,454	1,563	-0,109	1,561	-0,107
29	3515104,14	5422490,50	0,25	0,327	-0,077	0,319	-0,069
30	3515115,56	5422488,38	0,986	1,125	-0,139	1,075	-0,089
31	3514948,61	5422509,44	0,999	0,981	0,018	1,011	-0,012
32	3514968,78	5422508,43	1,528	1,555	-0,027	1,533	-0,005
33	3514985,30	5422498,19	0,897	0,612	0,285	0,363	0,534
34	3515013,78	5422498,29	1,24	1,289	-0,049	1,305	-0,065
36	3514899,08	5422528,71	0,784	0,688	0,096	0,651	0,133
37	3514908,37	5422524,26	0,245	0,301	-0,056	0,405	-0,16
38	3514917,96	5422520,96	0,498	0,483	0,015	0,631	-0,133
39	3514933,30	5422516,83	1,124	1,137	-0,013	1,133	-0,009
41	3514996,24	5422499,68	1,011	1,05	-0,039	1,077	-0,066
42	3515053,68	5422492,30	0,824	0,912	-0,088	0,934	-0,11
43	3515096,79	5422491,67	0,341	0,394	-0,053	0,418	-0,077

Tabelle 4-1 Beobachtungspunkte im Verfeinerungsbereich

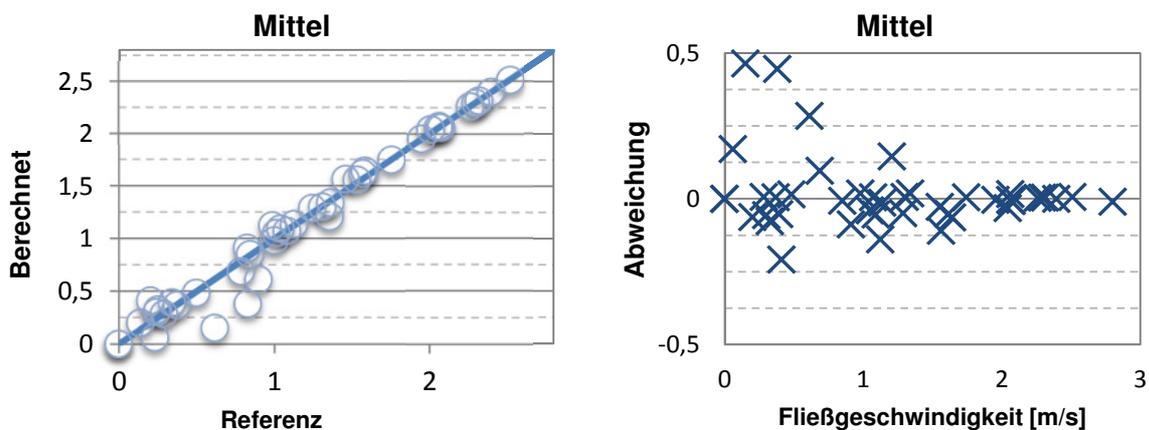


Abbildung 4.5 Fehlerabbildung mittleres Netz

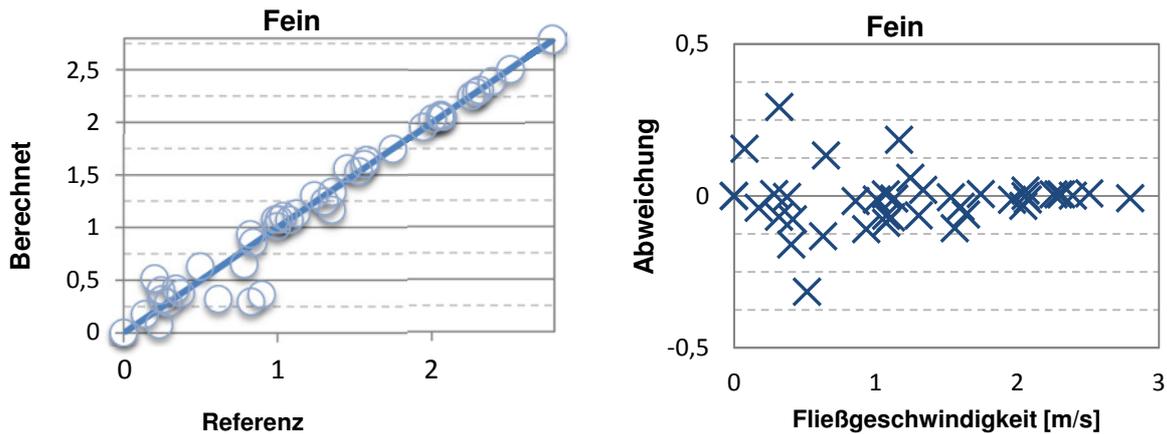


Abbildung 4.6 Fehlerabbildung feines Netz

Zu erkennen ist, dass die Werte, die nicht im Verfeinerungsbereich liegen, keine oder minimale Abweichungen aufweisen. Im Verfeinerungsbereich liegende Beobachtungspunkte zeigen sehr unterschiedliche Abweichungen auf. Die großen Differenzen bei den Punkten 19, 21 und 22 sind damit zu erklären, dass an diesen Randbereichen je nach Netz die Stellen trocken oder benetzt sind. Dementsprechend liegen große Unterschiede in den Fließgeschwindigkeiten vor.

Ein Wert im mittleren Netz (Punkte 28), sowie zwei Werte im feinen Netz (Punkte 28 & 42) haben zu hohe Werte, obwohl sie nicht zum Randbereich gehören. Dies ist damit zu erklären, dass bei dem mittleren und feinen Netz die Wasseranschlagslinie etwas tiefer liegt als beim groben Netz. Die Fließgeschwindigkeiten sind nur minimal außerhalb des Intervalls von 0,1 m/s (siehe Tabelle 4-1).

Für weitere Berechnungen wird das mittlere Netz gewählt. Gründe hierfür sind lediglich die Anzahl der Knoten und Elemente, die für die morphologische Modellierung die Obergrenze von 13.000 bzw. 20.000 Elementen nicht überschreiten dürfen.

4.3 Sensitivitätsanalyse

Wie abhängig oder unabhängig das Modell ist, soll anhand veränderbarer Parametern in diesem Abschnitt untersucht werden. Es werden folgende Parameter untersucht:

- Reduzierung der Sedimentklassen
- Anpassungslänge an den Gleichgewichtszustand
- Aktive Schicht

4.3.1 Reduzierung der Sedimentklassen

Durch die bisher verwendeten 10 Sedimentklassen ist die Anzahl der Elemente, bei denen das Programm reibungslos läuft, begrenzt. Die Begrenzung bezieht sich vor allem auf die noch ausstehenden Berechnungen mit dem Mobile-Modul. Reduziert man die Sedimentklassen auf 5, so kann das Netz aus bis zu 20.000 Elementen bestehen. Die Sedimentklassen haben die folgenden Grenzen:

Klasse	Untere Grenze [mm]	Obere Grenze [mm]
1	0,2	2
2	2	12,5
3	12,5	40
4	40	80
5	80	1000

Tabelle 4-2 Substratklassen

Die neuen Klassen entstehen durch Zusammenfassen zweier benachbarter Klassen. Eine genauere Anpassung ist deshalb nicht möglich, da die Klassen für alle Substrate gleich sein müssen und die Substrate sehr unterschiedlich sind. Eine gleichmäßige Zusammenfassung der Klassen hat für alle Substrate, mit der Ausnahme des Substrats 5, kaum Auswirkungen auf die Siebkurve.

Die Reduzierung der Klassen sind in Abbildung 4.7 für das Substrat 2 und in Abbildung 4.8 für das Substrat 5 zu sehen. Beim Substrat 2 ist keine Änderung in der Siebkurve erkennbar. Eine Verschiebung zu feineren Sedimenten ist bei Substrat 5 der Fall. Weitere Kurven sind dem Anhang C zu entnehmen.

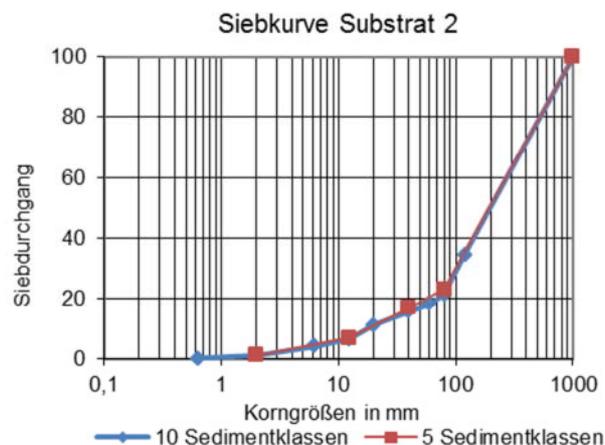


Abbildung 4.7 Siebkurven für Substrat 2

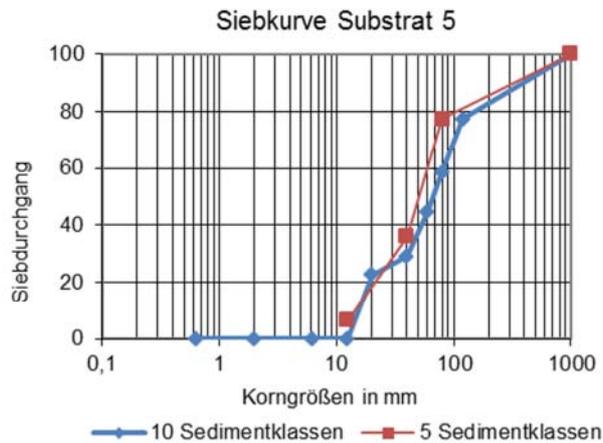


Abbildung 4.8 Siebkurven für Substrat 5

Für die Fließgeschwindigkeit und die Wasserspiegellage bei einem Abfluss von $400 \text{ m}^3/\text{s}$ hat die Reduzierung der Sedimentklassen keine Auswirkungen (siehe Anhang D). Jedoch ist festzustellen, dass für den Shields Parameter eine Zusammenfassung der Sedimentklassen folgende Auswirkungen hat.

Im Bereich von sehr feinen Substrat (Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10, blauer Bereich) ist der Parameter bei weniger Sedimentklassen erhöht. Die erste Vermutung lässt darauf schließen, dass dies mit der Zusammenfassung der beiden kleinsten Klassen zusammenhängt. Da für die Berechnung des Shieldswertes der d_{75} Korndurchmesser berechnet wird und dieser bei Substrat 3 außerhalb der Siebkurve liegt, liegt die Vermutung nahe, dass es sich hierbei um einen Berechnungsfehler des Korndurchmessers handelt. Weitere Modellierungen zeigen allerdings, dass dies ein größeres Problem darstellt. Bei höheren Abflüssen wird dieser Bereich von sehr hohen Werten beeinflusst (siehe Kapitel 5.2.1).

Für die größeren Substratflächen (Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10, schwarzer Bereich) hat die Reduzierung der Sedimentflächen keine Auswirkung. Somit ist für den relevanten Bereich des Prallufers keine Veränderung erkennbar.

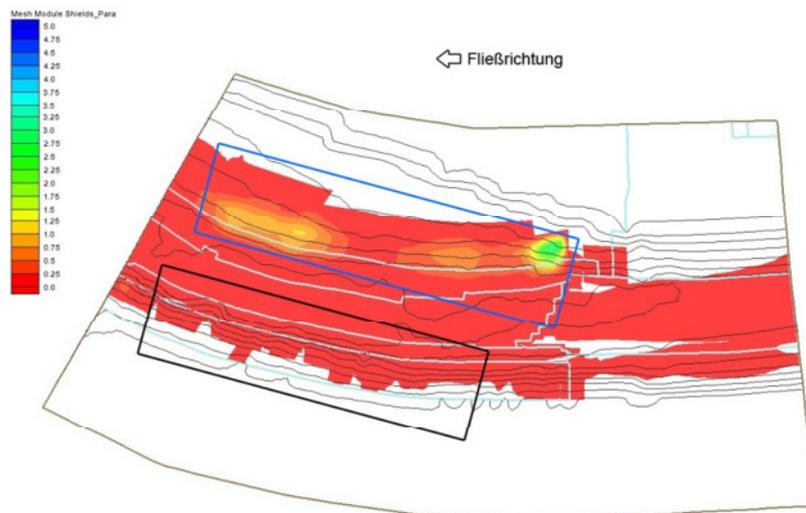


Abbildung 4.9 Shields Parameter bei 10 Sedimentklassen

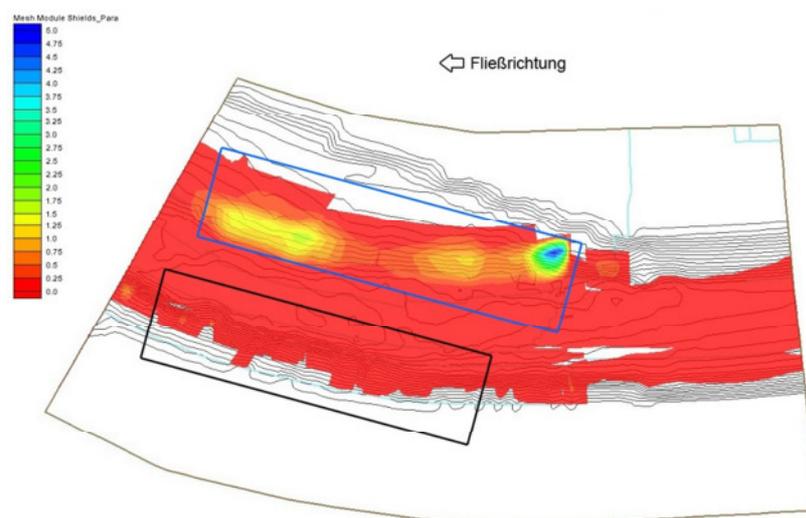


Abbildung 4.10 Shields Parameter bei 5 Sedimentklassen

4.3.2 Anpassungslänge an den Gleichgewichtszustand

Für die Anpassungslänge gibt es unterschiedliche Definitionen. In manchen Fällen wird sie als Sprunglänge, die ein Sediment beim Transport zurücklegt (Bui & Rutschmann, 2006) beschrieben. Eine weitere Definition ist die Länge, die das Sediment benötigt, um von einem Nicht-Gleichgewichtszustand in einen Gleichgewichtszustand zu gelangen. In dem SRH-2D-Programm gibt es vier Ansätze diese Länge zu beschreiben.

Der erste Ansatz ist ein konstanter Wert, der für Fließgewässer nicht praktikabel ist. Phillips und Sutherland (1) (1989) beschreiben die Länge als eine Funktion des Shields Parameters und des Korndurchmessers.

$$L_b = 4000(F^* - F_{crit}^*)d_{50}$$

Gleichung 4.3 Länge nach Phillips und Sutherland (1989)

L_b	[m]	Anpassungslänge
F^*	[-]	Shields Parameter
F_{crit}^*	[-]	kritische Shields Parameter
d_{50}	[m]	Korndurchmesser mit 50% Siebdurchgang

Van Rijn (2) (1984) berechnet die Länge lediglich durch einen Faktor und den Wasserstand.

$$L_b = 7,3h$$

Gleichung 4.4 Länge nach van Rijn (2) (1984)

L_b	[m]	Anpassungslänge
h	[m]	Wassertiefe

Einen weiteren Ansatz nach van Rijn (3) (1987) beschreibt die Gleichung 4.5 mit den Parametern Fließgeschwindigkeit, kinematischen Viskosität und Wasserstand. Eine genaue Beschreibung der Gleichung ist der Literatur zu entnehmen (Bui & Rutschmann, 2006).

$$L_b = 3d_{50}D_*^{0.6}T^{0.9}$$

Gleichung 4.5 Länge nach van Rijn (3) (1987)

Ein Vergleich der Erosionstiefen bei einem Abfluss von 400 m³/s mit den Ansätzen nach Phillips und Sutherland (1) und van Rijn (2 und 3) ist in den folgenden Abbildungen zu sehen.

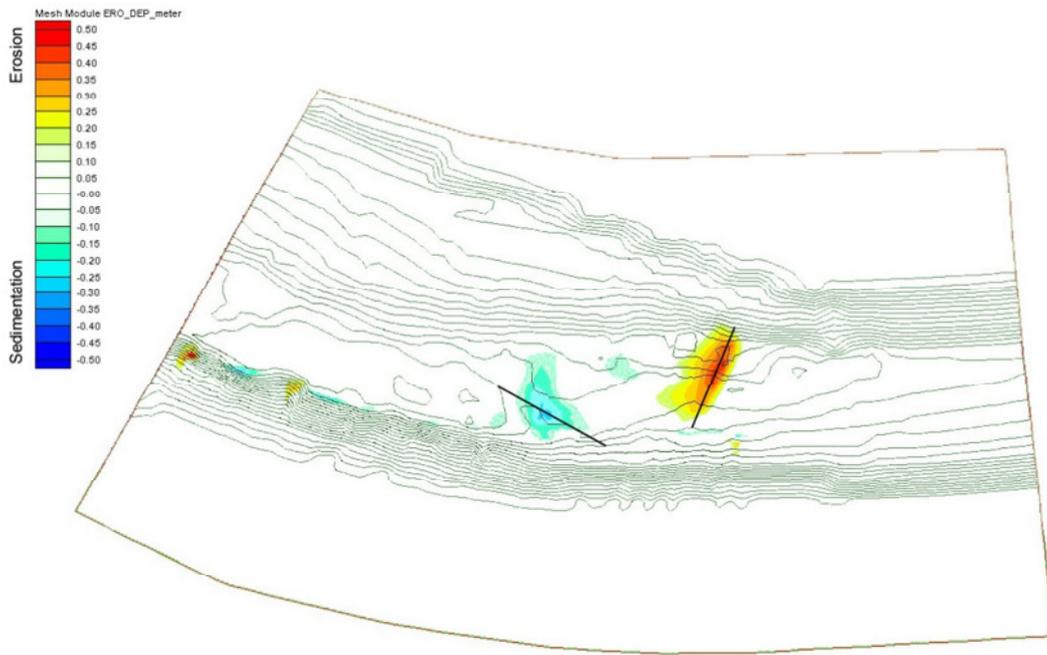


Abbildung 4.11 Erosionstiefen [m] nach Sutherland (1)

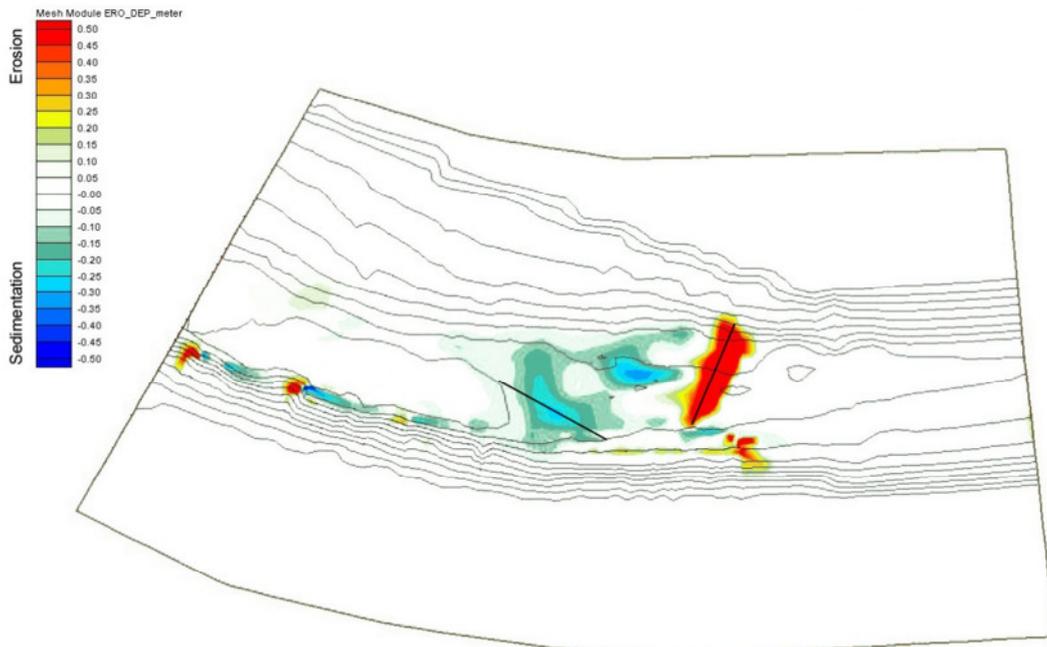


Abbildung 4.12 Erosionstiefen [m] nach van Rijn (2)

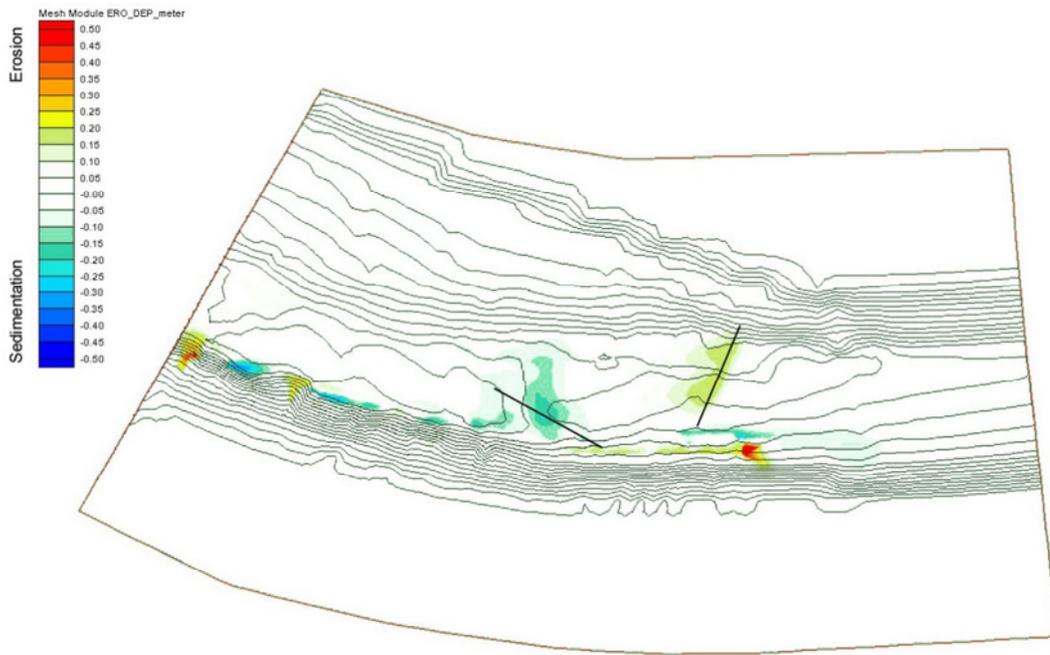


Abbildung 4.13 Erosionstiefen [m] nach Rijn (3)

Zu erkennen ist, dass sich die Ergebnisse von Phillips und Sutherland (1) und die von van Rijn (3) nur sehr wenig unterscheiden. Wohingegen der Ansatz von Van Rijn (2) tiefere Erosionen und höhere Sedimentationen aufzeigen (siehe Abbildung 4.14 und Abbildung 4.15).

Berücksichtigt man die Modellierungszeit, so ist lediglich die Berechnung nach Phillips und Sutherland (1) realistisch. Die Berechnung nach van Rijn (2) ist nicht geeignet, da solche Eintiefungen in kurzer Zeit nicht der Realität entsprechen.

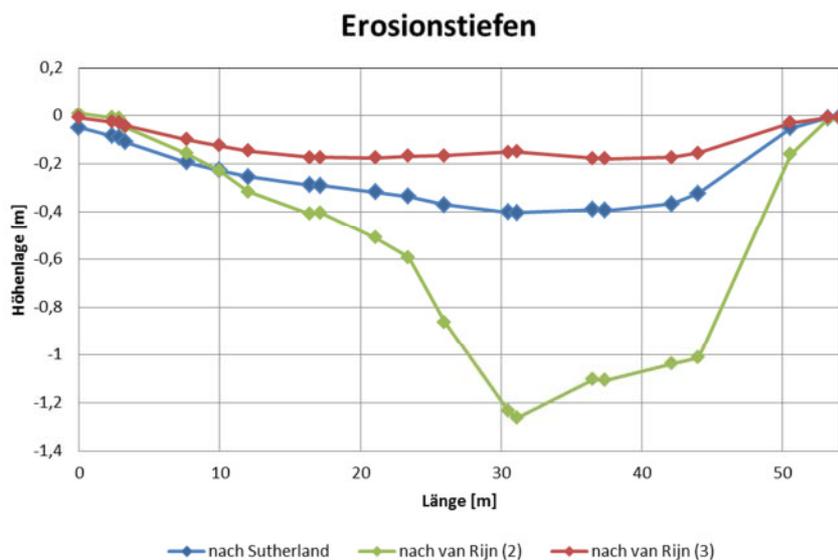


Abbildung 4.14 Erosionstiefen [m]

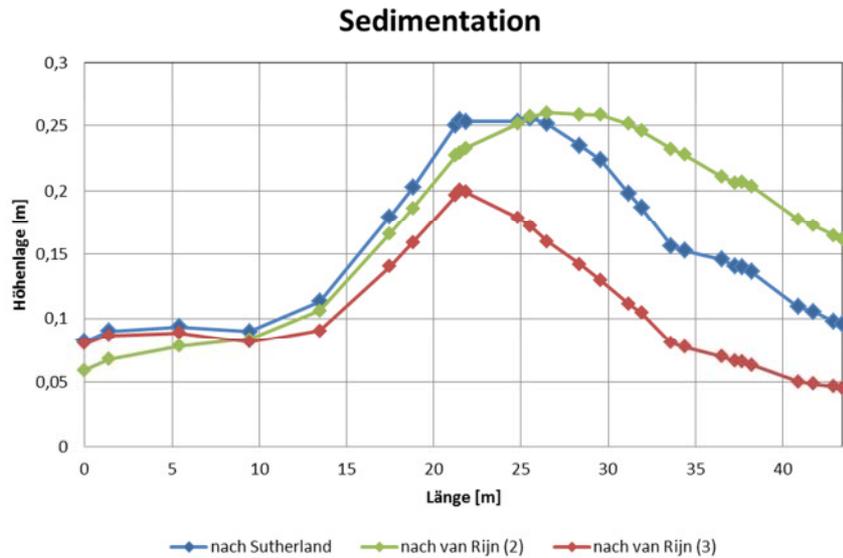


Abbildung 4.15 Sedimentation [m]

4.3.3 Aktive Schicht

Die aktive Schicht in einem Flussbett beschreibt die Dicke der oberen Sohlschicht, die durch die Sohlschubspannung beeinflusst wird.

Beim Sedimenttransport halten sich Sedimente in Schwebelage oder in der aktiven Schicht auf.

Die aktive Schicht kann zum einen als konstanter Wert angenommen werden. Dies ist für die Anwendung mit verschiedenen Substraten nicht zweckmäßig, daher kann die Mächtigkeit der aktiven Schicht andererseits mit dem Korndurchmesser d_{90} und einem Multiplikator die Dicke der Schicht berechnet werden.

