



Universität Stuttgart



Lehrstuhl für Wasserbau  
und Wassermengenwirtschaft  
Prof. Dr.-Ing. Silke Wiprecht

## Masterarbeit

# **3-D numerische Modellierung eines physikalischen Modellversuchs zur Bestimmung des Spülkegels während einer Stauraumspülung**

Maximilian Kunz

Matrikelnr.: 2811860

30. Oktober 2019

Betreuer: Kilian Mouris, M.Sc.  
Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft  
Stefan Haun, Ph.D.

Prüferin: Prof. Dr.-Ing. Silke Wiprecht  
Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft

Studiengang: Bauingenieurwesen



## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorgelegte Masterarbeit eigenständig verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen, Darstellungen und Hilfsmittel benutzt habe. Dies trifft insbesondere auch auf Quellen aus dem Internet zu. Alle Textstellen, die wortwörtlich oder sinngemäß anderen Werken oder sonstigen Quellen entnommen sind, habe ich in jedem einzelnen Fall unter genauer Angabe der jeweiligen Quelle, auch der Sekundärliteratur, als Entlehnung gekennzeichnet.

Ich habe diese Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich stimme ausdrücklich zu, dass meine Masterarbeit mit dem Titel „3-D numerische Modellierung eines physikalischen Modellversuchs zur Bestimmung des Spülkegels während einer Stauraumspülung“ nach Beendigung der Masterprüfung zu wissenschaftlichen Zwecken in den Bibliotheken des Instituts für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart aufgestellt und zugänglich gemacht wird (Veröffentlichung nach § 6 Abs. 1 UrhG).

Stuttgart, 30. Oktober 2019

Maximilian Kunz



## Kurzfassung

Die Speicherung von Wasser in Stauräumen wird mit zunehmender Weltbevölkerungszahl immer bedeutender. Durch Verlandung kommt es jedoch zusehends zu einem Rückgang des zur Verfügung stehenden Stauvolumens. Ein Ansatz zur Wiedergewinnung verlorenen Volumens sind Stauraumspülungen.

In dieser Arbeit werden dreidimensionale numerische Modellierungen eines physikalischen Modellversuchs zur Bestimmung des Spülkegels bei einer Stauraumspülung mit partiellem Abstau durchgeführt. Dazu werden die beiden Programme SSIIM 1 und SSIIM 2 verwendet. SSIIM 1 verwendet dabei ein orthogonales, strukturiertes Berechnungsgitter, während SSIIM 2 ein adaptives, unstrukturiertes Gitter benutzt.

Der zu simulierende Laborversuch besteht aus einem rechteckigen Kanal mit einer eingebauten Sedimentschicht, an dessen Ende sich ein Schütz befindet. Durch Öffnen des Schützes kommt es zur Spülung eines Teils der Sedimente und Ausbildung eines Spülkegels nahe des Schützes.

Bei der Umsetzung des Laborversuchs in SSIIM 1 wird festgestellt, dass der Einbau des Schützes nicht mit der Absenkung des Wasserspiegels kompatibel ist. Daraufhin werden drei vereinfachte Simulationsvarianten entwickelt. In SSIIM 2 kann das Schütz nicht geometrisch korrekt implementiert werden, woraufhin ebenfalls zwei vereinfachte Varianten entwickelt werden. In beiden Programmen besteht keine Möglichkeit, die Blockierung des Schützes durch die Sedimentschicht exakt zu modellieren. Zur Lösung dieses Problems wird ein Startkegel im Bereich des Schützes eingebaut.

Die Simulationen führen bei beiden Softwares zu geringeren Kegelvolumina als im Laborversuch. SSIIM 2 liefert dabei aufgrund der realitätsnaheren Modellierung und geringeren Zahl an Vereinfachungen bei der Umsetzung des Laborversuchs deutlich genauere Ergebnisse als SSIIM 1. In SSIIM 1 tritt in allen Simulationen eine Asymmetrie des Spülkegels auf, welche vermutlich auf einen Fehler im Sand-Slide-Algorithmus zurückzuführen ist.