Für die Untersuchung der Auswirkungen der Dicke der aktiven Schicht werden die Multiplikatoren 1, 2 und 3 angewendet. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen 4.16, 4.17 und 4.18 zu sehen. Die Erosionstiefen, die sich bei der Modellierung mit einem Abfluss von $400 \text{ m}^3/\text{s}$ ergeben, werden in der Abbildung 4.19 dargestellt. Durch identische Werte (siehe Tabelle 4-3) der Erosionstiefen ist die grüne Linie durch die rote Linie überlagert. Die weiteren Modellierungen werden mit dem Multiplikator 3 durchgeführt. Der Multiplikator 2 kann wegen der Übereinstimmung der Ergebnisse ebenfalls verwendet werden. Lediglich der Multiplikator 1 wird wegen der größeren Erosionstiefen ausgeschlossen.

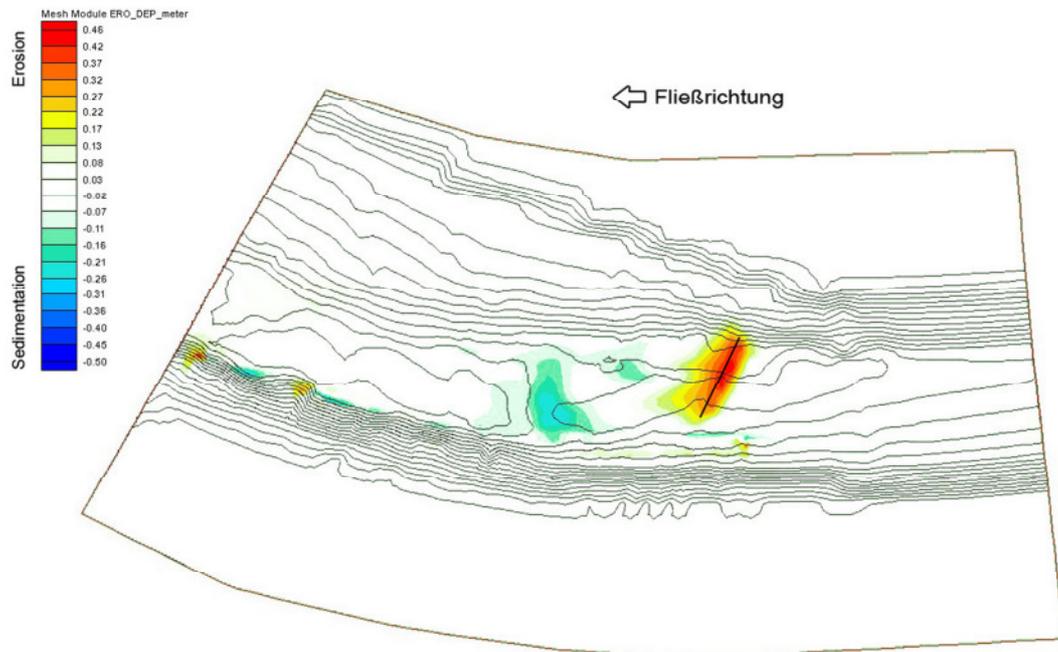


Abbildung 4.16 Erosionstiefen [m] bei einer aktiven Schicht von $1x d_{90}$

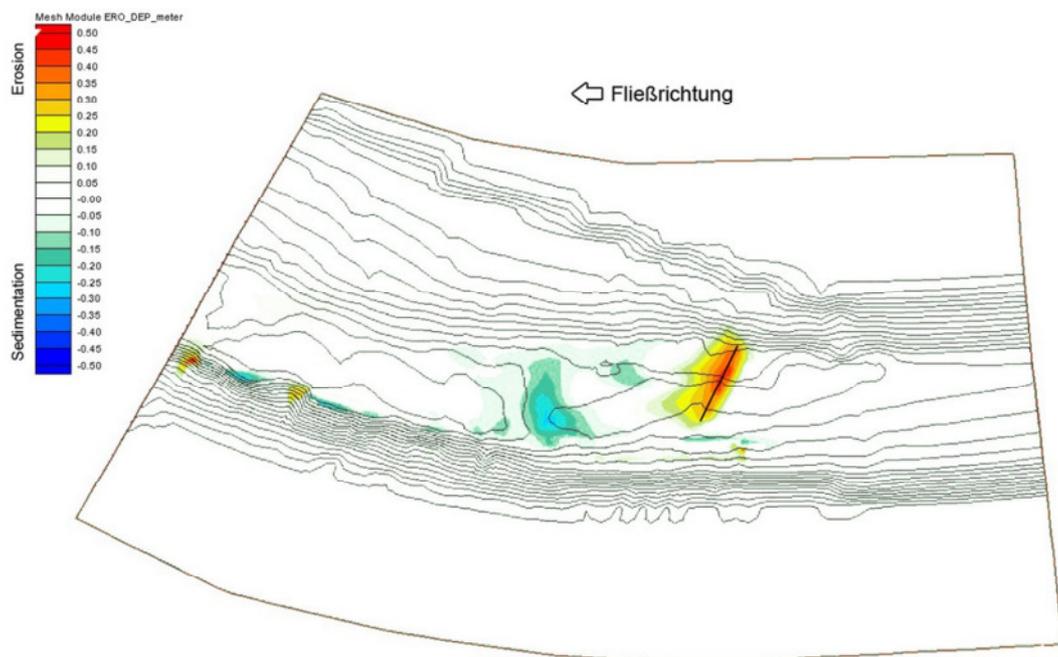


Abbildung 4.17 Erosionstiefen [m] bei einer aktiven Schicht von $2x d_{90}$

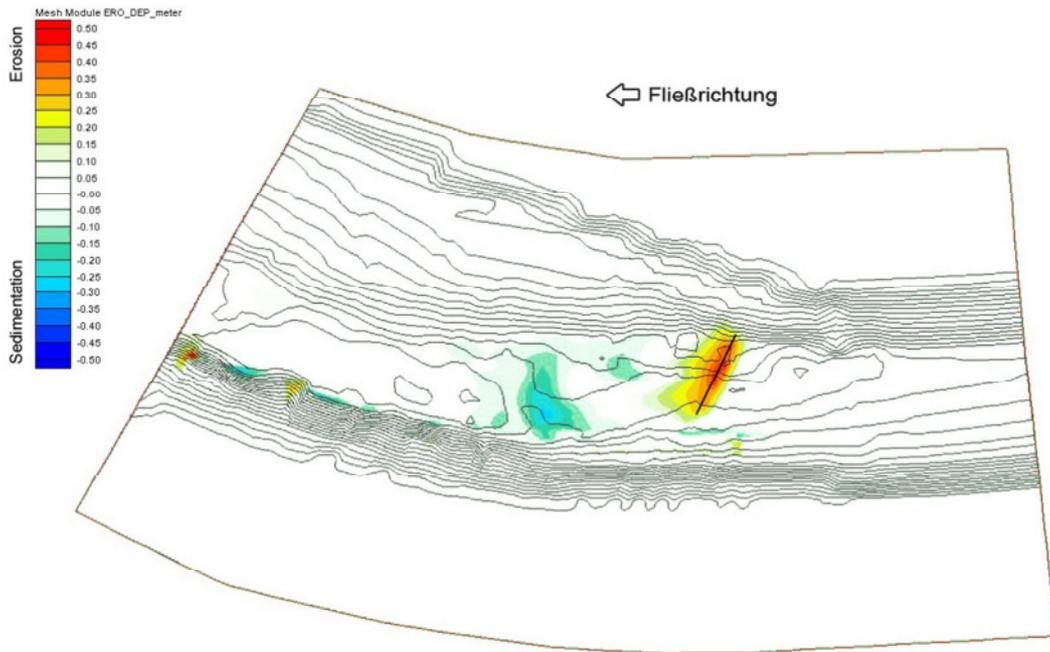


Abbildung 4.18 Erosionstiefen [m] bei einer aktiven Schicht von $3x d_{90}$

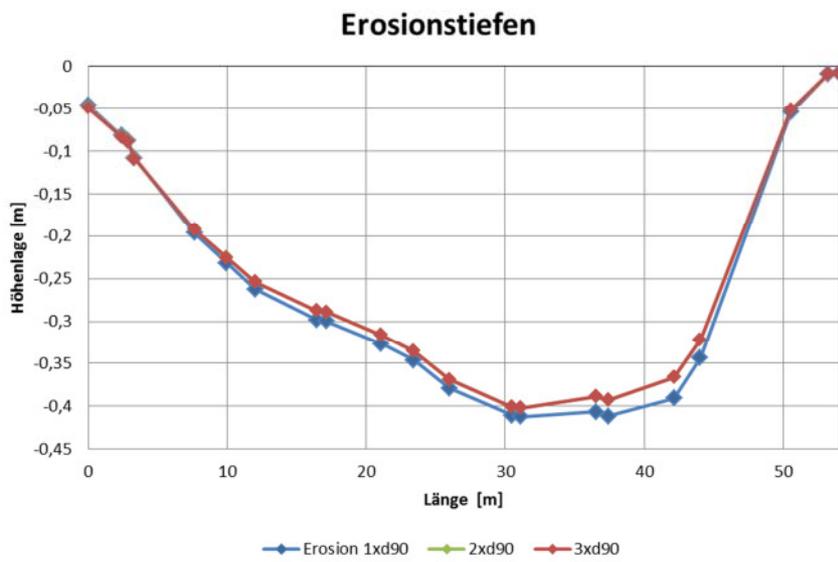


Abbildung 4.19 Erosionstiefen [m]

	1xd90	2xd90	3xd90
Länge	v in m/s	v in m/s	v in m/s
0	-0,04605	-0,04836	-0,04937
2,3839142	-0,08167	-0,08273	-0,0836
2,8269475	-0,0874	-0,08813	-0,08899
3,3244365	-0,10794	-0,10843	-0,10912
7,6546953	-0,19636	-0,19235	-0,19255
9,959308	-0,23186	-0,22527	-0,22542
12,007362	-0,26222	-0,25353	-0,25363
16,418754	-0,29825	-0,28722	-0,28722
17,130344	-0,29991	-0,28883	-0,28883
21,078867	-0,32705	-0,31628	-0,31628
23,409858	-0,34627	-0,33571	-0,33571
25,992603	-0,37899	-0,36886	-0,36886
30,511832	-0,41066	-0,40084	-0,40084
31,141822	-0,412	-0,40222	-0,40222
36,522896	-0,40648	-0,38895	-0,38897
37,41011	-0,41172	-0,39258	-0,39258
42,154058	-0,39072	-0,36597	-0,36597
44,026604	-0,34373	-0,32234	-0,32234
50,580661	-0,05424	-0,05121	-0,05121
53,269369	-0,00861	-0,00859	-0,00859
54,032028	-0,00803	-0,00801	-0,00801

Tabelle 4-3 Erosionstiefen

5 Ergebnisse

5.1 Hydraulische Modellierung

Bei der hydraulischen Modellierung ist vor allem die Fließgeschwindigkeit und die Wassertiefe von Interesse. Die Modellierungen werden mit den Abflüssen 100 m³/s und 400 m³/s durchgeführt. Die Hochwasserhäufigkeiten sind in Tabelle 5-1 dargestellt. Eine Modellierung mit höheren Abflüssen ist wegen der Instabilität des Modells nicht möglich.

Hochwasserhäufigkeit	Abfluss [m ³ /s]
HQ ₂	569
HQ ₅	836
HQ ₁₀	1014
HQ ₂₀	1184
HQ ₅₀	1408
HQ ₁₀₀	1578

Tabelle 5-1 Hochwasserhäufigkeiten für den Neckar unterhalb der Murr-Einmündung

5.1.1 Problembehandlung

Die Modellierung der Modelle mit und ohne Buhnen verläuft ohne größere Schwierigkeiten. Im Gegensatz dazu bereitet das Geländemodell mit Pfahlbuhnen größerer Probleme. Beim Versuch der hydraulischen Modellierung der Pfähle stellt sich heraus, dass die senkrechten Flächen der Pfähle nicht modelliert werden können. Die Interpolation zwischen den

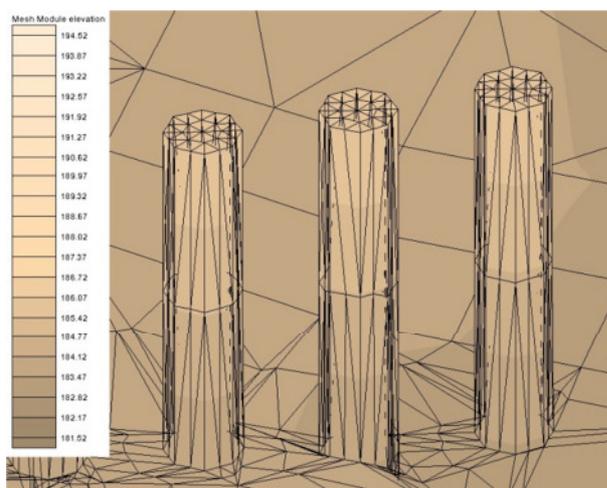


Abbildung 5.1 Detail Pfähle

senkrecht übereinander liegenden Knotenpunkten ist wegen ihrer unterschiedlichen Werte nicht möglich. Die verschiedenen Werte entstehen, da am Fußpunkt eines Pfahls immer ein Wasserstand vorhanden ist. Bei einem Abfluss von 100 m³/s liegt der Wasserspiegel unterhalb der Pfahloberkante. Sind die Unterschiede zwischen den beiden Werten groß, hat das Programm Schwierigkeiten mit der Interpolation.

Um trotzdem eine Modellierung mit Pfahlbuhnen durchführen zu können, werden die Pfähle als Aussparungen (Variante 1) im Geländemodell dargestellt (vgl. Abbildung 2.11). Nachteil dieser Darstellung ist, dass die Pfähle auch bei Hochwasser nicht überspült werden und daher nur den Situationen mit kleineren Abflüssen, hier $100 \text{ m}^3/\text{s}$, entsprechen. Zusätzlich treten bei der Modellierung von höheren Abflüssen Schwierigkeiten an den Knotenpunkten der Aussparungen auf, was eine automatische Beendigung der Modellierung zur Folge hat. Ein Lösungsansatz besteht darin, das Maschennetz um die Aussparungen auf eine Maschenweite von ca. $0,01 \text{ m}$ zu verfeinern. Dieser Ansatz ist hier nicht praktikabel, da durch die Verfeinerung die Anzahl der Knoten und Elemente die im Programm festgelegte Obergrenze für eine morphologische Modellierung bei gleichbleibender Anzahl von Pfählen überschreiten würde.

Ein weiterer Ansatz, der letztlich auch angewendet wird, ist die Darstellung der Pfahlbuhnen durch erhöhte Rauheit (Variante 2). Bei einem Rauheitswert nach Manning von 100.000 sind die Flächen der Pfähle für die Strömung undurchlässig. Selbst bei kleinen Abflüssen ist ein Wasserstand auf der Fläche der Pfähle vorhanden, wie es in der Realität jedoch nicht vorkommt.

Einen weiteren Nachteil hat die Erhöhung der Rauheit auf die Elemente, die an Knotenpunkte mit zwei verschiedenen Rauheitswerten angrenzen. Die Ergebnisse an den Elementen, die durch Interpolation der Grenzknoten errechnet werden, zeigen keine realistischen Werte, wie z.B. überhöhte Wasserspiegellagen (Abbildung 5.2).

Der Nachteile ungeachtet ist es somit möglich eine Modellierung bei niedrigen und hohen Abflüssen durchzuführen.

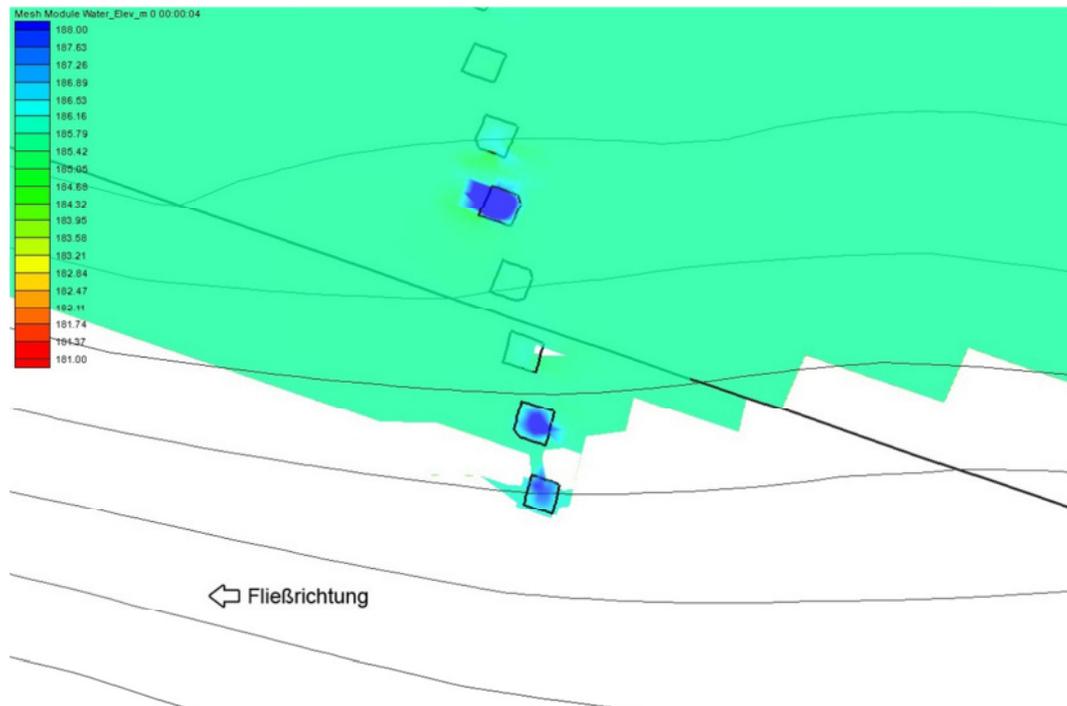


Abbildung 5.2 Überhöhte Wasserspiegellage [m]

5.1.2 Fließgeschwindigkeiten

Die Modellierungen ohne Buhnen stellen die Situation ohne Eingriffe dar. Bei Eingriffen mit Buhnen und Pfählen werden die Unterschiede bei Eingriffen aufgezeigt. Bei einem Abfluss von $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ist eine Zunahme der Fließgeschwindigkeit im Geländemodell mit Buhnen in der Flussmitte zu erkennen (Abbildung 5.4). Im Geländemodell mit Pfahlbuhnen (Variante 2) ist die Fließgeschwindigkeit am Ufer deutlich reduziert gegenüber dem Modell ohne Buhnen (Abbildung 5.6). Vergleicht man das Ergebnis der beiden Modelle mit Pfahlbuhnen (Variante 1 und 2) so ist ein besseres Ergebnis vor allem bei den Strömungsabbildungen mit der Variante 1 zu erzielen (Abbildung 5.5).

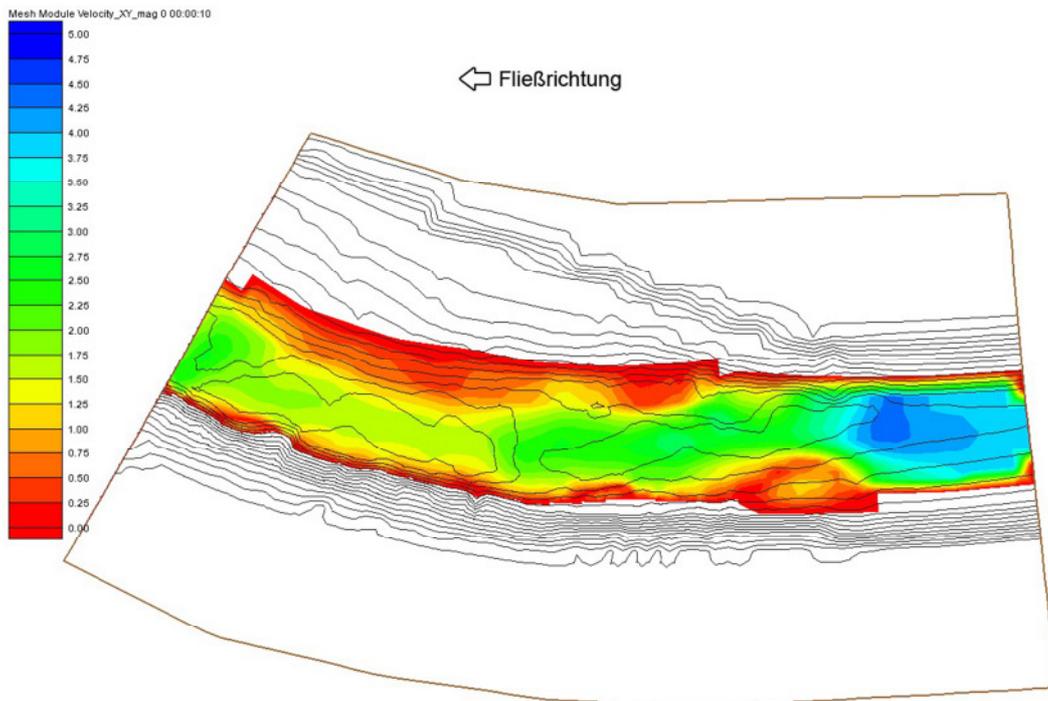


Abbildung 5.3 Fließgeschwindigkeiten [m/s], Abfluss 100m³/s, Modell ohne Buhnen

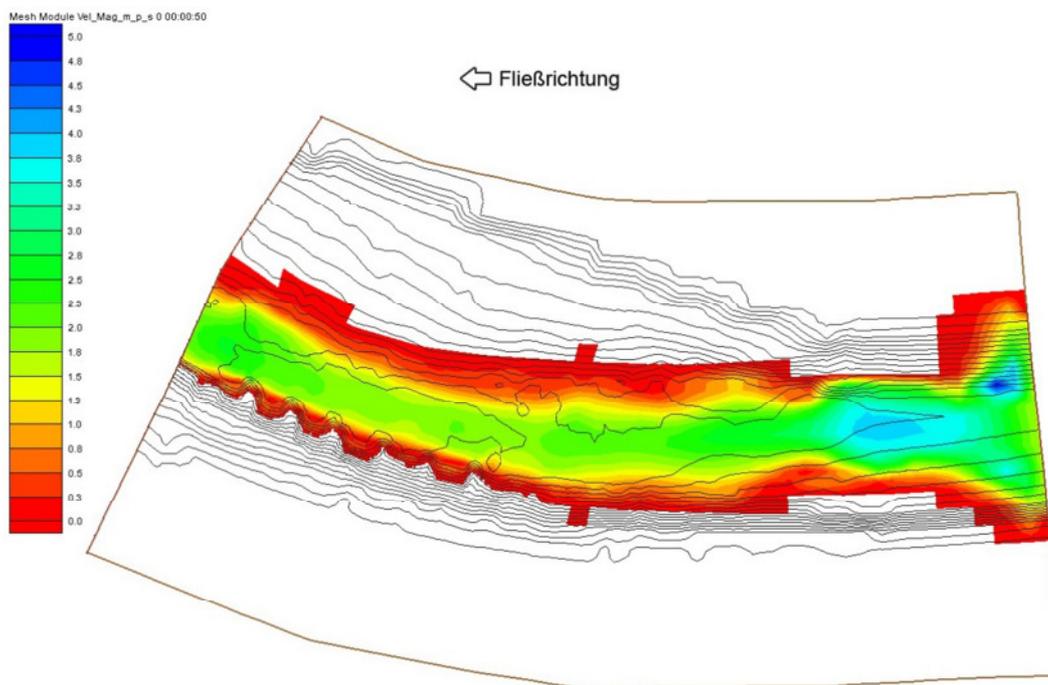


Abbildung 5.4 Fließgeschwindigkeiten [m/s], Abfluss 100m³/s, Modell mit Buhnen

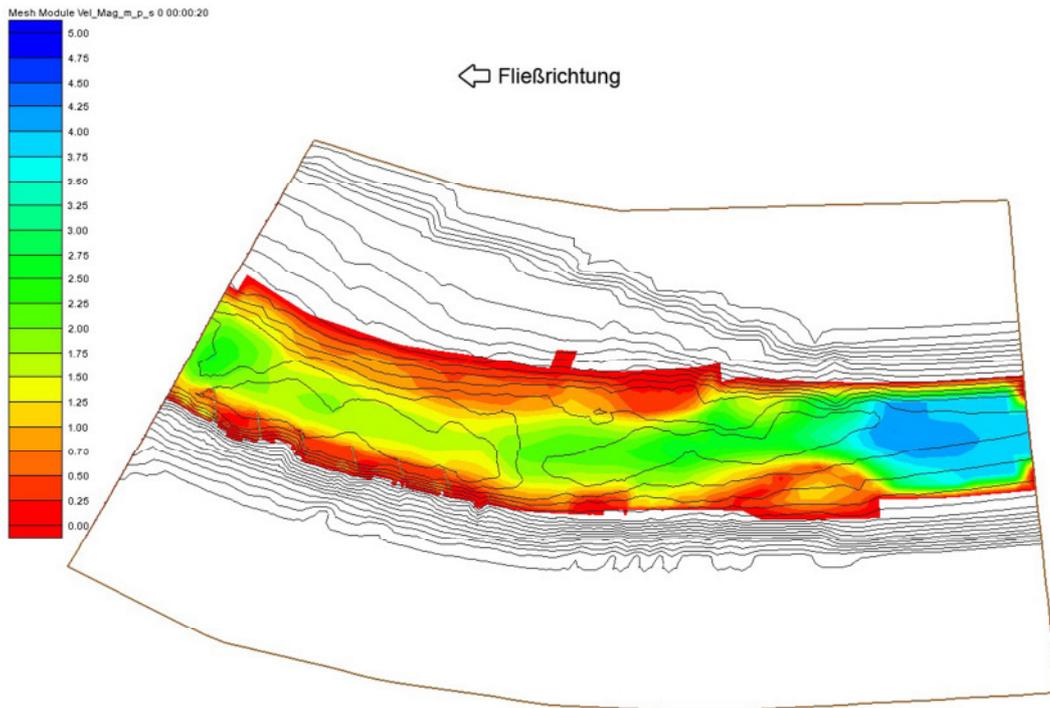


Abbildung 5.5 Fließgeschwindigkeiten [m/s], Abfluss $100\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 1

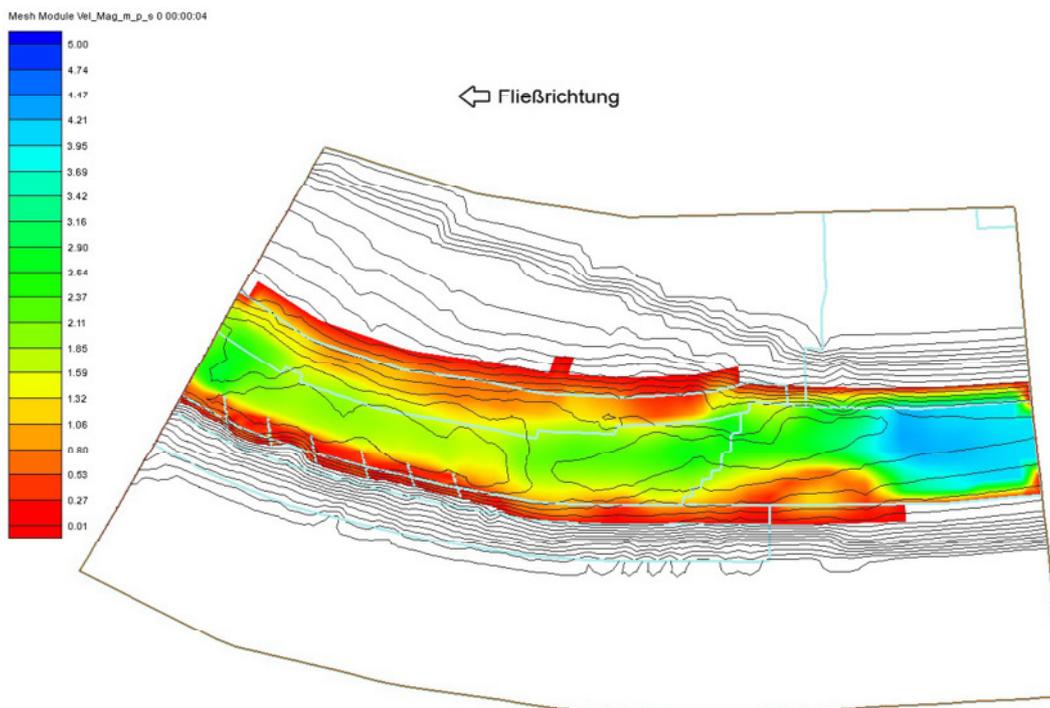


Abbildung 5.6 Fließgeschwindigkeiten [m/s], Abfluss $100\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 2

Die Strömungsrichtungen sind in den folgenden Abbildungen zu sehen. Dabei ist bei dem Modell mit Bühnen (Abbildung 5.8) eine Wirbelbildung in den Bühnenfeldern erkennbar. In den anderen Modellen stellt sich eine geradlinige Strömung ein. Zur besseren Visualisierung sind Bildausschnitte des Strömungsvideos im Anhang E Strömungsmuster beigefügt.

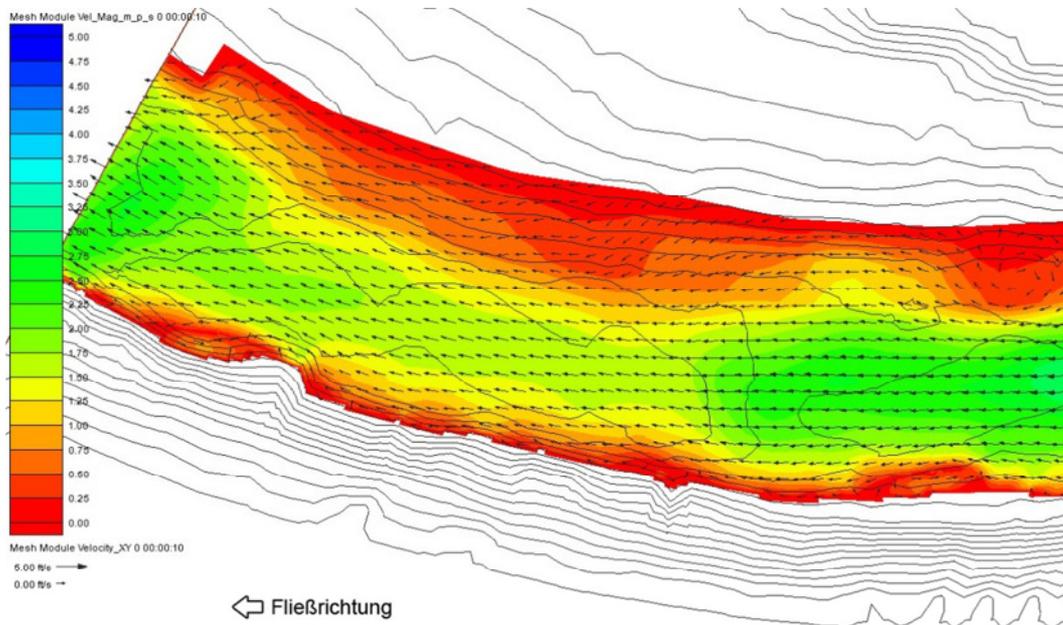


Abbildung 5.7 Strömungsmuster, Abfluss 100m³/s, Modell ohne Bühnen

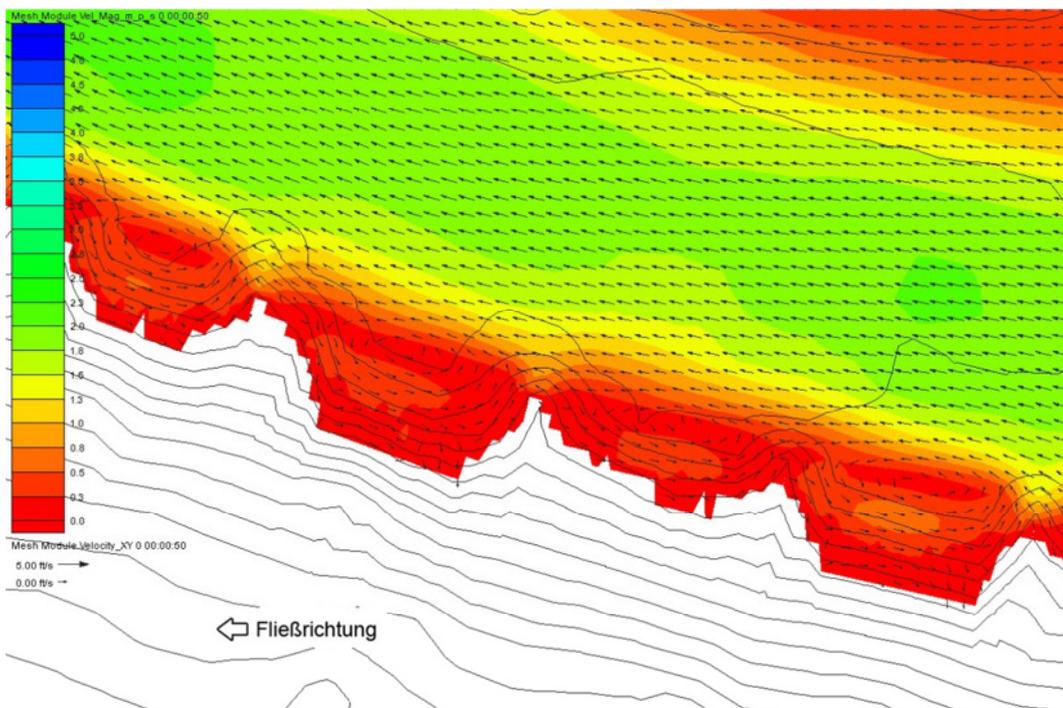


Abbildung 5.8 Strömungsmuster, Abfluss 100m³/s, Modell mit Bühnen

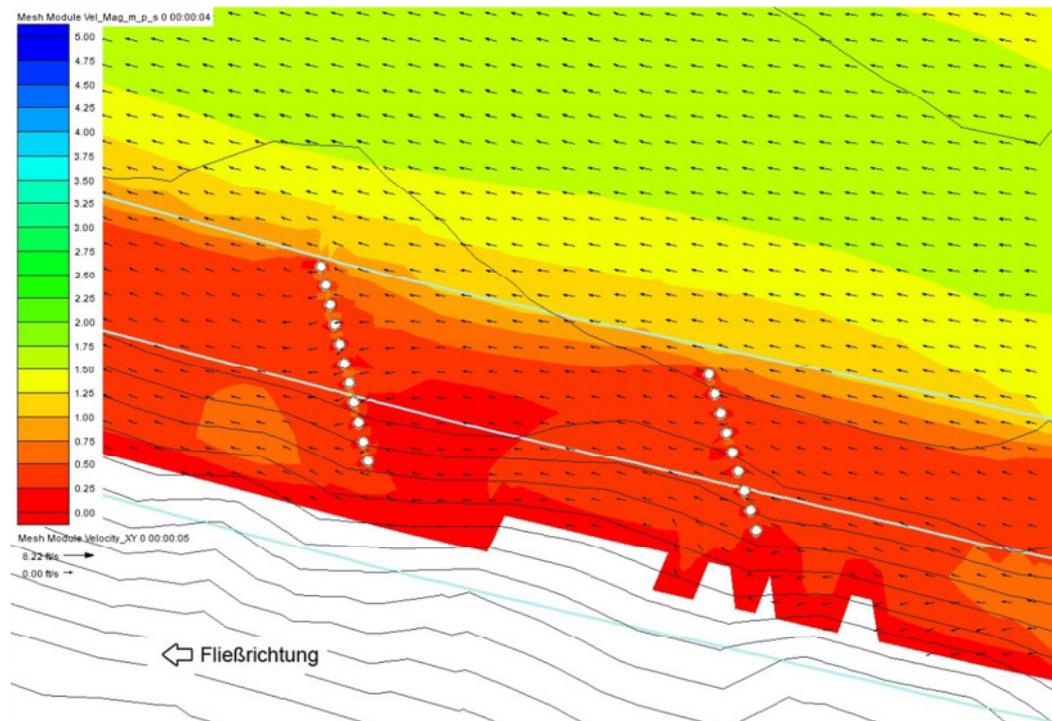


Abbildung 5.9 Strömungsmuster, Abfluss $100\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 1

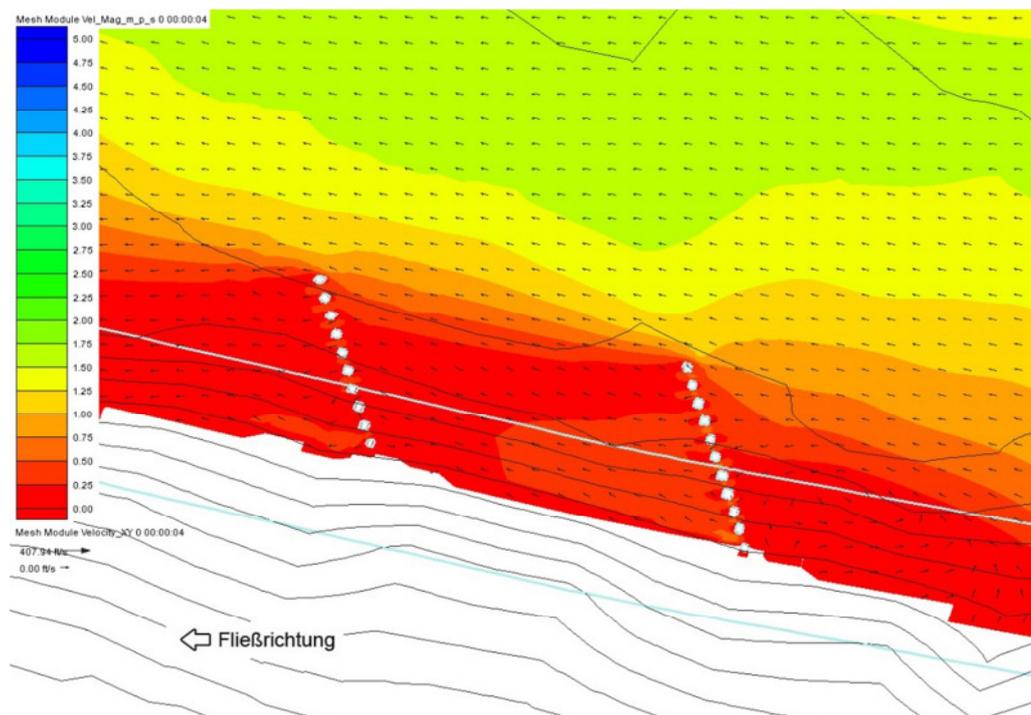


Abbildung 5.10 Strömungsmuster, Abfluss $100\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 2

Bei einem höheren Abfluss ($400\text{ m}^3/\text{s}$) treten am Prallufer des Modells ohne Buhnen sehr hohe Geschwindigkeiten auf, die zu starken Erosionen führen können (Abbildung 5.11).

In dem Modell mit Buhnen werden diese mit erhöhter Geschwindigkeit überströmt. Die Fließgeschwindigkeiten entlang des Ufers sind bei überströmten Buhnen geringer als mit

Pfahlbuhnen (Abbildung 5.12 und Abbildung 5.13). Daher ist es erforderlich das Ufer oberhalb der Pfahlbuhnen gegen Erosion zu schützen. Zwischen den Pfahlreihen wird die Strömung abgebremst. In diesem Bereich ist das Ufer vor Erosion geschützt.

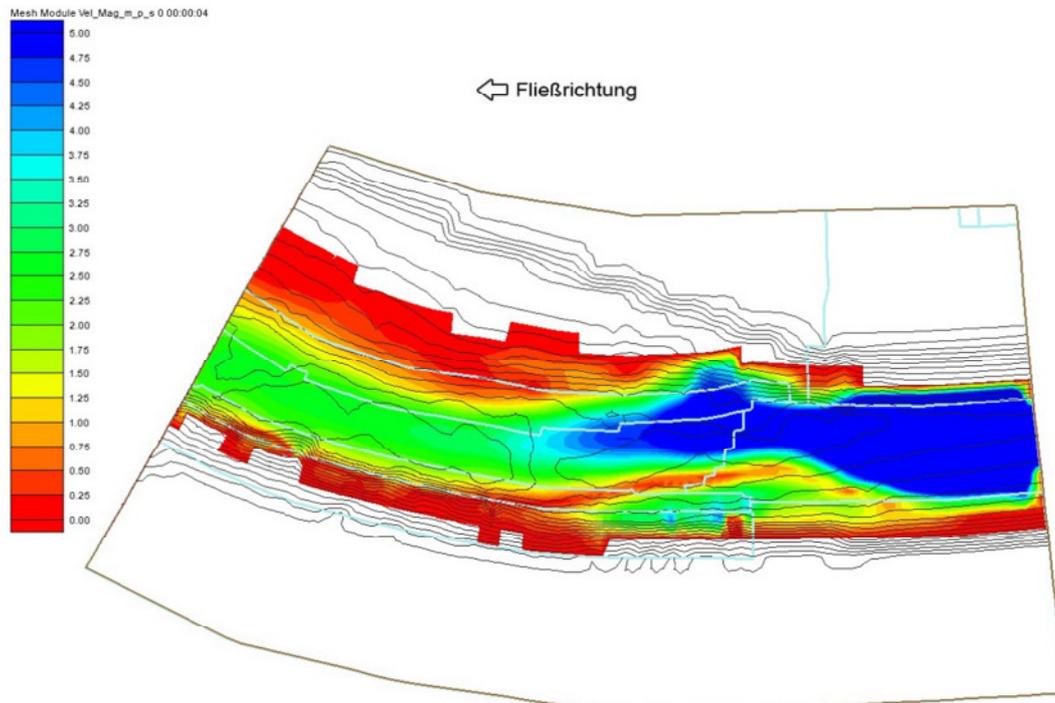


Abbildung 5.11 Fließgeschwindigkeiten [m/s], Abfluss $400\text{m}^3/\text{s}$, Modell ohne Buhnen

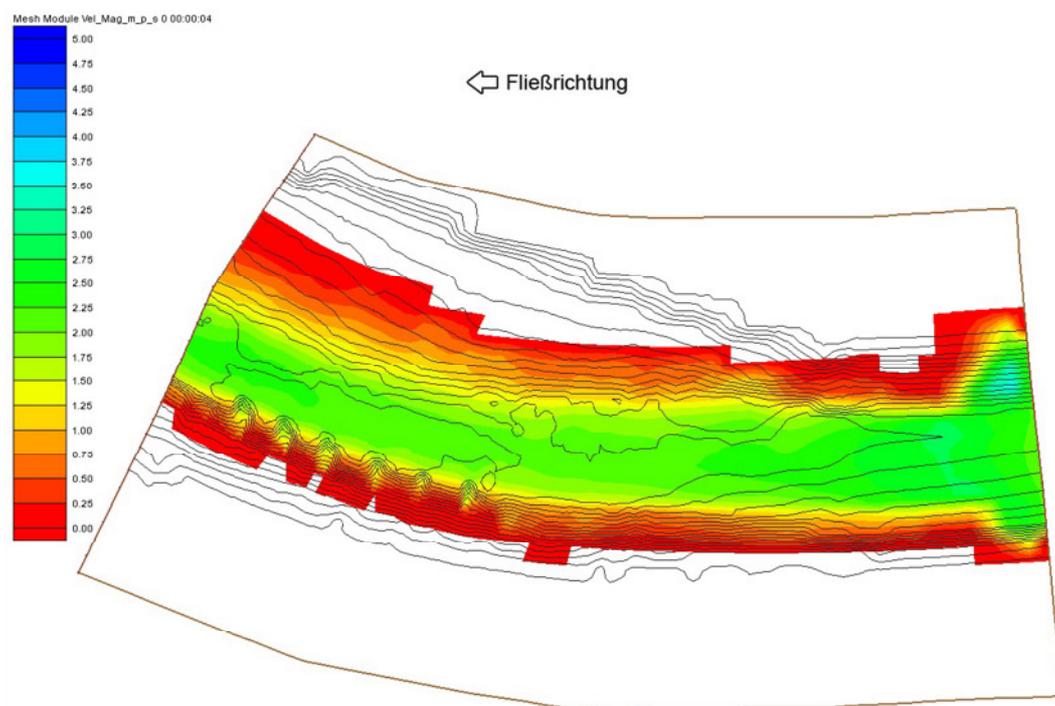


Abbildung 5.12 Fließgeschwindigkeiten [m/s], Abfluss $400\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Buhnen

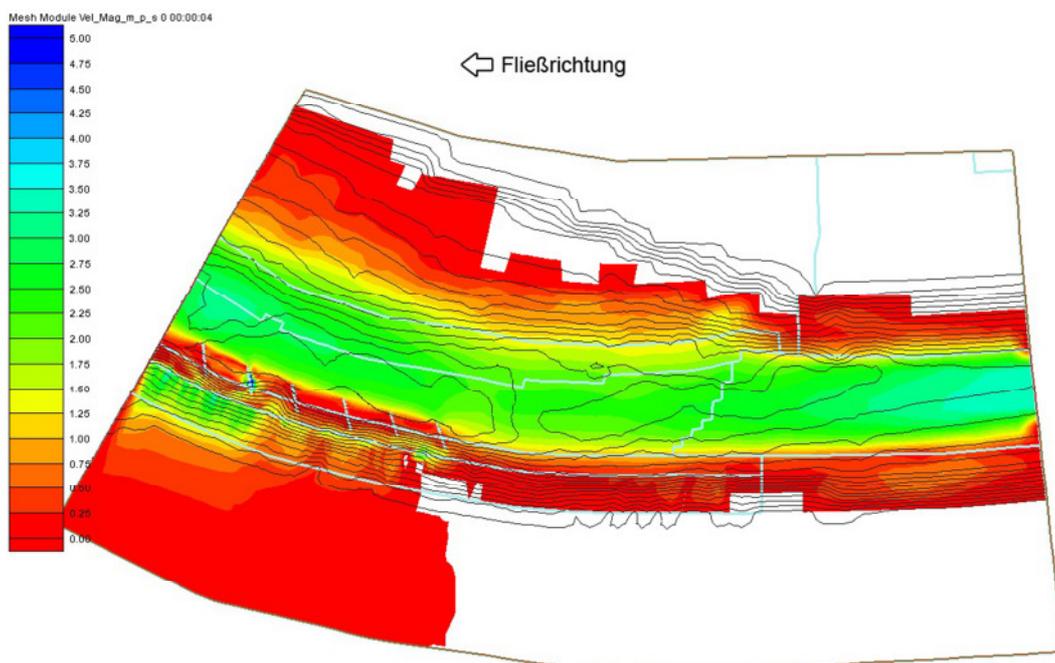


Abbildung 5.13 Fließgeschwindigkeiten [m/s], Abfluss 400m³/s, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 2

Bei der Überströmung von undurchlässigen Buhnen, was bei einem Abfluss von 400 m³/s gegeben ist, treten keine Wirbelbildungen mehr auf (Abbildung 5.15). Allerdings ist festzustellen, dass sich bei Pfahlbuhnen an einigen Stellen Wirbel bilden (Abbildung 5.16).

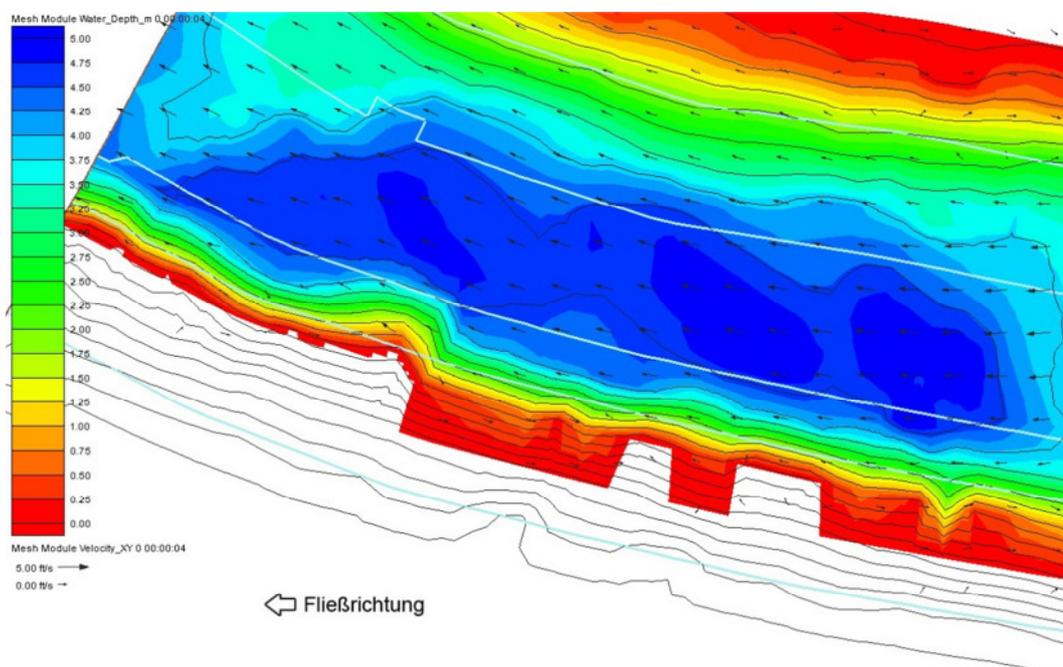


Abbildung 5.14 Strömungsmuster, Abfluss 400m³/s, Modell ohne Buhnen

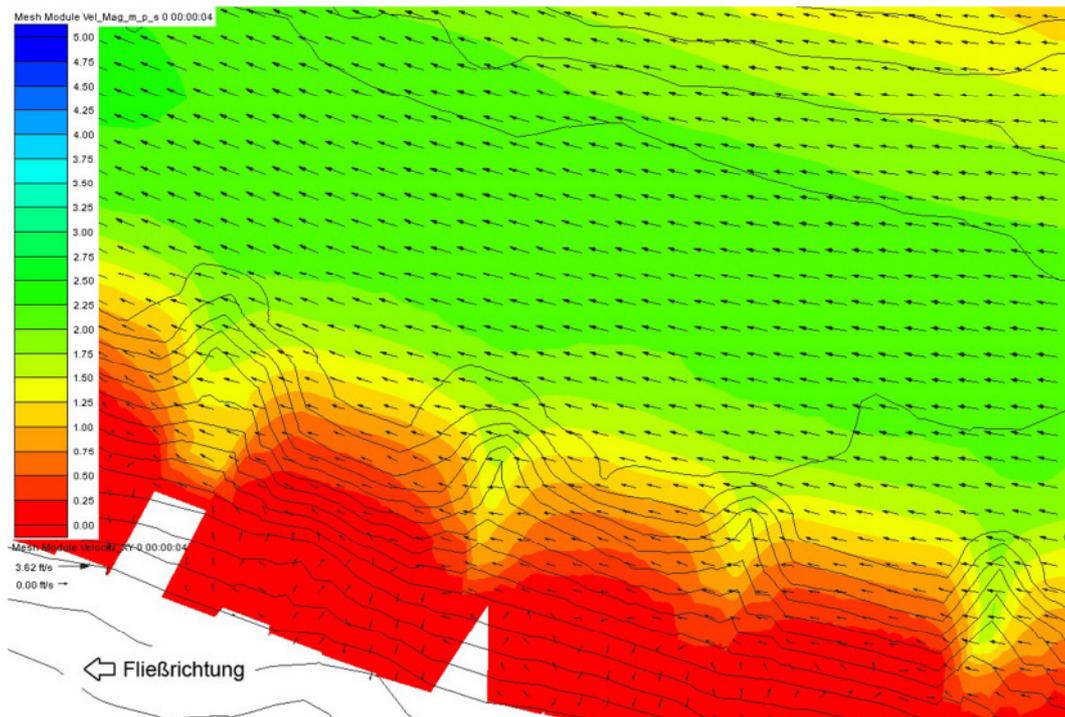


Abbildung 5.15 Strömungsmuster, Abfluss 400m³/s, Modell mit Bunnen

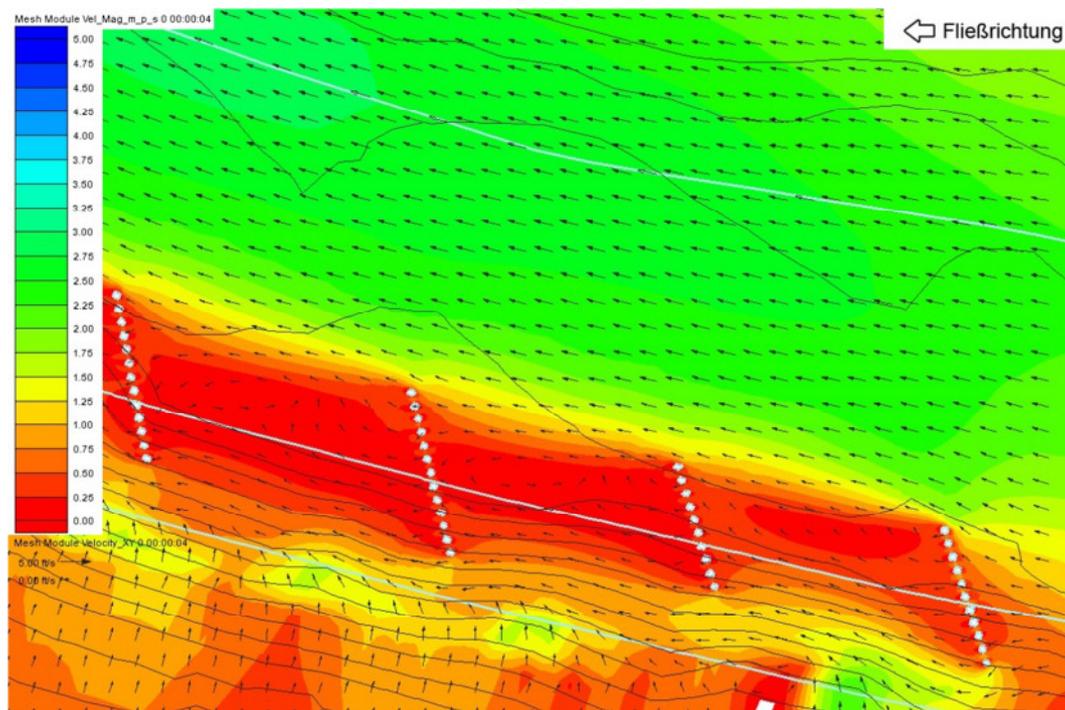


Abbildung 5.16 Strömungsmuster, Abfluss 400m³/s, Modell mit Pfahlbunnen Variante 2

5.1.3 Wassertiefen

An dieser Stelle werden die Wassertiefen der verschiedenen Modelle miteinander verglichen. Einen Vergleich der Wasserspiegellagen der verschiedenen Modelle ist in diesem Fall nicht möglich, da die Unterschiede in der Höhe der Wasserspiegellage sowohl von der Wassertiefe als auch von der Sohlhöhe, die je nach Modell andere Höhen aufweisen, abhängig sind. Deshalb wird hier der Wasserstand zum Vergleich herangezogen. Stellt man die Abbildung 5.17 und Abbildung 5.19 gegenüber, so ist eine größere Wassertiefe beim Modell mit Pfahlbuhnen (Variante 2) zu erkennen als ohne Buhnen. Nimmt man das Modell mit Buhnen (Abbildung 5.18) noch hinzu, so ist ebenfalls eine größere Wassertiefe vorzufinden, jedoch sind die Unterschiede nicht so deutlich wie beim vorherigen Vergleich. Eine Modellierung mit Pfahlbuhnen als Aussparungen (Variante 2) zeigt ein plausibles Ergebnis (Abbildung 5.20).

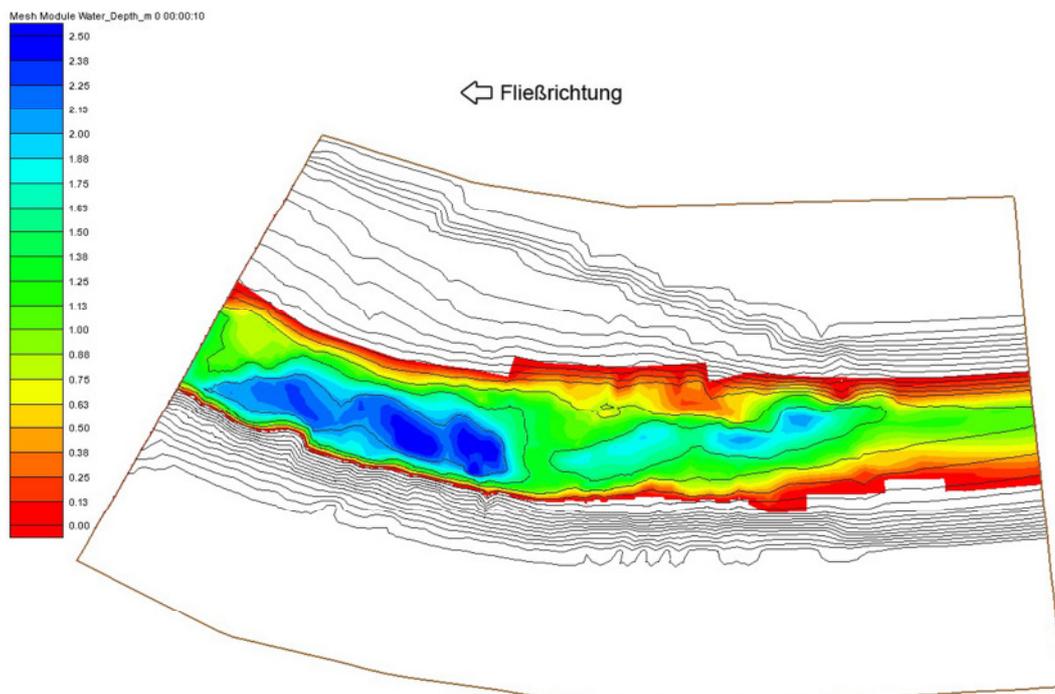


Abbildung 5.17 Wassertiefen [m], Abfluss 100 m³/s, Modell ohne Buhnen

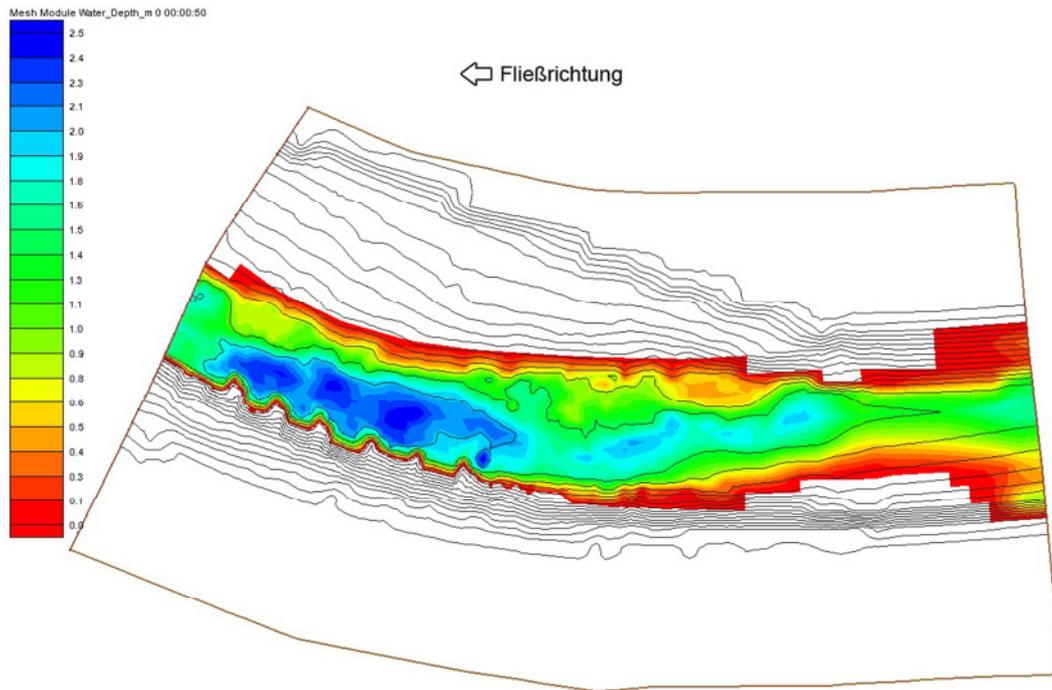


Abbildung 5.18 Wassertiefen [m], Abfluss 100 m³/s, Modell mit Bühnen

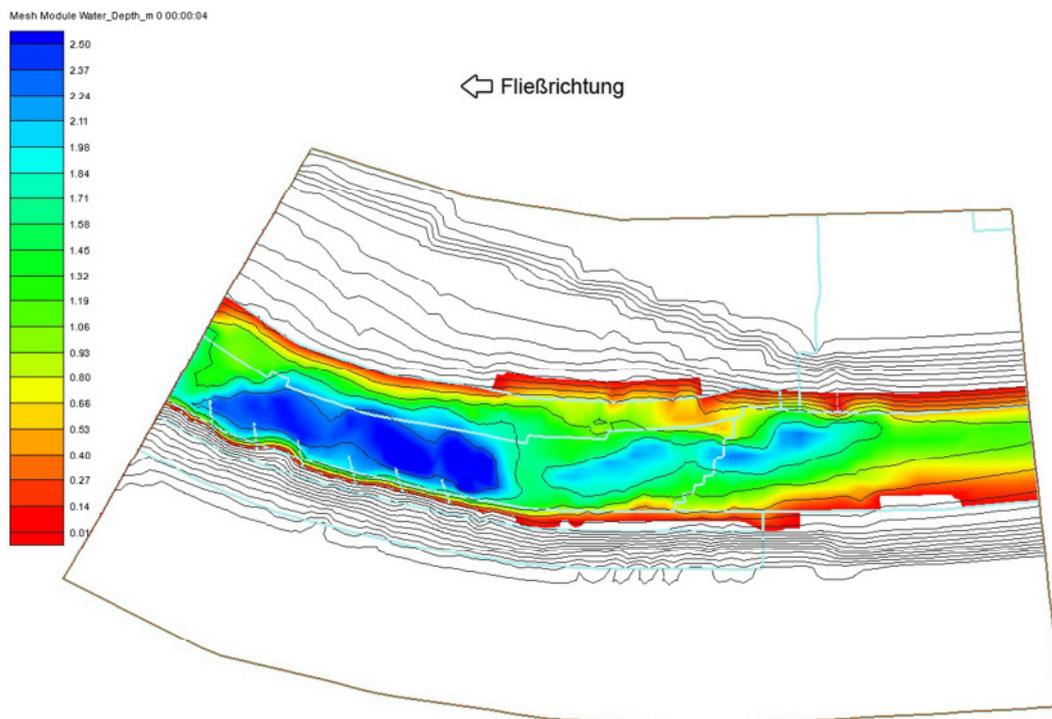


Abbildung 5.19 Wassertiefen [m], Abfluss 100 m³/s, Modell ohne Pfahlbühnen Variante 2

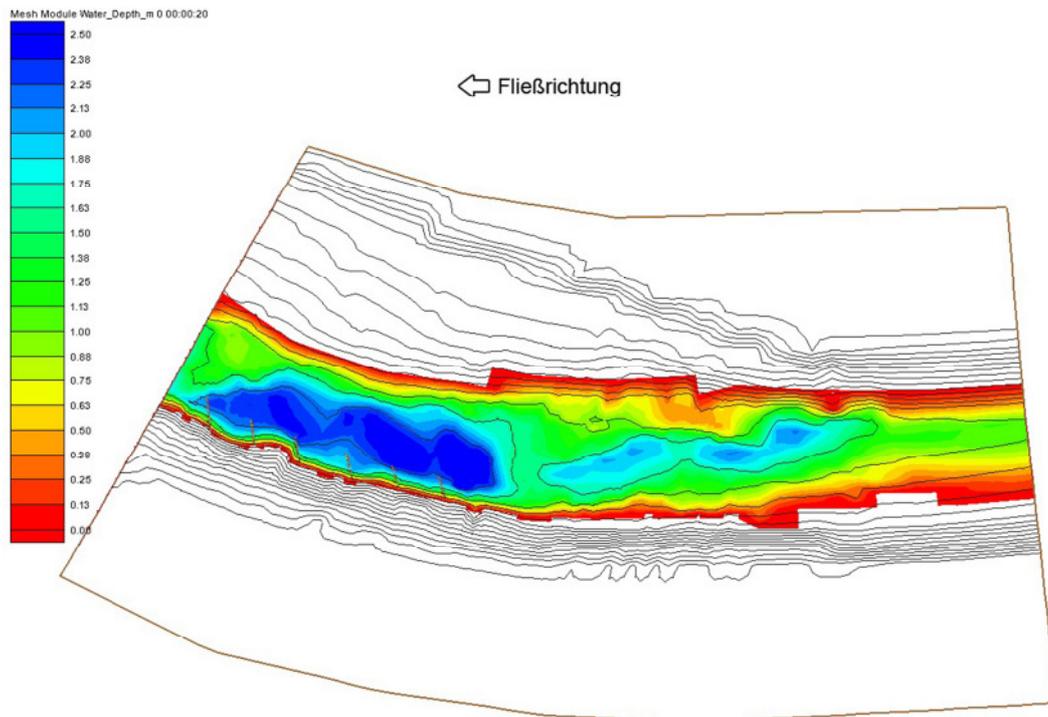


Abbildung 5.20 Wassertiefen [m], Abfluss 100 m³/s, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 1

Die folgenden Abbildungen zeigen die Wassertiefen bei einem Abfluss von 400 m³/s. Festzustellen ist, dass wie erwartet durch den Bau von Buhnen die Wassertiefe zunimmt. Für das Modell mit Pfahlbuhnen ist ebenfalls eine größere Wassertiefe zu erkennen.

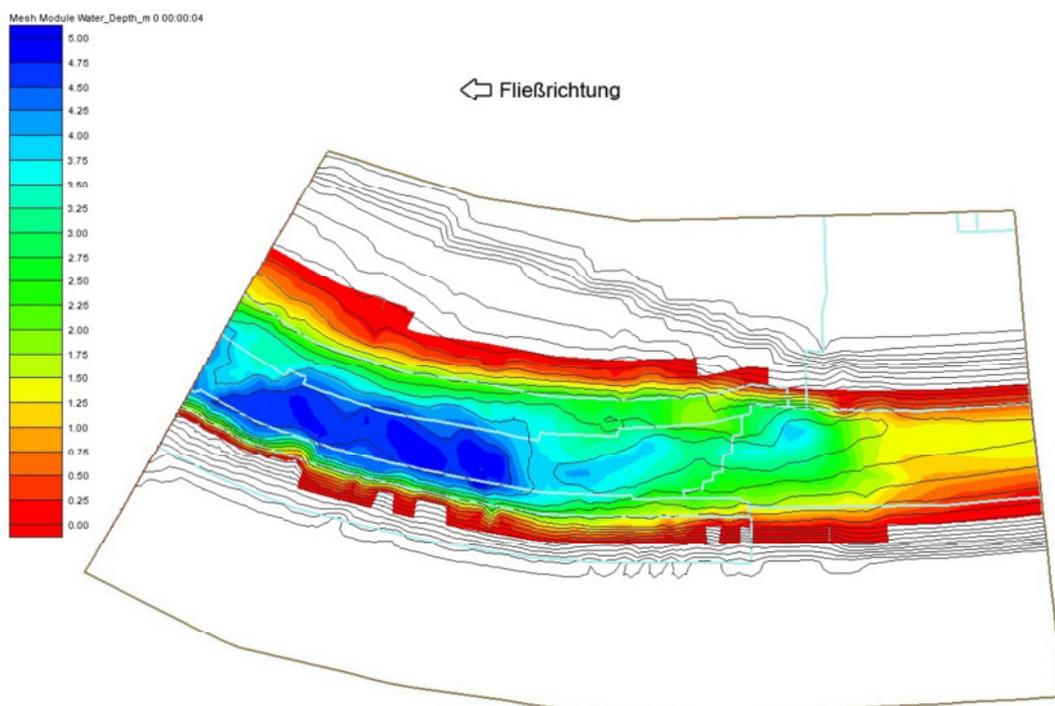


Abbildung 5.21 Wassertiefen [m], Abfluss 400 m³/s, Modell ohne Buhnen

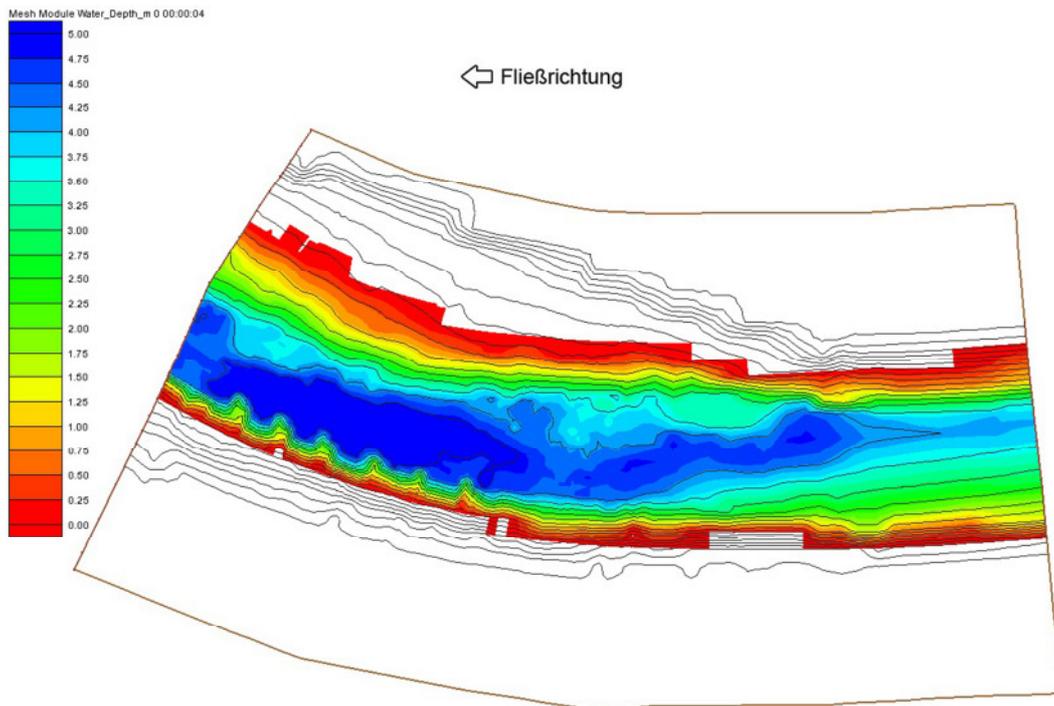


Abbildung 5.22 Wassertiefen [m], Abfluss 400 m³/s, Modell mit Bunnen

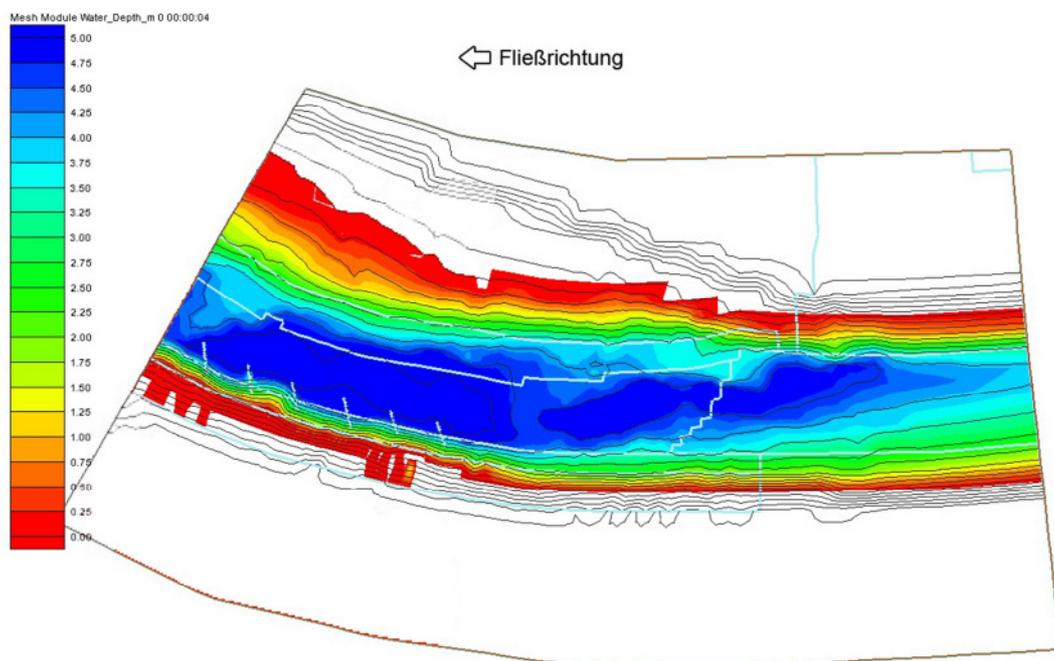


Abbildung 5.23 Wassertiefen [m], Abfluss 400 m³/s, Modell mit Pfahlbunnen

Flow-Modul

		Ohne Buhnen	Mit Buhnen	Pfahlbuhnen Variante 1	Pfahlbuhnen Variante 2
100 m ³ /s	Fließgeschwindigkeit	-höhere Fließgeschwindigkeit -Strömung entlang des Ufers	-niedrige Fließgeschwindigkeit in den Buhnenfeldern -Wirbelbildung	-niedrige Geschwindigkeiten im Buhnenfeld -Gute Strömungsabbildung	-abnahme der Fließgeschwindigkeit am Ufer -Gute Strömungsabbildung
	Wassertiefe	-Wassertiefe entspricht Struktur der Gewässersohle.	-höhere Wassertiefen in den Buhnenfeldern -Aufstauende Wirkung	-sehr gute Abbildung -gute Abgrenzung an den Pfählen	-größere Wassertiefen als ohne Buhnen -überhöhte Werte an den Pfählen
400 m ³ /s	Fließgeschwindigkeit	-hohe Geschwindigkeiten am Ufer -deutliche Zunahme in der Flussmitte	-hohe Geschwindigkeiten auf dem Buhnenrücken -niedrige in den Buhnenfeldern -keine Wirbelbildung	Nicht modelliert	-niedrige Geschwindigkeiten in den Buhnenfeldern -erhöhte Geschwindigkeiten oberhalb der Buhnen -Wirbelbildung in den Buhnenfeldern
	Wassertiefe	-größere Tiefen als mit 100 m ³ /s	-große Tiefen in der Flussmitte -Aufstauende Wirkung	Nicht modelliert	-deutliche Zunahme der Wassertiefe -Aufstauende Wirkung

Tabelle 5-2 Ergebnis Flow- Moduls

5.2 Morphologische Modellierung

Um die Entwicklung des Gewässerbetts zu modellieren, wird zum Aufzeigen von möglichen Erosionsbereichen der Shields Parameter (siehe Kapitel 2.3.2) und die sich bildenden Erosionstiefen betrachtet. Der Shields Parameter wird über den d_{75} Korndurchmesser berechnet.

5.2.1 Problembehandlung

Bei der Modellierung mit dem Morph-Modul treten für die Berechnungsergebnisse der Sohlschubspannungen und folglich auch für den Shields Parameter keine realistischen Werte auf. An Knotenpunkten, die auf oder direkt neben Substratgrenzen liegen, sind die Werte stark überhöht. Diese haben negative Auswirkungen durch die Interpolation auf die angrenzenden Elemente. Für die Lösung des Problems werden einige Untersuchungen durchgeführt.

Eine **Verfeinerung des Maschennetzes** hat lediglich eine Eingrenzung der betroffenen Fläche zur Folge. Die Knoten auf oder neben den Substratgrenzen zeigen immer noch überhöhte Werte. Ebenso hat eine manuelle **Erweiterung der Siebkurve**, damit der d_{75} Korndurchmesser in der Kurve liegt (vgl. Kapitel 4.3.1), keine Auswirkungen auf die überhöhten Werte. Eine kleine Verringerung der überhöhten Sohlschubspannungen ist durch die **Herabsetzung der Rauheitswerte** zu erreichen. Aber selbst bei einheitlichen Rauheitswerten der benachbarten Substratflächen weisen die Knotenpunkte zu hohe Werte auf. Setzt man für die benachbarten Substratflächen **identische Substratverteilungen** ein, ist ein Ergebnis ohne überhöhte Werte zu erreichen. Ein Fließgewässer besteht jedoch aus mehreren unterschiedlichen Substratflächen und daher kann eine einheitliche Substratverteilung nicht der Realität entsprechen.

Zusammenfassend ist die Problematik folgendermaßen zu beschreiben. Überhöhte Sohlschubspannungen treten bei der Modellierung mit dem Morph-Modul an Knoten, die auf oder direkt neben Substratgrenzen liegen, auf. Jedoch sind die betroffenen Knoten immer auf der Seite des feinen Substrats. Eine Maschenverfeinerung und Reduzierung des Rauheitswertes bringen keine Verbesserung. Ein möglicher Lösungsansatz ist ein stufenweiser Übergang von gröberen Substraten zu den Feineren.

Diskussionsbedarf besteht bei der Modellierung mit dem Mobile-Modul. Zu Beginn können verschiedene Parameter für die Sedimenttransportkapazität eingegeben werden. Gibt man *capacity* ein, so berechnet das Programm den Sedimenteintrag in das Modell aus dem Sedimentaustag des vorherigen Zeitschritts. Dies ist für die einzelne Betrachtung der verschiedenen Modelle anwendbar. Werden die Modelle miteinander verglichen,

entsprechen die Ergebnisse nicht der Realität, da der Sedimentaustrag beim Modell mit Buhnen ein anderer ist als der ohne Buhnen. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist es notwendig das gleiche Volumen für den Sedimenteintrag vorauszusetzen. Als Parametereingabe kann hierfür das Volumen jeder Sedimentklasse eingegeben werden. Da es keine Ausgabedatei mit dem Volumen des Sedimentaustrags für jede Sedimentklasse gibt, muss das Volumen berechnet werden. Dafür wird ein Modell erstellt, das alle Sedimentklassen in Streifen darstellt (Abbildung 5.24). Jeder Streifen repräsentiert eine Sedimentklasse mit einer bestimmten Korngröße. Die Idee ist, durch die Erosionstiefe das Volumen des ausgetragenen Sediments zu bestimmen. Dies ist allerdings nicht möglich, da sich der Sedimentaustrag aus allen Sedimentklassen vermischt und als Sedimenteintrag sedimentiert, wodurch keine Erosionstiefen ermittelt werden können. Ein Lösungsansatz ist der Einsatz von Beobachtungspunkten in den einzelnen Substratflächen. Über diese Beobachtungspunkte ist es möglich die Veränderung der Substratzusammensetzung aufzuzeigen. Diese Veränderungen der einzelnen Punkte müssen auf die Substratfläche umgerechnet und den einzelnen Substratklassen zugeordnet werden.

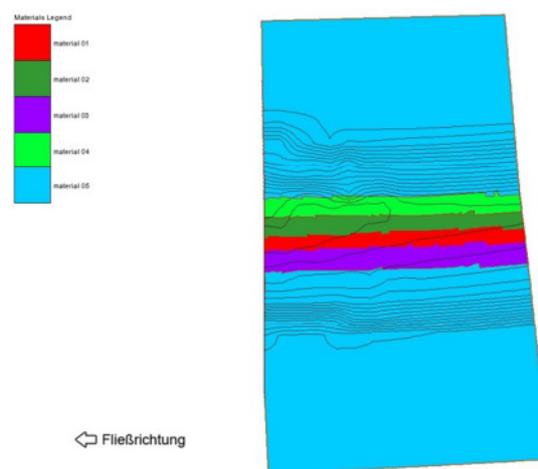


Abbildung 5.24 Substratflächen zur Bestimmung des Volumens

Für die weiteren Modellierungen wird ein anderer Ansatz gewählt. Anstatt der Eingabe eines bestimmten Volumens wird kein Sedimenteintrag angenommen. Somit ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. Die Annahme, dass kein Sediment eingetragen wird, ist vertretbar, da oberhalb des Gewässerabschnitts ein Wehr den Sedimenteintrag sehr stark einschränkt. Sedimente können somit nur durch Erosion im Abschnitt zwischen dem Wehr und dem betrachteten Gewässerabschnitt in das Modell gelangen. Dieser Eintrag ist sehr gering und ist daher vernachlässigbar.

5.2.2 Shields Parameter

Über den Shields Parameter sollen Bereiche aufgezeigt werden, an denen Erosion stattfinden kann. Der Shields Parameter wird über die berechnete Sohlschubspannung und dem d_{75} Korndurchmesser ermittelt. In Abbildung 5.25 sind die Werte des Parameters bei einem Abfluss von $100 \text{ m}^3/\text{s}$ im Modell ohne Buhnen zu sehen. Zu erkennen ist, dass die Werte am Uferbereich höher sind als in der Flussmitte, was ein Indiz für eine Ufererosion ist.

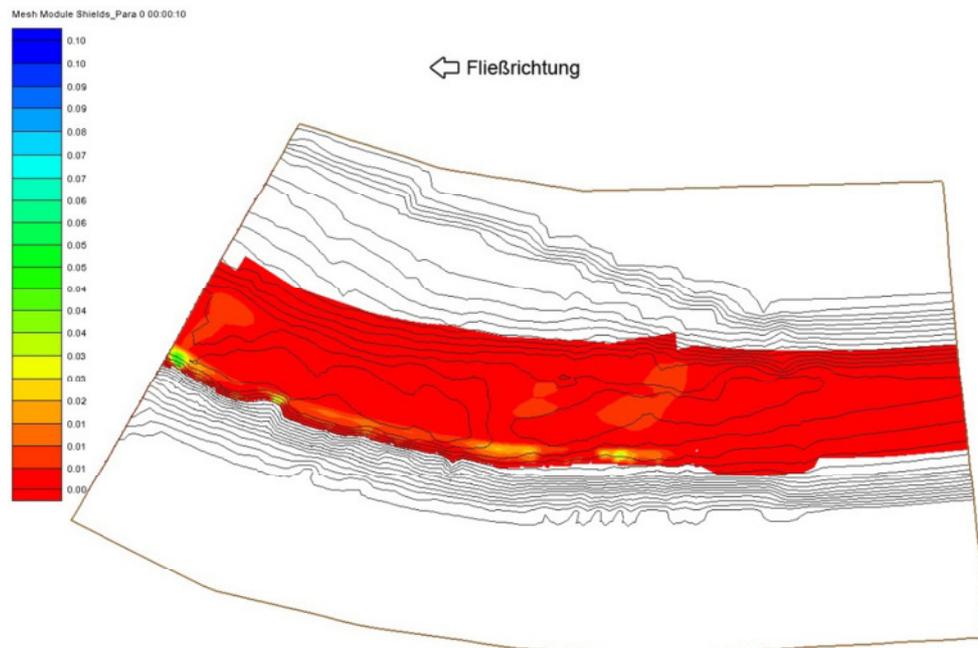


Abbildung 5.25 Shields Parameter, Abfluss $100 \text{ m}^3/\text{s}$, Modell ohne Buhnen

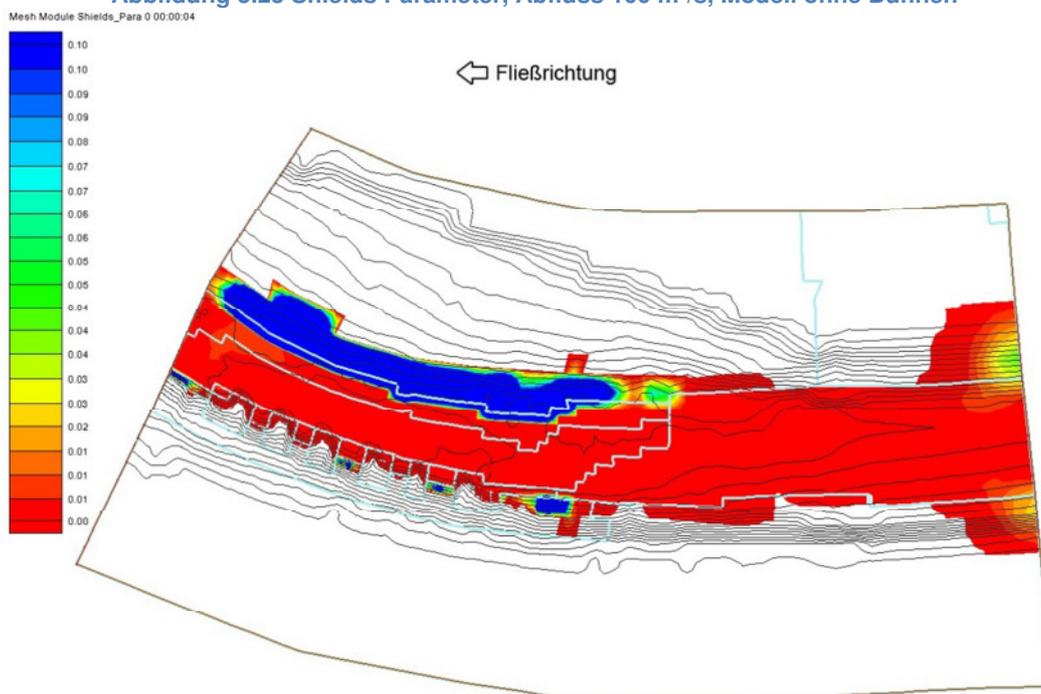


Abbildung 5.26 Shields Parameter, Abfluss $100 \text{ m}^3/\text{s}$, Modell mit Buhnen

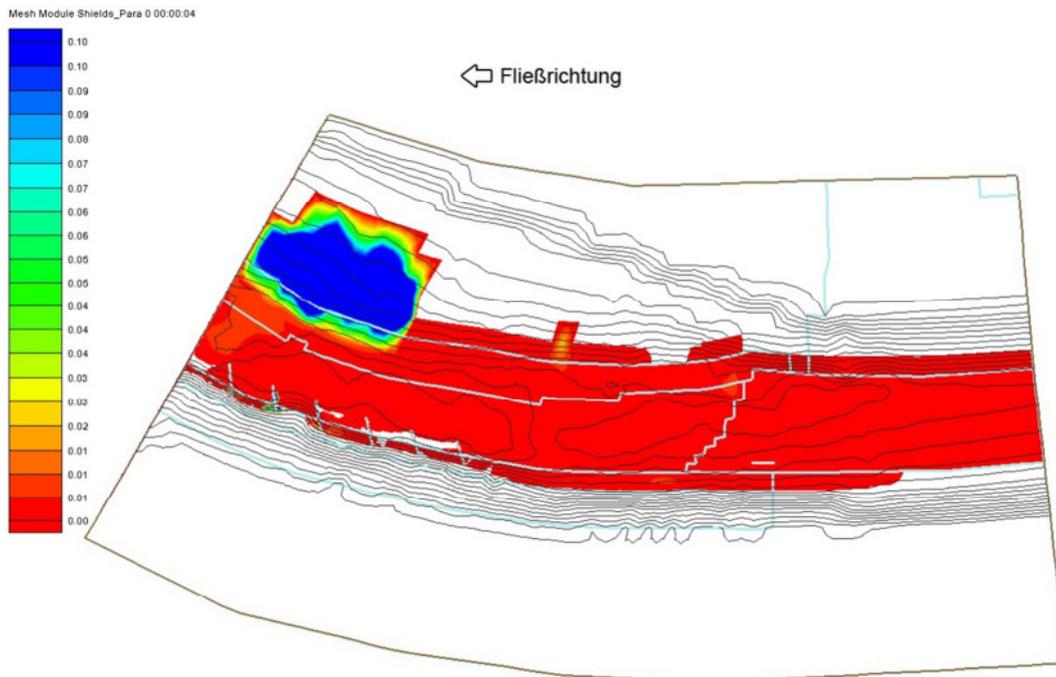


Abbildung 5.27 Shields Parameter, Abfluss $100 \text{ m}^3/\text{s}$, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 2

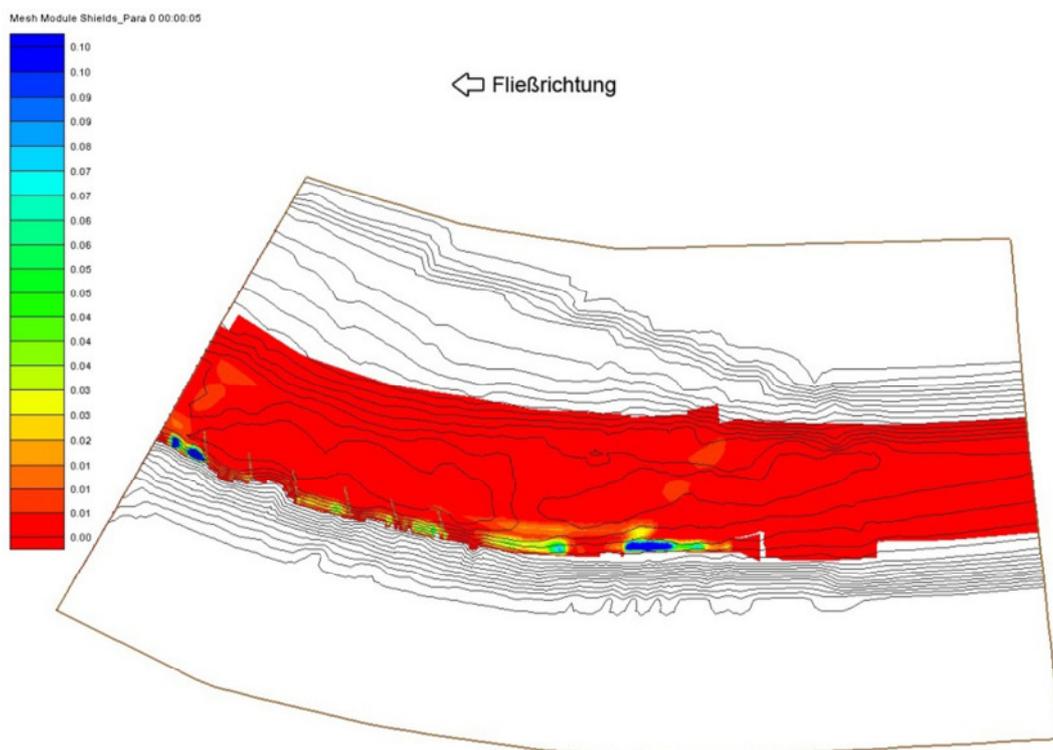


Abbildung 5.28 Shields Parameter, Abfluss $100 \text{ m}^3/\text{s}$, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 1

Betrachtet man das Modell mit Buhnen (Abbildung 5.26) so ergeben sich neue potentielle Erosionsbereiche. Auf den ersten Blick ist es nicht verwunderlich, dass im Bereich von sehr feinem Substrat hohe Shieldswerte auftreten. Jedoch ist die Höhe des Wertes weit über den normal vorkommenden Werten. Dies ist auf das Problem der überhöhten

Sohlschubspannung zurückzuführen (siehe Kapitel 5.2.1). Verstärkt treten die überhöhten Sohlschubspannungen in dem Modell mit Pfahlbuhnen (Variante 2) auf (Abbildung 5.27). Die Knoten innerhalb des Bereichs mit hohen Shieldswerten weisen unterschiedliche Wasserstände auf. So sind einige Knoten benetzt, andere wiederum nicht. Hier liegt die Ursache bei der fehlerhaften Berechnung der benetzten Fläche. Vergleicht man die Ergebnisse des Modells mit Pfahlbuhnen (Variante 2) mit dem des Modells mit Pfahlbuhnen (Variante 1) (Abbildung 5.28), so sind keine überhöhten Werte zu erkennen. Allerdings sind im Uferbereich die Shieldswerte erhöht, so dass auf eine Erosion zu schließen ist.

Die Ergebnisse der Modellierung mit $400 \text{ m}^3/\text{s}$ sind dem Anhang F beigefügt. Die Problematik mit überhöhten Shieldswerten ist bei diesen Modellierungen besonders hervorgetreten. In allen Modellen existieren an den Substratgrenzen im Uferbereich Knoten mit extrem hohen Werten, die sich auf die nebenliegenden auswirken. Zusätzlich treten bei der Modellierung mit dem Morph-Modul und $400 \text{ m}^3/\text{s}$ Stabilitätsprobleme auf, welche sich vor allem auf die benetzte Fläche beziehen.

5.2.3 Erosion

Die Modellierung mit dem Mobile-Modul liefert das Ergebnis der Eintiefungen und der Erhöhungen der Sohle durch Erosion oder Sedimentation über einen bestimmten Zeitraum. Somit können Langzeitmodellierungen die Veränderung des Gewässers über die Zeit darstellen. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen wegen der langen Rechendauer von Langzeitmodellierungen lediglich potentielle Erosions- und Sedimentationszonen von kurzen Zeitabschnitten.

Die Erosions- und Sedimentationsbereiche, die sich bei einem Abfluss von $100 \text{ m}^3/\text{s}$ bilden, sind in den folgenden Abbildungen zu sehen.

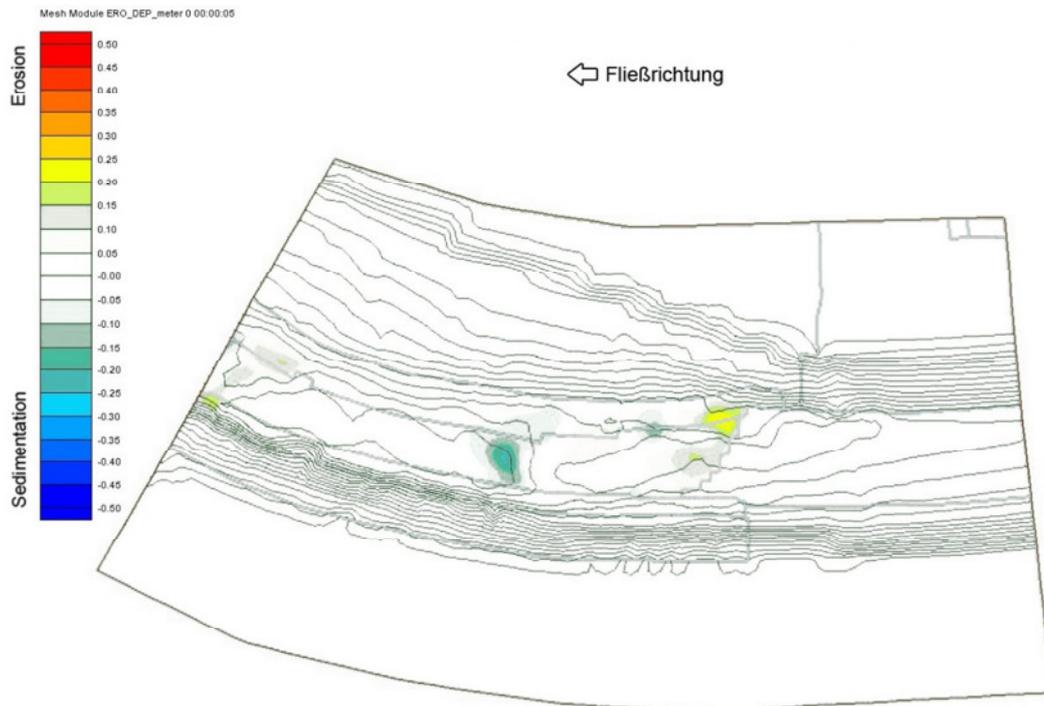


Abbildung 5.29 Erosionstiefen und Sedimentation [m] ohne Buhnen bei 100 m³/s

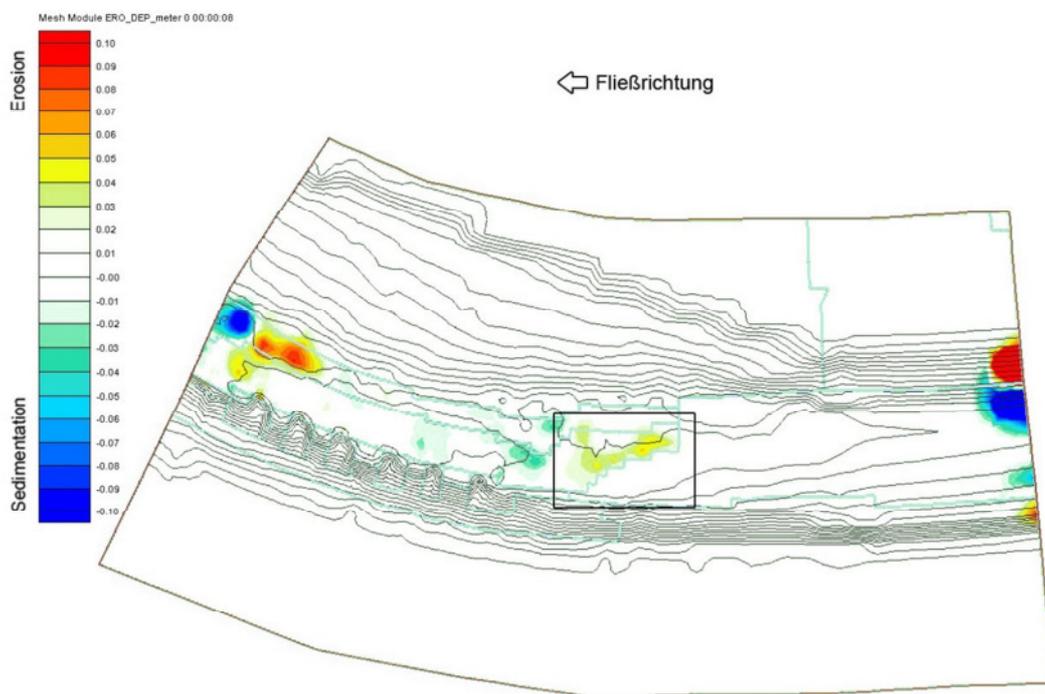


Abbildung 5.30 Erosionstiefen und Sedimentation [m] mit Buhnen bei 100 m³/s

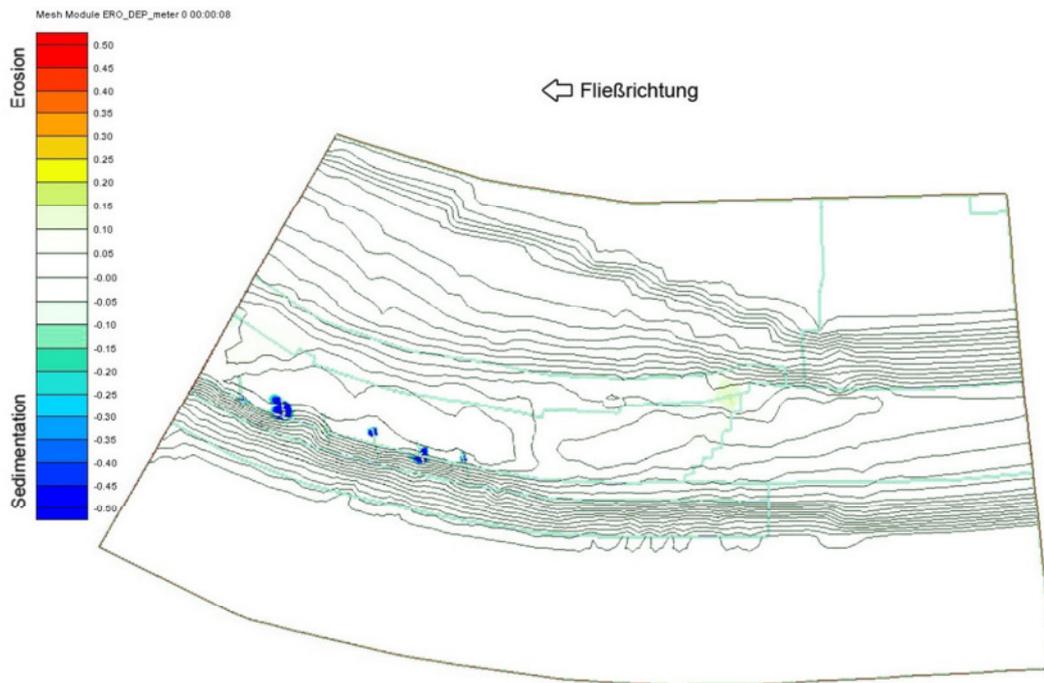


Abbildung 5.31 Erosionstiefen und Sedimentation [m] mit Pfahlbuhnen (Variante 2) bei 100 m³/s

Bei allen drei Geländemodellen ist eine Eintiefung im Bereich des Wechsels der Steinplatten zum Substrat mit unterschiedlichen Korndurchmessern zu sehen (siehe Detailausschnitt Abbildung 5.30). Diese Eintiefung ist im realen Flussabschnitt vorzufinden.

Unrealistische Ergebnisse sind im Modell mit den Pfahlbuhnen zu erkennen (Abbildung 5.31). In den Zwischenräumen der Pfähle sind in der Abbildung Sedimentationsbereiche festzustellen. Wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, ist durch die hohen Sohlschubspannungen in Bereichen der Pfähle mit überhöhten Werten zu rechnen, daher ist eine große Sedimentationshöhe in relativ kurzer Zeit nicht als realistisch anzusehen.

Betrachtet man den gleichen Zeitabschnitt mit einem Abfluss von 400 m³/s, ist beim Modell ohne Buhnen eine erhöhte Erosion im Uferbereich vorzufinden. Allerdings ist der markierte Bereich kritisch zu betrachten, da gewisse Knotenpunkte überhöhte Sohlschubspannungen aufweisen, die auf eine fehlerhafte Interpolation zurückzuführen ist. Diese Knoten liegen im Grenzbereich der Wasseranschlagslinie und sind deshalb mit Wasser benetzt oder nicht benetzt.

Die Erosions- und Sedimentationsbereiche beim Modell mit Buhnen sind erst bei einem kleinen Betrachtungsintervall von -0,05 m bis 0,05 m vorzufinden (Abbildung 5.33). Eine Uferabtragung ist erst bei höheren Abflüssen, wie z.B. einem HQ₁₀, zu erwarten. Erosionen sind im Bereich der Scherzonen zu finden, was ein Anzeichen für mögliche Kolkerscheinungen ist.

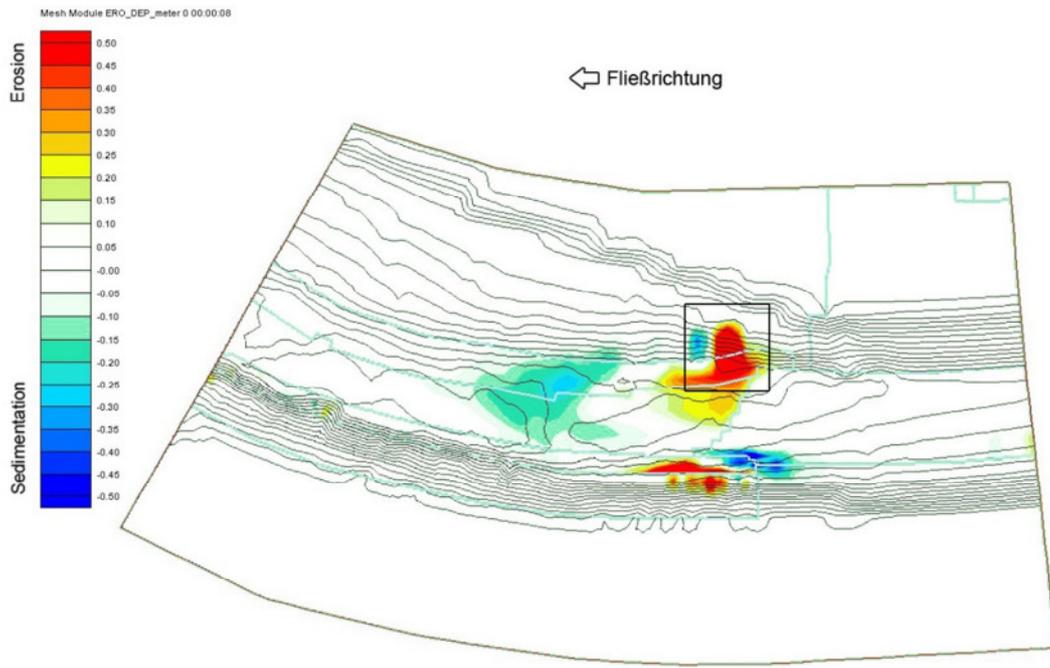


Abbildung 5.32 Erosionstiefen und Sedimentation [m] ohne Buhnen bei 400 m³/s

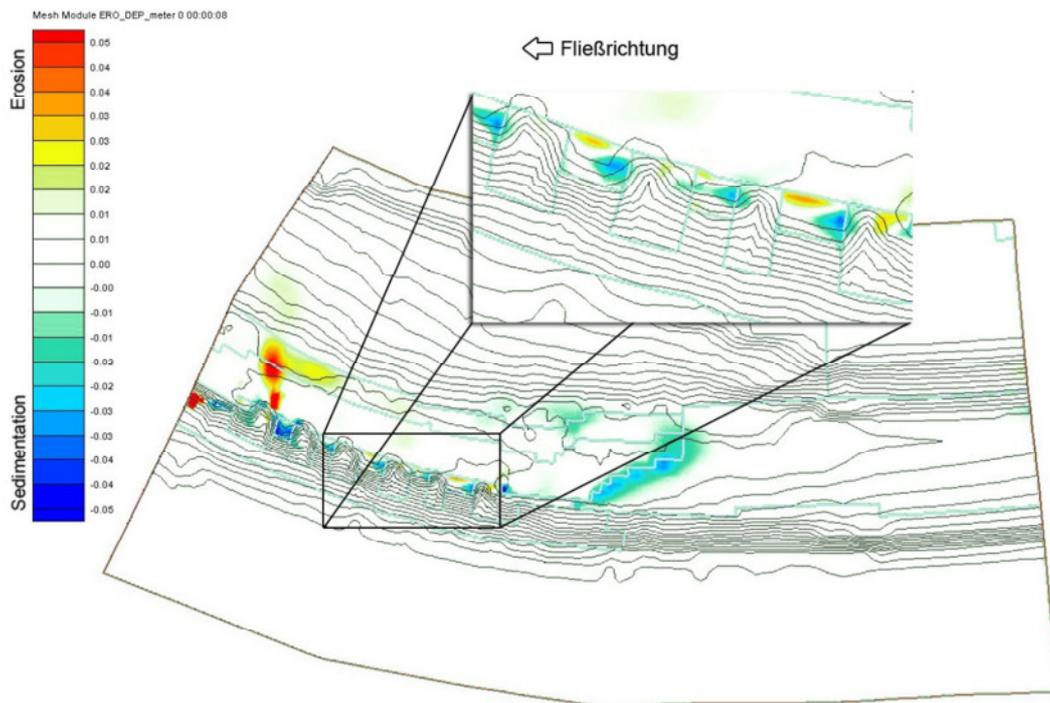


Abbildung 5.33 Erosionstiefen und Sedimentation [m] mit Buhnen bei 400 m³/s

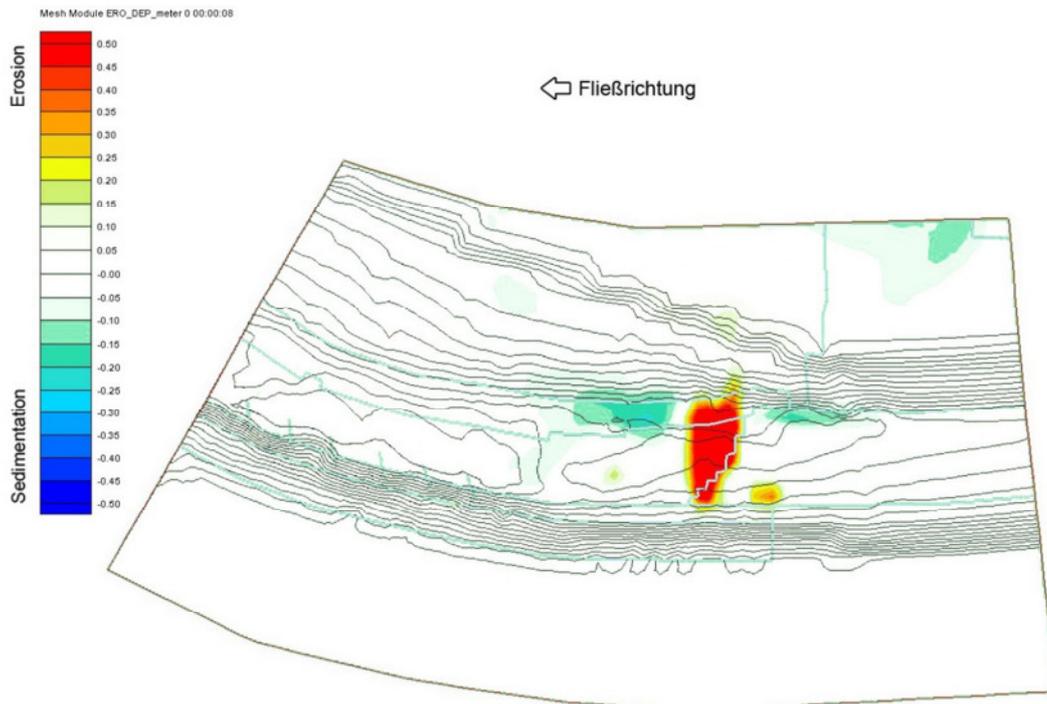


Abbildung 5.34 Erosionstiefen und Sedimentation [m] mit Pfahlbuhnen bei 400 m³/s

Morph-Modul

		Ohne Buhnen	Mit Buhnen	Pfahlbuhnen Variante 1	Pfahlbuhnen Variante 2
100 m ³ /s	Shields Parameter	-leicht erhöhte Werte im Uferbereich	-keine realistische Werte	-sehr gute Abbildung	-hohe Werte an den Pfählen
			-Problematik mit Substratgrenzen	-erhöhte Werte am Ufer	-nicht realistische Werte am Gleitufer
400 m ³ /s	Shields Parameter	-stellenweise gut Abbildung	-keine realistische Werte	Nicht modelliert	-keine realistische Abbildung
		-erhöhte Werte am Ufer -stark überhöhte Werte an den Substratgrenzen	-überhöhte an den Substratgrenzen		

Tabelle 5-3 Ergebnis Morph- Modul

Mobile-Modul

		Ohne Buhnen	Mit Buhnen	Pfahlbuhnen Variante 1	Pfahlbuhnen Variante 2
100 m ³ /s	Erosionstiefen	-Erosionsbereich an Substratgrenzen	-Schwache Erosion und Sedimentation in der Flussmitte	Nicht modelliert	-große Sedimentationsbereiche an den Pfahlbuhnen → nicht realistisch
		-Sedimentation in der Flussmitte	-Stellen mit Natur übereinstimmend		
400 m ³ /s	Erosionstiefen	-am Ufer und in der Flussmitte Erosion	-Sedimentation in den Bühnenfeldern	Nicht modelliert	-großer Erosionsbereich am Substratübergang
		-Sedimentation in der Flussmitte	-in der Scherzone Erosion		

Tabelle 5-4 Ergebnis Mobile- Modul

5.3 Zusätzliche Modellierungen

Ein Vergleich der Auswirkungen des Sedimenttransportes und der Hydraulik steht bei dieser Arbeit im Vordergrund. Deshalb sind niedrige Abflüsse, die kein Sedimenttransport verursachen, nicht von großer Bedeutung. Dennoch sind die Ergebnisse von Interesse. Bei einem Abfluss von 50 m³/s ist eine Zunahme der Wassertiefe beim Einsatz des Modells mit undurchlässigen Buhnen festzustellen (Abbildung 5.35 und Abbildung 5.36). Betrachtet man die Fließgeschwindigkeit so ist eine Erhöhung in der Flussmitte zu erkennen (Abbildung 5.37 und Abbildung 5.38).

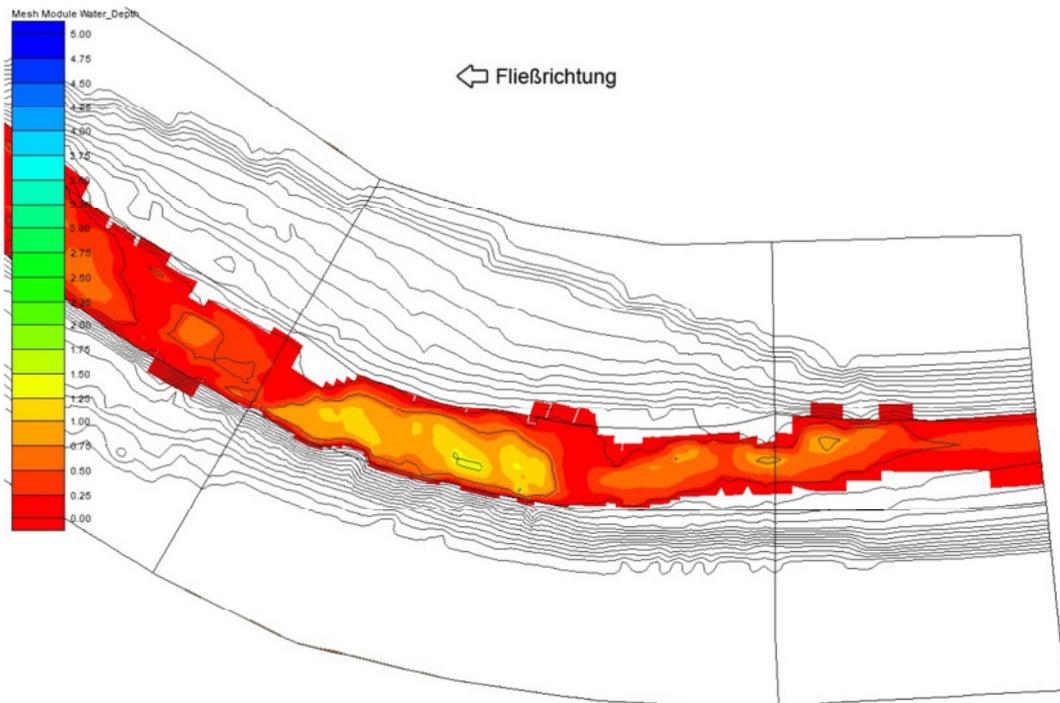


Abbildung 5.35 Wassertiefe [m], Abfluss 50 m³/s, Modell ohne Buhnen

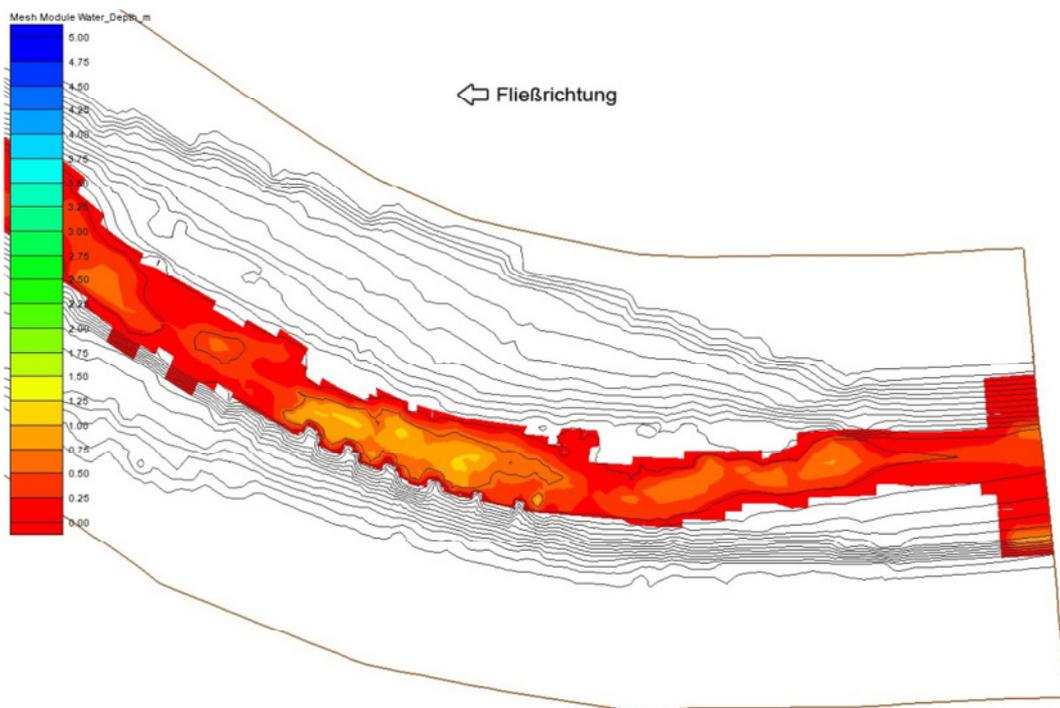


Abbildung 5.36 Wassertiefe [m], Abfluss 50 m³/s, Modell mit Buhnen

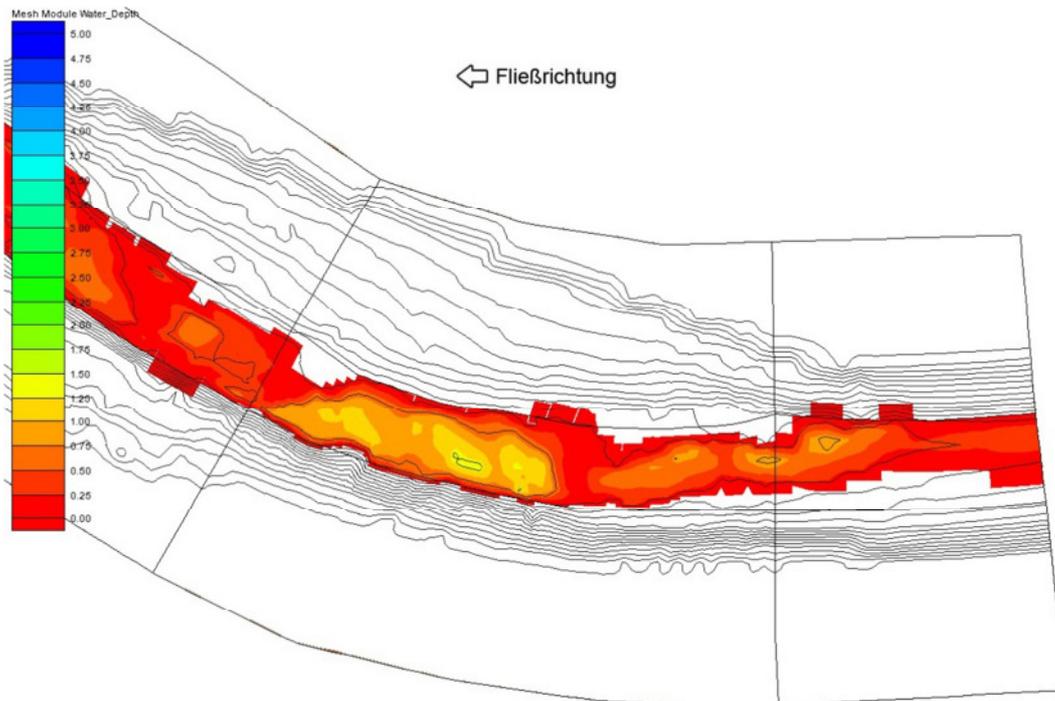


Abbildung 5.37 Fließgeschwindigkeit [m/s] Abfluss 50 m³/s, Modell ohne Buhnen

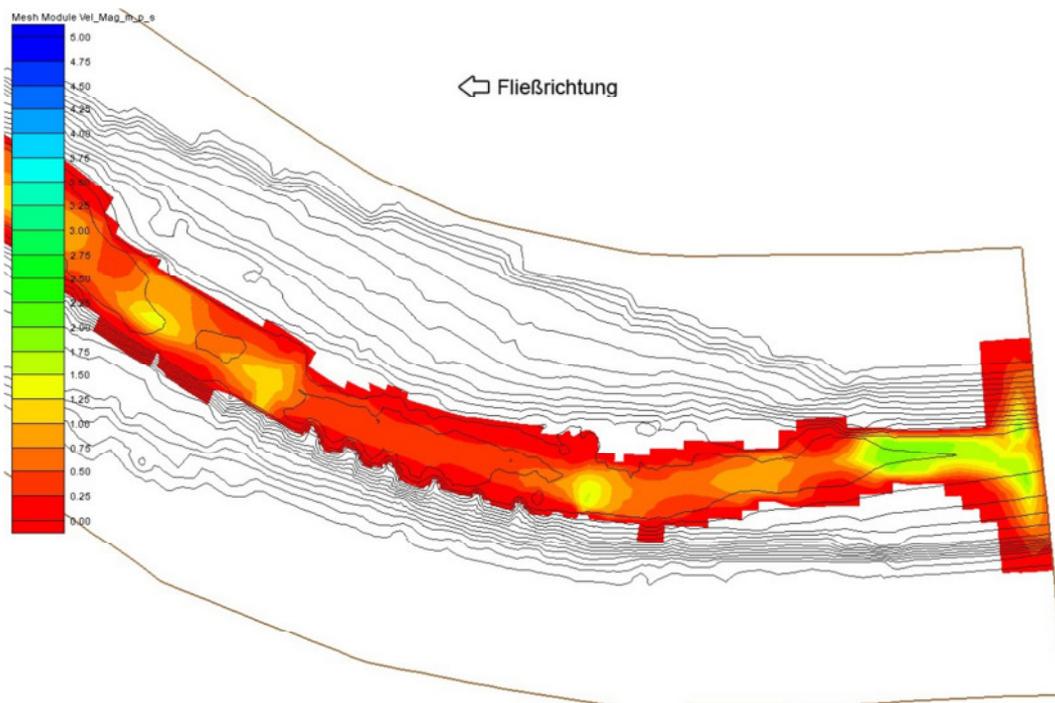


Abbildung 5.38 Fließgeschwindigkeit [m/s], Abfluss 50 m³/s, Modell mit Buhnen

Höhere Abflüsse wie 1000 m³/s haben größere Auswirkungen auf die Entwicklung der Gewässerstruktur. Abbildung 5.39 zeigt die Wassertiefe beim Geländemodell mit Buhnen. Die Fließgeschwindigkeiten sind im Vergleich zu dem Modell mit 400 m³/s nochmals erhöht (Abbildung 5.40), was die Erosionswahrscheinlichkeit erhöht.

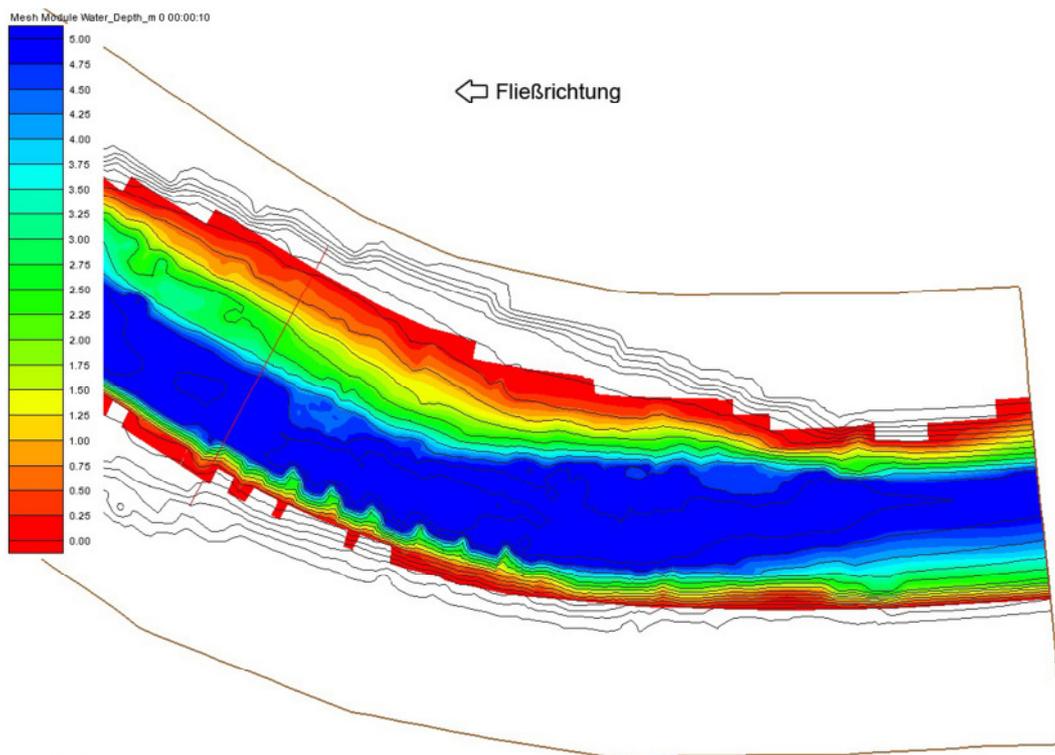


Abbildung 5.39 Wassertiefe [m], Abfluss 1000 m³/s, Modell mit Buhnen

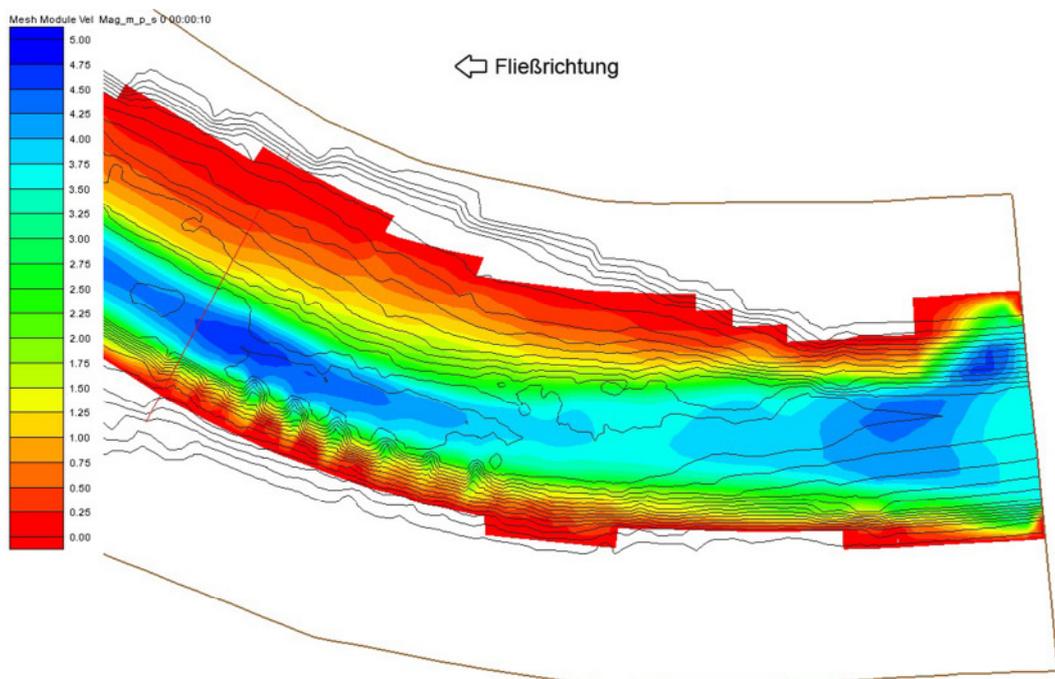


Abbildung 5.40 Fließgeschwindigkeit [m/s], Abfluss 1000 m³/s, Modell mit Buhnen

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Diplomarbeit hat sich mit der zweidimensionalen Modellierung verschiedener Buhnensysteme befasst. Hierbei wurde vor allem die Modellierbarkeit von Buhnen untersucht. Zur Modellierung diente die Software SRH-2D.

Um die zur Verfügung gestellten Daten zu ergänzen wurde eine Messkampagne im Untersuchungsgebiet durchgeführt. Des Weiteren wurden zur Substratbestimmung Sedimentproben genommen und anschließend ausgewertet. Auf dieser Basis wurden drei unterschiedliche Geländemodelle erstellt. Ein Modell ohne Buhnen, das den Zustand vor dem Buhnenbau darstellt. Ein zweites Modell mit den aktuell existierenden Steinbuhnen und ein drittes mit Pfahlbuhnen.

Zur Modellierung wurde das zweidimensionale Hydraulikprogramm SRH-2D mit den Modulen Flow, Morph und Mobile verwendet. Eine Modellkalibrierung ergab den passenden Abfluss zum gemessenen Wasserstand unter Berücksichtigung der verschiedenen Sohlrauheiten. Des Weiteren wurden bei der Verfeinerung des Modells in der Flussmitte keine Veränderungen ersichtlich. Differenzen der Fließgeschwindigkeiten treten jedoch in den Randbereichen auf.

Anschließend wurde eine Sensitivitätsanalyse für verschiedene Parameter durchgeführt. Dabei wurde die Reduzierung der Sedimentklassen einer Prüfung unterzogen. In Bereichen mit groben Sedimenten hat dies keine Auswirkungen auf den Shields Parameter. Lediglich bei sehr feinen Sedimenten ist der Shieldswert erhöht.

Wird die Anpassungslänge mit den Ansatz nach van Rijn (3) berechnet, so ergibt sich die geringste Erosionstiefe, während ein zweiter Ansatz nach von Rijn (2) eine hohe Eintiefung zur Folge hat. Der Ansatz nach Sutherland liegt zwischen den Ergebnissen von van Rijn (2) und (3). Eine Änderung der Erosionstiefe ist nur bei der Verwendung des Multiplikators 1 für die aktive Schicht zu erkennen. Für höhere Multiplikatoren ist keine Änderung wahrnehmbar.

Für die eigentlichen Modellierungen wurden die Parameter Fließgeschwindigkeit, Wassertiefe, Shields Parameter und Erosionstiefe analysiert und die Ergebnisse der drei Modelle miteinander verglichen. Während am Ufer die Fließgeschwindigkeiten im Modell ohne Buhnen erhöht sind, werden diese durch den Einbau der Buhnen reduziert. Eine Ausnahme stellt die Variante Pfahlbuhnen bei hohen Abflüssen dar. Hier ist die Fließgeschwindigkeit auch oberhalb der Einbauten erhöht.

Weiterhin ist durch den Einsatz von Buhnen eine erhöhte Wassertiefe zu beobachten.

Bei der Modellierung des Shields Parameters sind sehr hohe Werte von feinen Substraten zu erkennen. Bei höheren Abflüssen sind die erhöhten Werte am Prallufer festzustellen, was auf mögliche Erosionen schließen lässt.

In dem Modell mit Steinbuhnen werden die Erosionszonen am Buhnenkopf und die Sedimentstationszonen in den Buhnenfeldern aufgezeigt. Des Weiteren ist bei allen drei Modellen die Entwicklungstendenz der Gewässersohle zu erkennen.

Zusammenfassend kann das Ergebnis positiv bewertet werden. Die hydraulische Modellierung von Buhnensystemen zeigt eine Abbildung realistischer Werte. Eine Einschränkung gibt es bei Pfahlbuhnen, deren Darstellung über Rauheiten kein zufriedenstellendes Ergebnis liefert. Im Gegensatz dazu sind die Ergebnisse mit Aussparungen sehr gut.

Die Ergebnisse der Untersuchung des Shields Parameters hingegen sind ungenügend. Eine Modellierung über das Morph- Modul erbringt keine Erkenntnis über mögliche Erosionsbereiche.

Das Mobile- Modul kann die Erosionszonen plausibel wiedergeben. Nachteilig ist die begrenzte Knoten- und Elementenanzahl, die eine Modellierung mit sehr feinen Betrachtungen nicht zulässt. Zudem ist die Rechenzeit sehr lange, was für Langzeitmodellierungen nachteilig ist.

Weitere Studien im Bereich der zweidimensionalen Modellierung von Buhnensystemen könnten sich mit der Problematik der Numerik für die Modellierung bei hohen Abflüssen befassen. Weiterhin ist zu untersuchen, wie die Darstellung von Pfahlbuhnen in einer Modellierung optimiert werden kann. Daran anschließend wäre eine Betrachtung der Langzeitwirkung von Pfahlbuhnen in Fließgewässern von Interesse. Weiterführend wäre eine Untersuchung verschiedener Durchlässigkeiten und Buhnenabstand auf die hydraulischen und morphologischen Auswirkungen möglich.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Übersicht der Modellierung	7
Abbildung 2.1 Grundriss einer Buhne (Schröder, 2001).....	8
Abbildung 2.2 Inklinante Anordnung	9
Abbildung 2.3 Deklinante Anordnung	9
Abbildung 2.4 Knickbuhne	9
Abbildung 2.5 Island Buhne (links) und Louvre Buhne (rechts).....	10
Abbildung 2.6 Fotografie von Darren Burton: Pfahlbuhnen an der Küste von Bawdsey, England.....	11
Abbildung 2.7 Aufbau einer Buhne (Wieprecht, 2008)	11
Abbildung 2.8 Geschwindigkeitsprofil in Gerinnequerschnitten (Helmig & Class, 2005).....	12
Abbildung 2.9 Walzenbildung im Bühnenfeld aus Wirtz (2004).....	14
Abbildung 2.10 Strömungsmuster in Bühnenfeldern (Klingeman, Kehe, & Owusu, 1984).....	15
Abbildung 2.11 Strömungsmuster um Pfahlbuhnen.....	17
Abbildung 2.12 Shieldsdiagramm	20
Abbildung 2.13 In Bühnenfeldern vorkommende Fischhabitats	22
Abbildung 3.1 Luftbild des Untersuchungsgebiets (Google Earth, 2010)	23
Abbildung 3.2 Steinbuhnen in Freiberg am Neckar.....	24
Abbildung 3.3 Externe Daten.....	25
Abbildung 3.4 Flächen mit unterschiedlichen Substrateigenschaften.....	27
Abbildung 3.5 Siebkurve Substrat 1	27
Abbildung 3.6 Siebkurve Substrat 5.....	27
Abbildung 3.7 Geländemodell ohne Buhnen.....	29
Abbildung 3.8 Geländemodell mit Buhnen.....	29
Abbildung 3.9 Geländemodell mit Pfahlbuhnen	30
Abbildung 4.1 Verfeinerungsbereich.....	35
Abbildung 4.2 Fließgeschwindigkeit [m/s] Grobes Geländemodell.....	36
Abbildung 4.3 Fließgeschwindigkeit [m/s] Mittleres Geländemodell.....	37
Abbildung 4.4 Fließgeschwindigkeit [m/s] Feines Geländemodell.....	37
Abbildung 4.5 Fehlerabbildung mittleres Netz	38
Abbildung 4.6 Fehlerabbildung feines Netz	39
Abbildung 4.7 Siebkurven für Substrat 2	40
Abbildung 4.8 Siebkurven für Substrat 5	41

Abbildung 4.9 Shields Parameter bei 10 Sedimentklassen.....	42
Abbildung 4.10 Shields Parameter bei 5 Sedimentklassen.....	42
Abbildung 4.11 Erosionstiefen [m] nach Sutherland (1)	44
Abbildung 4.12 Erosionstiefen [m] nach van Rijn (2)	44
Abbildung 4.13 Erosionstiefen [m] nach Rijn (3)	45
Abbildung 4.14 Erosionstiefen [m]	45
Abbildung 4.15 Sedimentation [m]	46
Abbildung 4.16 Erosionstiefen [m] bei einer aktiven Schicht von $1 \times d_{90}$	47
Abbildung 4.17 Erosionstiefen [m] bei einer aktiven Schicht von $2 \times d_{90}$	47
Abbildung 4.18 Erosionstiefen [m] bei einer aktiven Schicht von $3 \times d_{90}$	48
Abbildung 4.19 Erosionstiefen [m]	48
Abbildung 5.1 Detail Pfähle	50
Abbildung 5.2 Überhöhte Wasserspiegellage [m]	52
Abbildung 5.3 Fließgeschwindigkeiten [m/s], Abfluss $100\text{m}^3/\text{s}$, Modell ohne Buhnen	53
Abbildung 5.4 Fließgeschwindigkeiten [m/s], Abfluss $100\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Buhnen.....	53
Abbildung 5.5 Fließgeschwindigkeiten [m/s], Abfluss $100\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 1	54
Abbildung 5.6 Fließgeschwindigkeiten [m/s], Abfluss $100\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 2.....	54
Abbildung 5.7 Strömungsmuster, Abfluss $100\text{m}^3/\text{s}$, Modell ohne Buhnen	55
Abbildung 5.8 Strömungsmuster, Abfluss $100\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Buhnen	55
Abbildung 5.9 Strömungsmuster, Abfluss $100\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 1	56
Abbildung 5.10 Strömungsmuster, Abfluss $100\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 2	56
Abbildung 5.11 Fließgeschwindigkeiten [m/s], Abfluss $400\text{m}^3/\text{s}$, Modell ohne Buhnen	57
Abbildung 5.12 Fließgeschwindigkeiten [m/s], Abfluss $400\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Buhnen.....	57
Abbildung 5.13 Fließgeschwindigkeiten [m/s], Abfluss $400\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 2.....	58
Abbildung 5.14 Strömungsmuster, Abfluss $400\text{m}^3/\text{s}$, Modell ohne Buhnen	58
Abbildung 5.15 Strömungsmuster, Abfluss $400\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Buhnen	59
Abbildung 5.16 Strömungsmuster, Abfluss $400\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 2	59
Abbildung 5.17 Wassertiefen [m], Abfluss $100\text{m}^3/\text{s}$, Modell ohne Buhnen	60
Abbildung 5.18 Wassertiefen [m], Abfluss $100\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Buhnen	61
Abbildung 5.19 Wassertiefen [m], Abfluss $100\text{m}^3/\text{s}$, Modell ohne Pfahlbuhnen Variante 2...61	
Abbildung 5.20 Wassertiefen [m], Abfluss $100\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 1	62
Abbildung 5.21 Wassertiefen [m], Abfluss $400\text{m}^3/\text{s}$, Modell ohne Buhnen	62
Abbildung 5.22 Wassertiefen [m], Abfluss $400\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Buhnen	63
Abbildung 5.23 Wassertiefen [m], Abfluss $400\text{m}^3/\text{s}$, Modell mit Pfahlbuhnen.....	63

Abbildung 5.24 Substratflächen zur Bestimmung des Volumens	66
Abbildung 5.25 Shields Parameter, Abfluss 100 m ³ /s, Modell ohne Buhnen.....	67
Abbildung 5.26 Shields Parameter, Abfluss 100 m ³ /s, Modell mit Buhnen	67
Abbildung 5.27 Shields Parameter, Abfluss 100 m ³ /s, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 2 ...	68
Abbildung 5.28 Shields Parameter, Abfluss 100 m ³ /s, Modell mit Pfahlbuhnen Variante 1 ...	68
Abbildung 5.29 Erosionstiefen und Sedimentation [m] ohne Buhnen bei 100 m ³ /s	70
Abbildung 5.30 Erosionstiefen und Sedimentation [m] mit Buhnen bei 100 m ³ /s.....	70
Abbildung 5.31 Erosionstiefen und Sedimentation [m] mit Pfahlbuhnen (Variante 2) bei 100 m ³ /s	71
Abbildung 5.32 Erosionstiefen und Sedimentation [m] ohne Buhnen bei 400 m ³ /s	72
Abbildung 5.33 Erosionstiefen und Sedimentation [m] mit Buhnen bei 400 m ³ /s.....	72
Abbildung 5.34 Erosionstiefen und Sedimentation [m] mit Pfahlbuhnen bei 400 m ³ /s.....	73
Abbildung 5.35 Wassertiefe [m], Abfluss 50 m ³ /s, Modell ohne Buhnen	75
Abbildung 5.36 Wassertiefe [m], Abfluss 50 m ³ /s, Modell mit Buhnen	75
Abbildung 5.37 Fließgeschwindigkeit [m/s] Abfluss 50 m ³ /s, Modell ohne Buhnen	76
Abbildung 5.38 Fließgeschwindigkeit [m/s], Abfluss 50 m ³ /s, Modell mit Buhnen.....	76
Abbildung 5.39 Wassertiefe [m], Abfluss 1000 m ³ /s, Modell mit Buhnen	77
Abbildung 5.40 Fließgeschwindigkeit [m/s], Abfluss 1000 m ³ /s, Modell mit Buhnen.....	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 vorkommende Rauheiten nach Strickler	28
Tabelle 4-1 Beobachtungspunkte im Verfeinerungsbereich	38
Tabelle 4-2 Substratklassen	40
Tabelle 4-3 Erosionstiefen	49
Tabelle 5-1 Hochwasserhäufigkeiten für den Neckar unterhalb der Murr-Einmündung	50
Tabelle 5-2 Ergebnis Flow- Moduls	64
Tabelle 5-3 Ergebnis Morph- Modul	73
Tabelle 5-4 Ergebnis Mobile- Modul	74

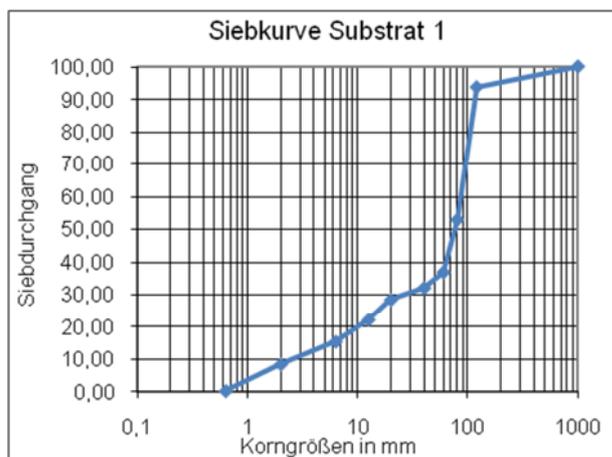
Literaturverzeichnis

- Akkermann, G., & van Heereveld, M. (2004). *Groyne optimisation and river hydrodynamics*.
- Anlanger, C. (2008). *Feldversuche und Analyse von Turbulenten Strömungsmustern in Bühnenfeldern*.
- Anlauf, A., & Hentschel, B. (2002). *Untersuchungen zur Wirkung verschiedener Bühnenformen auf die Lebensräume in Bühnenfeldern*.
- Aquaveo. (2004). *SMS Tutorials*.
- Bischoff, A., & Wolter, C. (2001). *Groyne-heads as Potential Summer Habitats for Juvenile Rheophilic Fishes in the Lower Oder, Germany*.
- Brandes, D. (1998). *Vegetationsökologische Untersuchungen an wasserbaulich bedingten linearen Strukturen*.
- Bui, M. D., & Rutschmann, P. (2006). *A 3D numerical model of graded sediment transport in nonequilibrium condition*.
- Cao, Y. (2007). *The impacts of Applying Permeable Groynes in the Lower Yellow River*.
- Castillo Rodriguez, J. T. (2008). *The use of pile groynes to reduce sediment exchange between river and harbour*.
- Deutsch, M., Röttcher, K., & Pörtge, K.-H. (2009). *Wasserspiegel, Zitate zu Hochwasser, Wasserbau und Wasserwirtschaft*. Sparbuchverlag.
- Heinzelmann, C. (1993). Biologische Aspekte der Sohlerosion in Fließgewässern. In G. Rouvé, *Feststofftransport und Gewässerökologie*.
- Helmig, R., & Class, H. (2005). *Grundlagen der Hydromechanik*. Shaker Verlag.
- Hong Koo, Y. (2007). *Nature- friendly River- training Structure Using Groynes*.
- Jacobs, F. (2002). *Betonabrasion im Wasserbau*.
- Klingeman, P., Kehe, S., & Owusu, Y. (1984). *Streambank Erosion Protection and Channel Scour Manipulation Using Rockfill Dikes and Gabions*.
- Koenzen, U., & Palm, A. (1999). Dynamik und Interaktion von Fluß und Aue. In *Fachtagung Elbe*. Wittenberge.
- Königliche Oberste Baubehörde im Staatsministerium des Innern. (1888). Der Wasserbau an den öffentlichen Flüssen im Königreich Bayern. In M. Deutsch, K. Röttcher, & K.-H. Pörtge, *Wasserspiegel, Zitate zu Hochwasser, Wasserbau und Wasserwirtschaft aus drei Jahrhunderten* (S. 61). Sparbuchverlag.
- Lattermann, E. (1999). *Wasserbau - Praxis*.
- Laursen, E., & Toch, A. (1956). *Scour Around Bridge Piers and Abutments*.
- Melesse Moges, E. (2010). *An Evaluation of Sediment Transport on the river Spöl using SRH-2D Model*.

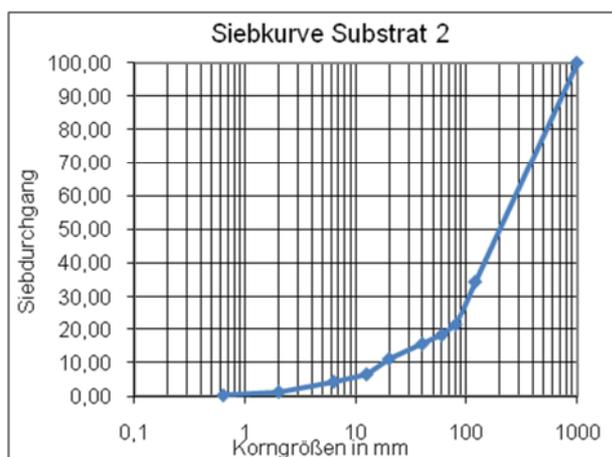
- Perdok, U. (2002). *Application of timber groynes in coastal engineering*. Delft.
- Phillips, B. C., & Sutherland, A. J. (1989). *Spatial lag effects in bed load sediment transport*.
- Raudkivi, A. (1996). *Permeable Pile Groins*. Journal of Waterway, Port, and Ocean Engineering.
- Schröder. (2001). *Gewässerregulung Binnenverkehrswasserbau*. Werner Verlag.
- Schwarz, R., & Kozerski, H.-P. (2003). *Die Bedeutung von Bühnenfeldern für die Retentionsleistung der Elbe*.
- Shields, A. (1936). *Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung*.
- Tominaga, A., Ijima, K., & Nakano, Y. (2001). *Flow Structures Around Submerged Spur Dikes With Various Relative Height*.
- Trampenau, T. (2000). *Hydraulische Wirksamkeit durchlässiger Bühnen- Laborexperimente und Naturuntersuchungen*. Braunschweig: Leichtweiss- Institut für Wasserbau.
- Uijtewaal, W. S. (2005). *Effects of Groyne Layout on the Flow in Groyne Fields: Laboratory Experiments*.
- van Heereveld, M., & Zijlstra, R. (2007). *River groynes for the future - Harmonising today's demands in innovative groyne design*.
- van Rijn, L. C. (1987). *Sediment transport: part 1 bed load transport*.
- von Münnich, B. C. (1713). Zitat aus dem Bericht zur Visitation des Diemel Stroms. In M. Deutsch, K. Röttcher, & K.-H. Pörtge, *Wasserspiegel, Zitate zu Hochwasser, Wasserbau und Wasserwirtschaft aus drei Jahrhunderten*. Sparbuchverlag.
- Westrich, B. (1988). *Fluvialer feststofftransport- Auswirkungen auf die Morphologie und Bedeutung für die Wassergüte*.
- Westrich, B., Schmid, G., & Hammer, D. (2005). *Technischer Bericht: Modellversuche zur Ufersanierung am Altneckar Ortsteil Beihingen*.
- Wieprecht, S. (2008). *Manuskript zur Vorlesung Wasserbau und Wasserwirtschaft*.
- Wirtz, C. (2004). *Hydromorphologische und morphodynamische Analyse von Bühnenfeldern der unteren Mittelelbe im Hinblick auf eine ökologische Gewässerunterhaltung*.
- Wurms, S. (2004). *Parametrisierung von Bühnenfeldern in 2D-HN-Modellen anhand numerischer Modellrechnungen und Naturdaten der Donau*.
- Yen, C.-L., Lai, J.-S., & Chang, W.-Y. (2000). *Modelling of 3D flow and scouring around circular piers*.
- Yossef, M. F. (2002). *The effect of groynes on rivers*.

Anhang

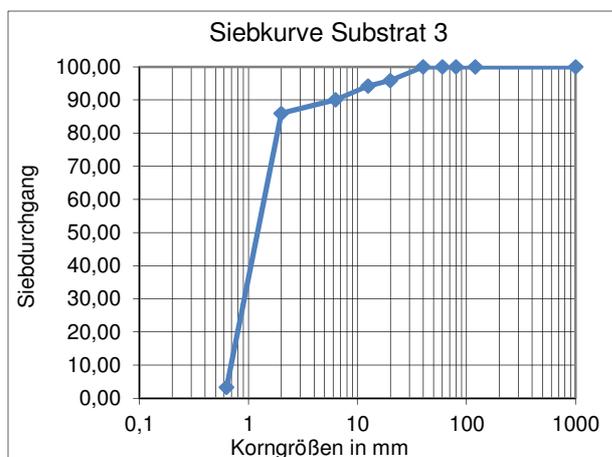
Anhang A Siebkurven



Siebkurve Substrat 1



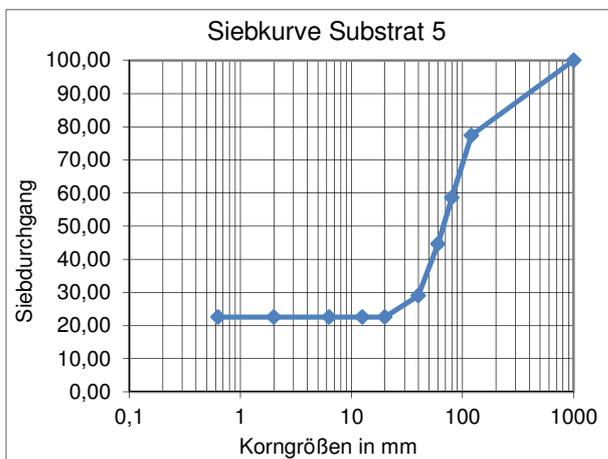
Siebkurve Substrat 2



Siebkurve Substrat 3



Abbildung Substrat 4



Siebkurve Substrat 5

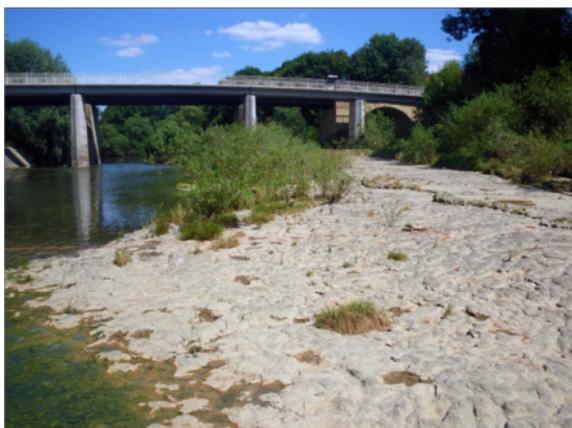


Abbildung Substrat 4

Anhang B Modellierungsmodul

Flow Modul

```

// Simulation Description:
// Simulation Type (FLOW MORP MOB TEM)
flow
// Results-Output-Format-and-Unit (SRHC/TEC/SRHN/XMDF SI/EN)
srhn si
// Monitor-Point-Info: NPOINT
2
// Monitor Point Coordinates: x1 y1 x2 y2 ...
3515227 5422520
3514903 5422554
// Steady-or-Unsteady (STEADY/UNS)
unsteady
// Time_Step and Total_Simulation_Time: TSTART DT T_SIMU [FLAG]
0 1 5
// Turbulence-Model-Selection (PARA or KE)
para
// Initial Condition Method (DRY or filename)
dry
// Mesh-Unit (FOOT METER INCH MM MILE KM)
Meter
// Mesh FILE_NAME and FORMAT (SMS...)
100oB_unsteady.2dm sms
// Manning Roughness Input Method (1=constant 2=material-type 3=(x y)
distributed
2
// Number of Material Types
8
// For each Material Type: Manning-Coef
0.025
0.026
0.1
0.05
0.03
0.014
0.1
0.0136
// Any-Special-Treatments? (0 or empty = NO; 1=YES)

// Boundary Type (INLET-Q EXIT-H etc)
Inlet-q
// Boundary Values (Q W QS TEM H_rough etc)
100 si
// Boundary Type (INLET-Q EXIT-H etc)
Exit-h
// Boundary Values
185.215 si
// Intermediate Result Output Control: METHOD INTERVAL
0.1

```

Morph Modul

```
// Simulation Description:

// Simulation Type (FLOW MORP MOB TEM)
Morph
// Results-Output-Format-and-Unit (SRHC/TEC/SRHN/XMDF  SI/EN)
srhn si
// Monitor-Point-Info: NPOINT
2
// Monitor Point Coordinates: x1 y1 x2 y2 ...
3515227 5422520
3514903 5422554
// Steady-or-Unsteady (STEADY/UNS)
unsteady
// Time_Step and Total_Simulation_Time: TSTART DT T_SIMU [FLAG]
0 0.5 5
// Turbulence-Model-Selection(PARA or KE)
Para
// General Sediment Parameters: spec_grav sed_nclass
2.65 5
// Diam_Lower(mm) Diam_Upper(mm) [Den_Bulk] [SI/EN] for each size class
0.2 2
2 12.5
12.5 40
40 80
80 1000
//Sediment Capacity Formula Selection (1=EH;2=Parker;3=Wilcox;4=MPM;6=Yang)
4
// Method to compute reference sediment diameter (1=consnat;2=D50;3=Dnn)
3
// The Percentage used to computer D_REF
75
// Initial Condition Method (DRY or filename)
Dry
// Mesh-Unit (FOOT METER INCH MM MILE KM)
Meter
// Mesh FILE_NAME and FORMAT(SMS...)
100oB_unsteady.2dm sms
// Bed Gradation Spatial Distribution Method (Uniform 2DM POINT)
2dm
// Bed Gradation Zone Input Method: 2DM File Name
100oB_unsteady.2dm
// Number of Bed Gradation Zones
8
// CUMULATIVE data (di Pi) for each bed layer and bed zone
cumulative 2 9 12.5 22 40 32 80 53 1000 100
cumulative 2 1 12.5 7 40 17 80 24 1000 100
cumulative 2 86 12.5 94 40 100 80 100 1000 100
cumulative 2 0 12.5 0 40 0 80 0 1000 100
cumulative 2 0 12.5 8 40 46 80 100 1000 100
cumulative 2 0 12.5 0 40 0 80 0 1000 100
cumulative 2 0 12.5 0 40 0 80 0 1000 100
cumulative 2 86 12.5 94 40 100 80 100 1000 100
//Manning Roughness Input Method(1=const. 2=materialtype 3=(x y)
distributed
2
```

```
// Number of Material Types
8
// For each Material Type: Manning-Coef
0.025
0.026
0.05
0.05
0.03
0.014
0.1
0.0136
// Any-Special-Treatments? (0 or empty = NO; 1=YES)

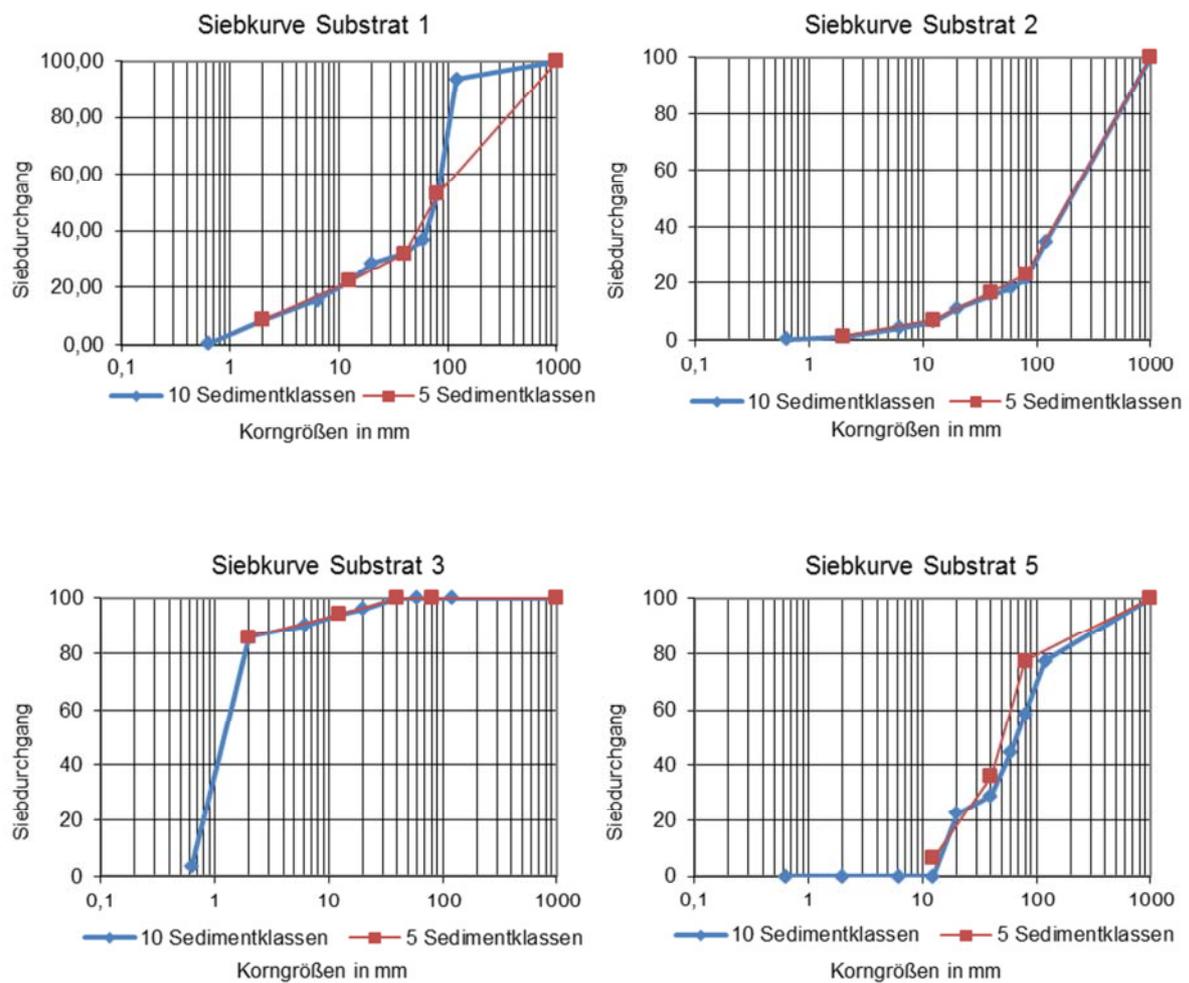
// Boundary Type (INLET-Q EXIT-H etc)
inlet-q
// Boundary Values (Q W QS TEM H_rough etc)
100 si
// Boundary Type (INLET-Q EXIT-H etc)
exit-h
// Boundary Values (Q W QS TEM H_rough etc)
185.215 si
// Intermediate Result Output Control: METHOD INTERVAL
0.25
```

Mobile Modul

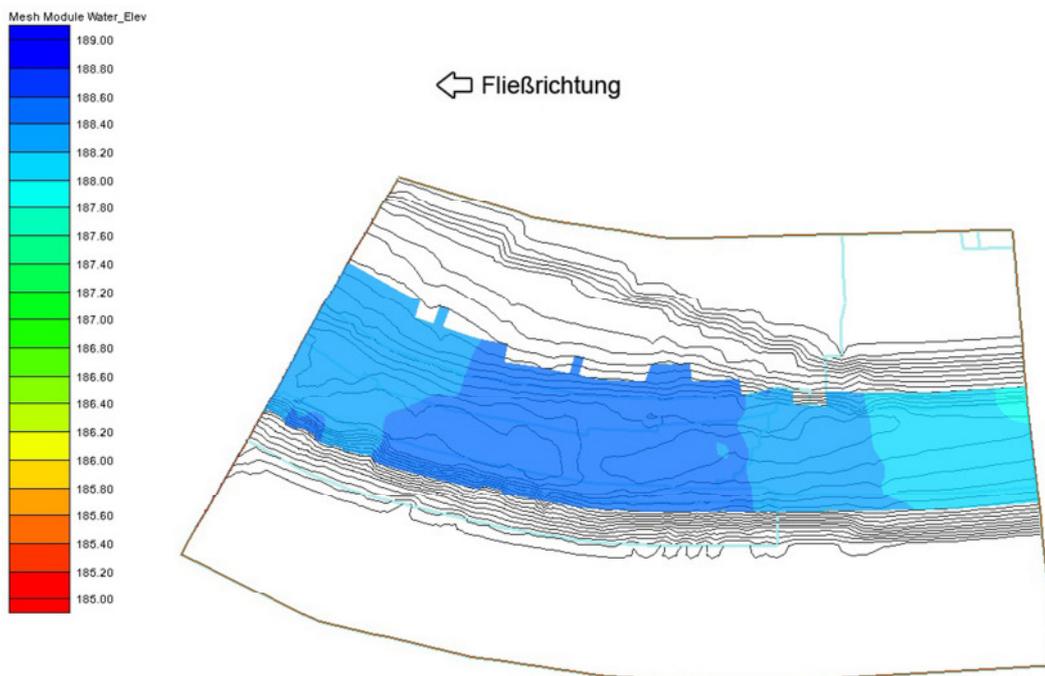
```
// Simulation Description:
// Simulation Type (FLOW MORP MOB TEM)
Mobile
// Results-Output-Format-and-Unit(SRHC/TEC/SRHN/XMDF SI/EN)
SRHN si
// Monitor-Point-Info: NPOINT
2
// Monitor Point Coordinates: x1 y1 x2 y2 ...
3515227 5422520
3514903 5422554
// Steady-or-Unsteady (STEADY/UNS)
Unsteady
// Time_Step and Total_Simulation_Time: TSTART DT T_SIMU [FLAG]
0 0.5 2
// Turbulence-Model-Selection(PARA or KE)
Para
// General Sediment Parameters: spec_grav sed_nclass
2.65 5
// Diam_Lower(mm) Diam_Upper(mm) [Den_Bulk] [SI/EN] for each size class
0.2 2
2 12.5
12.5 40
40 80
80 1000
// Water Temperature (Celsius):
20
//Sediment Capacity Formula Selection (1=EH;2=Parker;3=Wilcox;4=MPM;6=Yang)
4
// Bedload Adaptation Length: mod_adap_lng Length (0=const;1=Sutherland;
2/3=van Rijn)
1
// Active Layer Thickness: MOD_ALayer NALT (1=const;2=Nalt*d90)
2 3
// Initial Condition Method (DRY or filename)
dry
// Mesh-Unit (FOOT METER INCH MM MILE KM)
meter
// Mesh FILE_NAME and FORMAT(SMS...)
100pBmobile.2dm sms.2dm
// Bed Gradation Spatial Distribution Method (Uniform 2DM POINT)
2dm
// Bed Gradation Zone Input Method: 2DM File Name
100pBmobile.2dm
// Number of Bed Gradation Zones
8
// Number of Bed Layers
2
// Thickness Unit(SI/EN) Den_Clay(Cohesive) for each layer and zone
1 si
// CUMULATIVE data (di Pi) for each bed layer and bed zone
cumulative 2 9 12.5 22 40 32 80 53 1000 100
// Thickness Unit(SI/EN) Den_Clay(Cohesive) for eachlayer and zone
1 si
// CUMULATIVE data (di Pi) for each bed layer and bed zone
cumulative 2 0 12.5 0 40 0 80 0 1000 100
// Number of Bed Layers 2
2
1 si
```

```
cumulative 2 1 12.5 7 40 17 80 24 1000 100
1 si
cumulative 2 0 12.5 0 40 0 80 0 1000 100
// Number of Bed Layers 3
2
1 si
cumulative 2 86 12.5 94 40 100
1 si
cumulative 2 0 12.5 0 40 0 80 0 1000 100
// Number of Bed Layers 4
2
1 si
cumulative 2 0 12.5 0 40 0 80 0 1000 100
1 si
cumulative 2 0 12.5 0 40 0 80 0 1000 100
// Number of Bed Layers 5
2
1 si
cumulative 2 0 12.5 8 40 46 80 100
1 si
cumulative 2 0 12.5 0 40 0 80 0 1000 100
// Number of Bed Layers 6
1
1 si
cumulative 2 0 12.5 0 40 0 80 0 1000 100
// Number of Bed Layers7
1
1 si
cumulative 2 0 12.5 0 40 0 80 0 1000 100
// Number of Bed Layers 8
2
1 si
cumulative 2 86 12.5 94 40 100
1 si
cumulative 2 0 12.5 0 40 0 80 0 1000 100
// manning Roughness
2
//number of material types
8
//manning coef
0.025
0.026
0.05
0.05
0.03
0.014
100000
0.0136
//boundary type
inlet-q
//boundary values
100 0 0 0 0 0 si
//boundary type
exit-h
//boundary value
185.37 si
//Intermediate Result Output Control
0.25
```

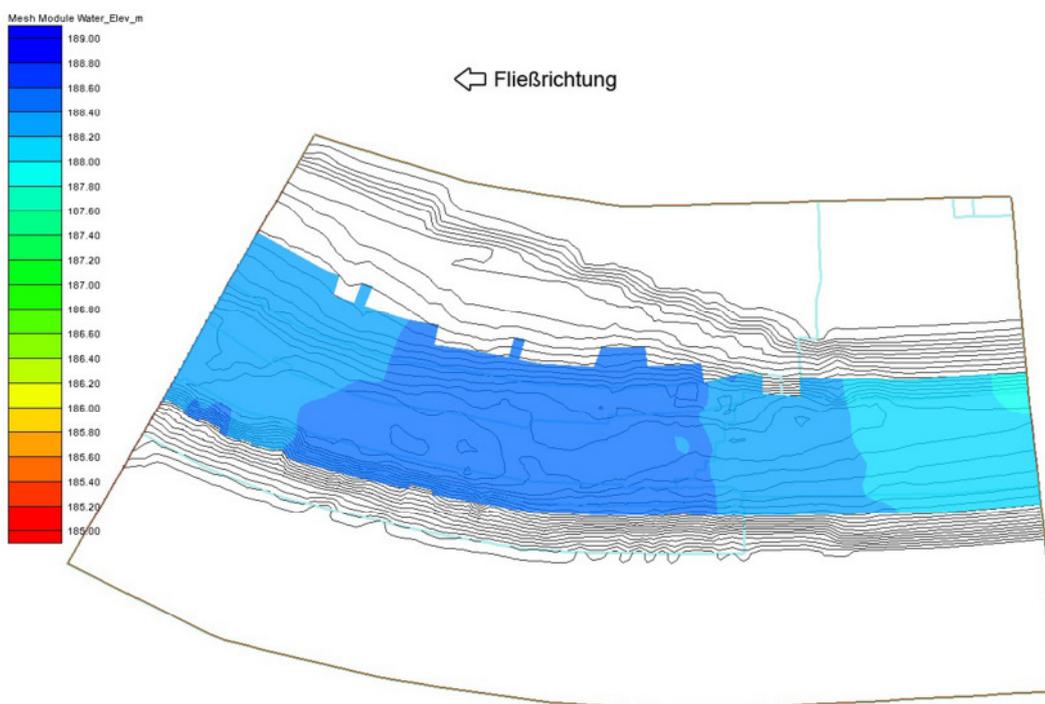
Anhang C Reduzierung der Sedimentklassen



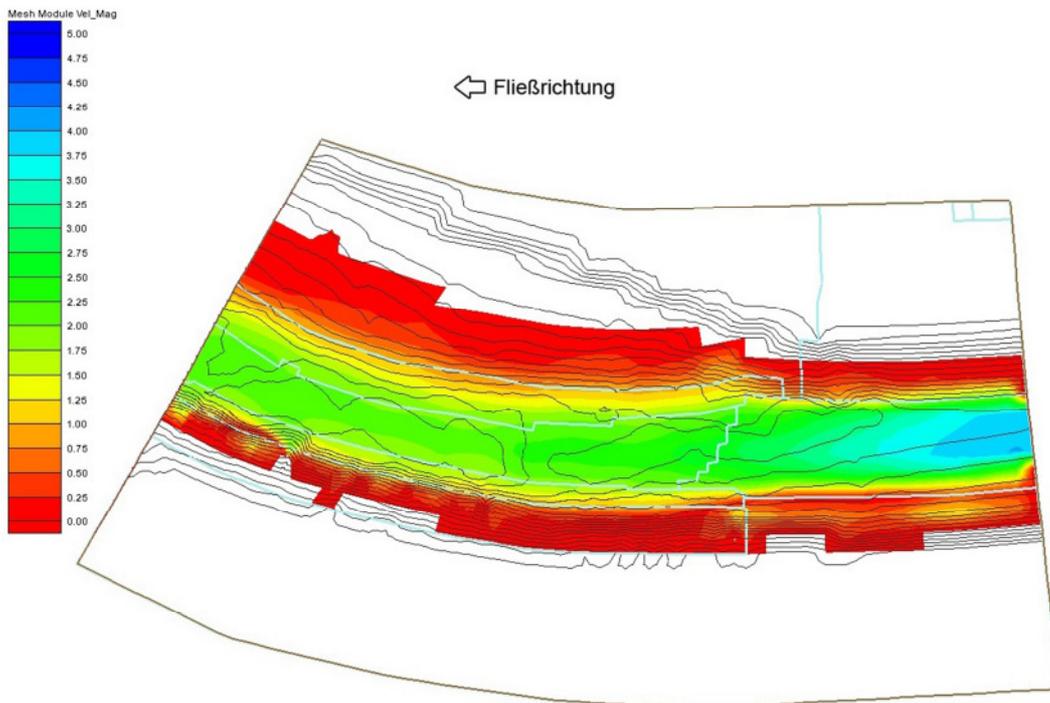
Anhang D Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten



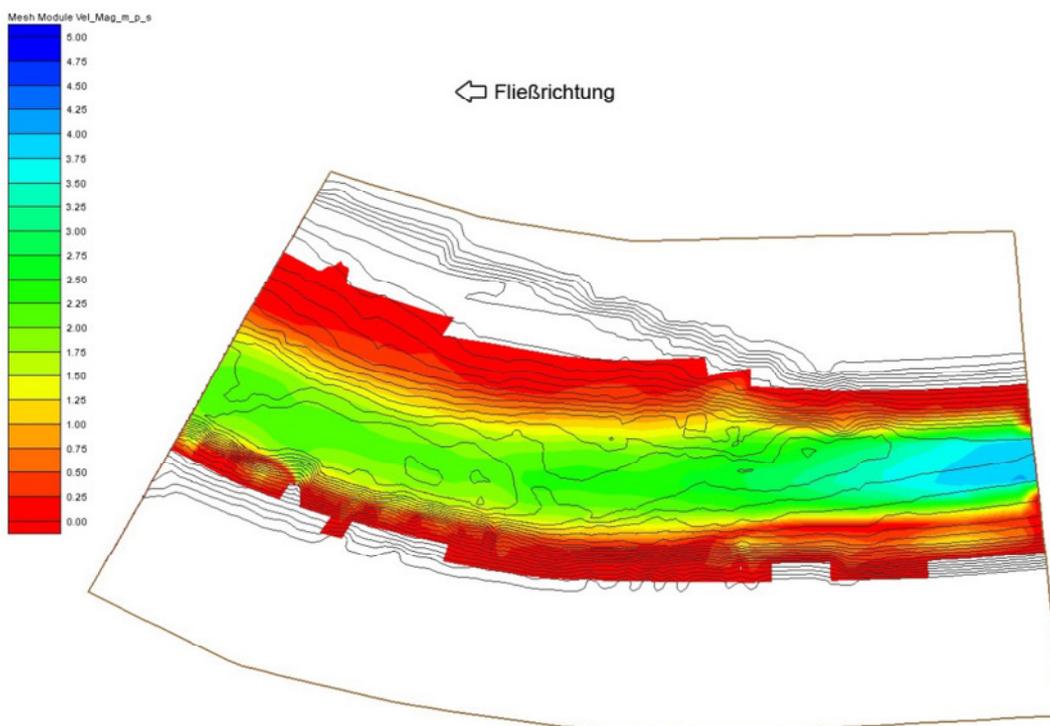
Wasserspiegellage 10 Sedimentklassen



Wasserspiegellage 5 Sedimentklassen

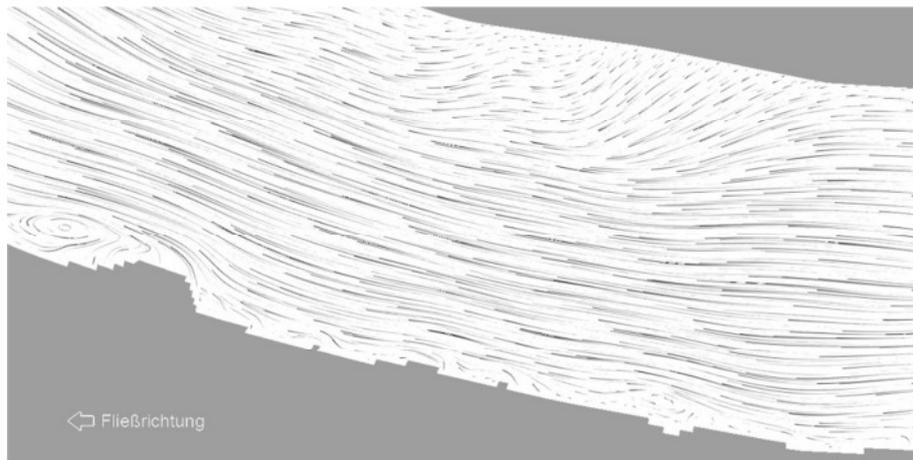


Fließgeschwindigkeit 10 Sedimentklassen

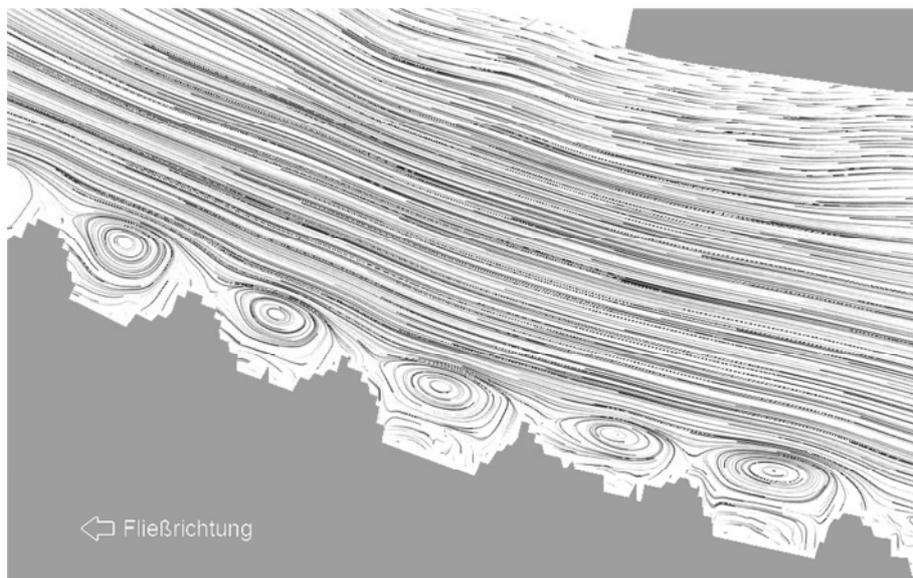


Fließgeschwindigkeit 5 Sedimentklassen

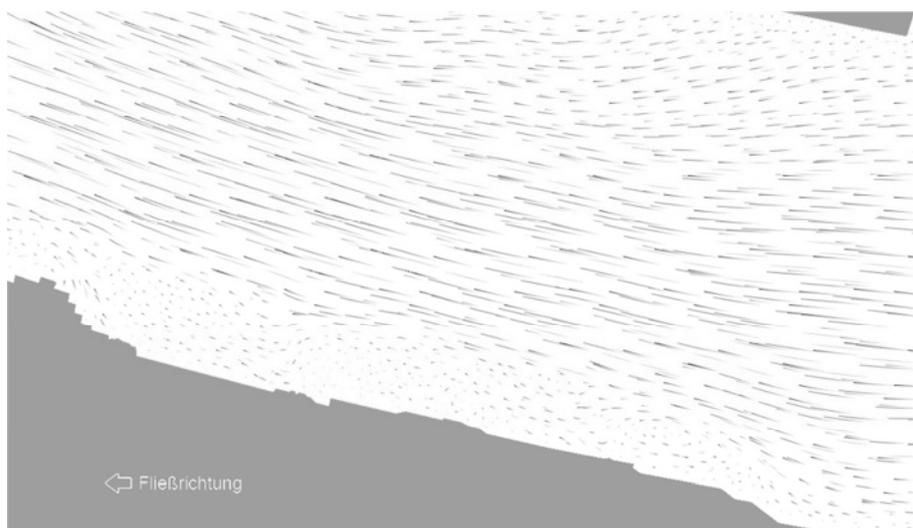
Anhang E Strömungsmuster



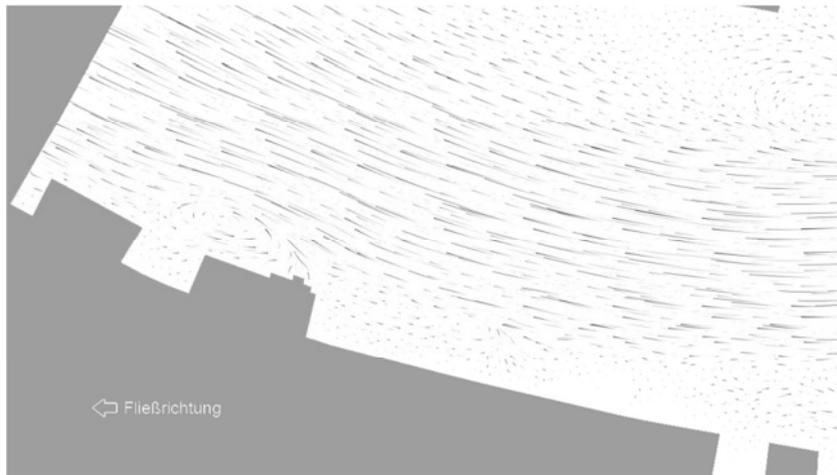
Videoausschnitt Modell ohne Buhnen bei 100 m³/s



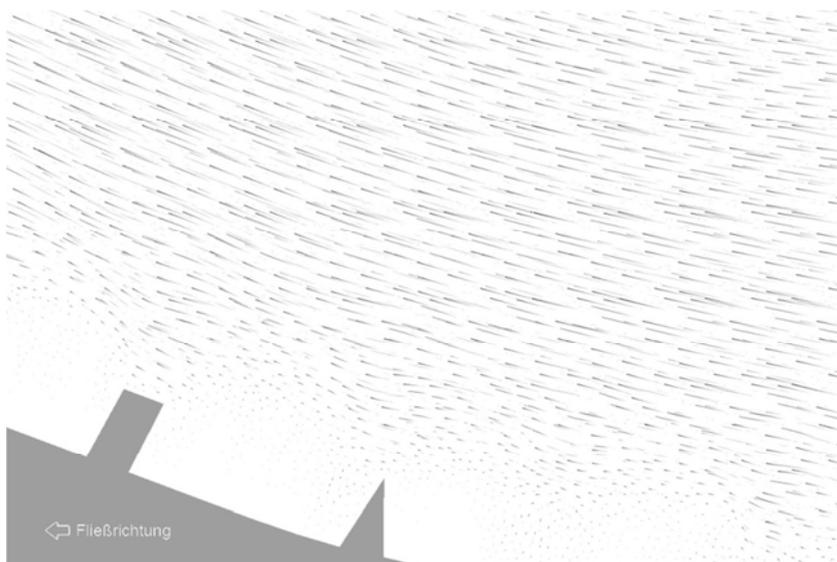
Videoausschnitt Modell mit Buhnen bei 100 m³/s



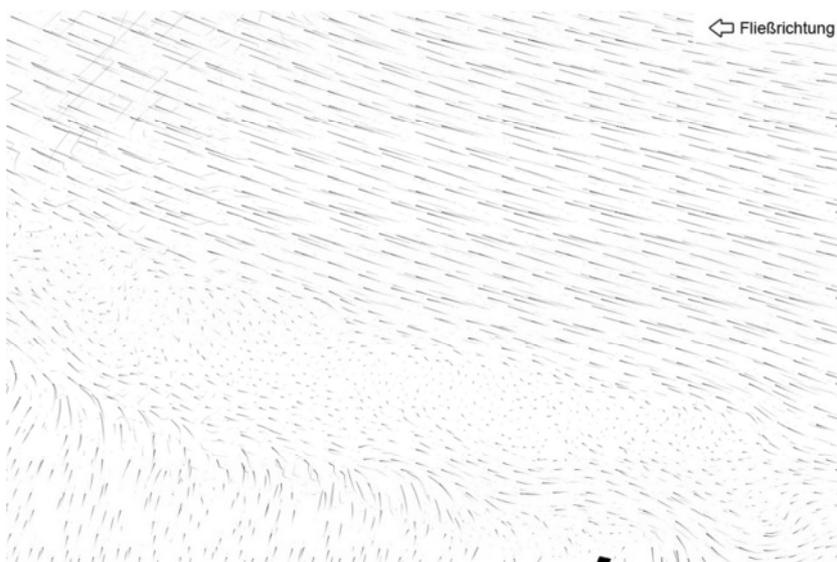
Videoausschnitt Modell mit Pfahlbuhnen bei 100 m³/s



Videoausschnitt Modell ohne Buhnen bei 400 m³/s

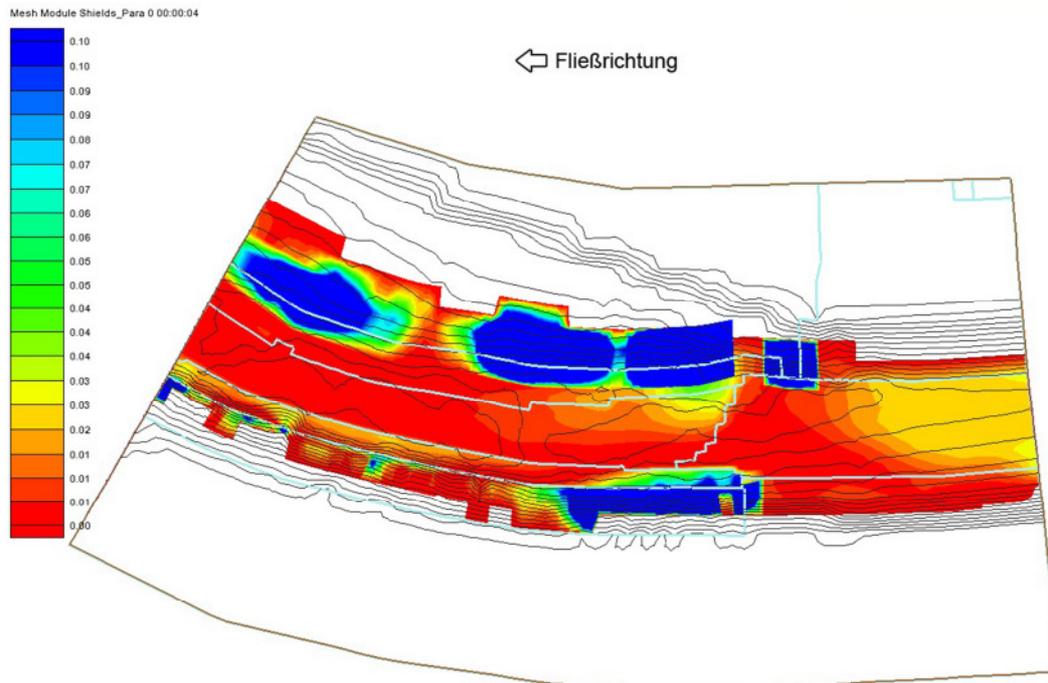
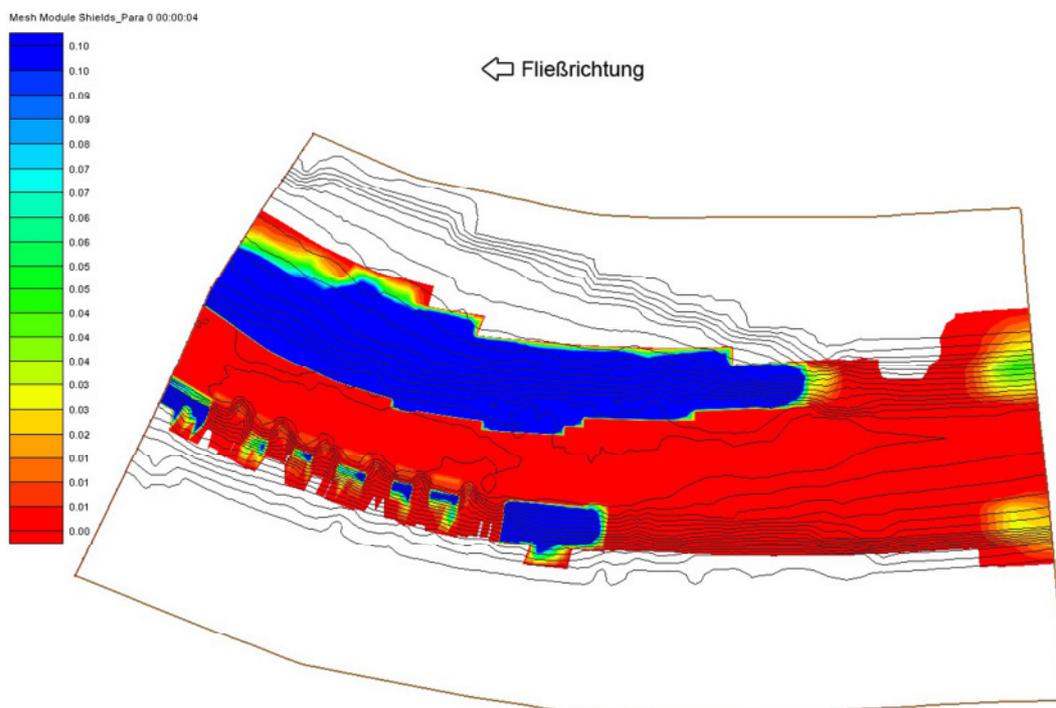


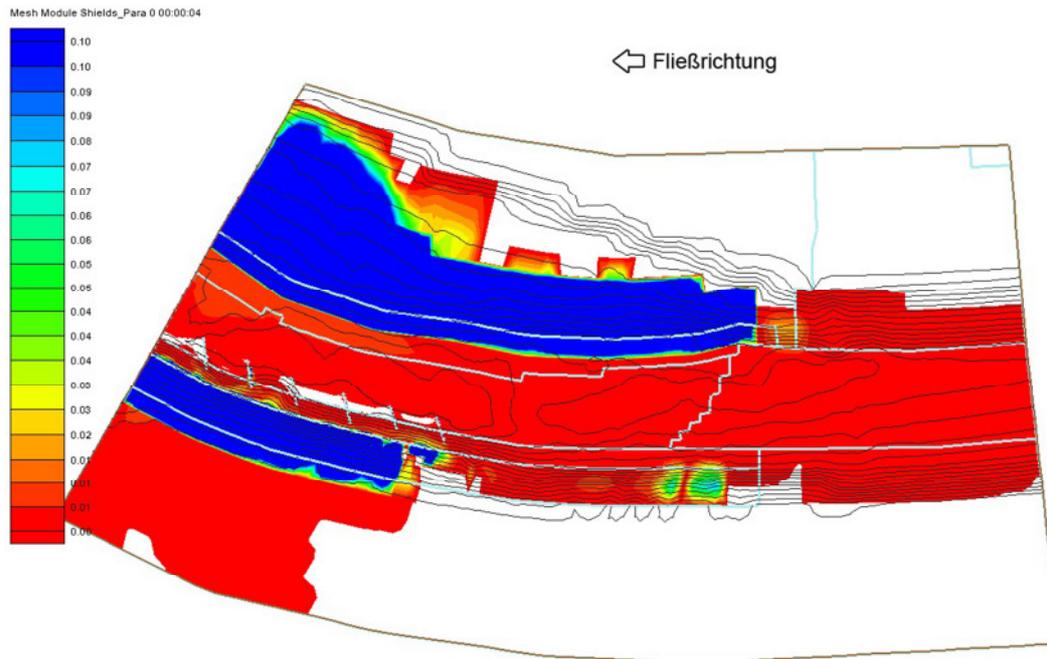
Videoausschnitt Modell mit Buhnen bei 400 m³/s



Videoausschnitt Modell mit Pfahlbuhnen bei 400 m³/s

Anhang F Shields Parameter

Shields Parameter bei einem Abfluss von $400 \text{ m}^3/\text{s}$, Modell ohne BuhnenShields Parameter bei einem Abfluss von $400 \text{ m}^3/\text{s}$, Modell mit Buhnen



Shields Parameter bei einem Abfluss von $400 \text{ m}^3/\text{s}$, Modell mit Pfahlbuhnen