SSIIM 1 ist somit nicht für die Simulation von Stauraumspülungen geeignet, wohingegen SSIIM 2 sich als bedingt geeignet erweist. Für SSIIM 2 werden Verbesserungen bei der Implizierung des Grundablasses vorgeschlagen.

In den Parameterstudien werden die inneren Iterationen, die vertikale Gitterauflösung, die Transportformel, der Reibungswinkel sowie die Sedimentdichte und der Shields-Parameter als kritische Parameter ermittelt.



## Abstract

The storage of water in reservoirs is becoming more and more important due to an increase in the world's population. However, the ongoing process of reservoir sedimentation is leading to a decrease in available storage volume. A method to regain such lost volume is reservoir flushing.

Within this study several three-dimensional numerical modelings of a physical model determining the flushing cone during reservoir flushing with partial drawdown of the water level are conducted. The two programs SSIIM 1 and SSIIM 2 are used for these studies. SSIIM 1 uses an orthogonal, structured grid, while SSIIM 2 uses an adaptive, unstructured grid.

The physical model supposed to be simulated consists of a rectangular channel with an implemented layer of sediments. There is a sluice gate at the end of the channel. By opening the gate, a part of the sediments is flushed, which leads to the development of a flushing cone close to the gate.

While translating the physical model to SSIIM 1 it is determined that the implementation of the gate is not compatible with a decreasing water level. Therefore three different simplified simulation methods are developed. In SSIIM 2 it is not possible to implement the gate with its correct geometrical dimensions. Therefore two simplified simulation methods are created for SSIIM 2 as well. Both programs do not contain the possibility to exactly model the blocking of the gate by the sediment layer. To solve this problem, an initial cone is implemented close to the gate.

The simulations in both programs lead to smaller volumes of the flushing cone compared to the cone in the physical model. SSIIM 2 delivers far better results than SSIIM 1 due to the smaller amount of simplifications in the implementation of the physical model in the program. The results of SSIIM 1 show a significant asymmetry of the flushing cones in all simulations, which presumably can be attributed to an error in the sand slide algorithm.

Therefore, SSIIM 1 is not considered suitable for the modeling of reservoir flushing, whereas SSIIM 2 is considered partly suitable. Improvements of the program regarding the implementation of outlets are recommended.

In the following parameter studies the number of inner iterations, the vertical grid resolution, the sediment transport formula, the angle of repose as well as the sediment density and the Shields parameter are determined to be critical parameters.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	i
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	v
<b>Tabellenverzeichnis</b>	ix
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	xi
<b>Symbolverzeichnis</b>	xiii
<b>1. Einführung</b>	1
1.1. Motivation . . . . .	1
1.2. Ziel der Arbeit . . . . .	2
<b>2. Grundlagen</b>	3
2.1. Stauräume und Stauanlagen . . . . .	3
2.1.1. Notwendigkeit von Stauanlagen . . . . .	3
2.1.2. Arten von Stauanlagen . . . . .	4
2.1.3. Technischer Aufbau von Talsperren . . . . .	6
2.2. Die Problematik der Stauraumverlandung . . . . .	8
2.2.1. Ursachen der Stauraumverlandung und Einfluss des Klimawandels . . . . .	8
2.2.2. Physikalische Prozesse während der Stauraumverlandung . . . . .	9
2.2.3. Folgen der Stauraumverlandung . . . . .	11
2.2.4. Maßnahmen gegen die Stauraumverlandung . . . . .	13
2.3. Stauraumspülungen . . . . .	15
2.3.1. Spülen mit vollständiger Absenkung des Wasserspiegels . . . . .	17
2.3.2. Spülen ohne Absenkung des Wasserspiegels . . . . .	18
2.3.3. Spülen mit partiellem Abstau . . . . .	19

<b>3. Physikalischer Modellversuch zur Bestimmung des Spülkegels</b>	<b>21</b>
3.1. Allgemeines . . . . .	21
3.2. Versuchsaufbau . . . . .	23
3.3. Verwendetes Material . . . . .	24
3.4. Messkonzept und Ergebnisse . . . . .	26
<b>4. Dreidimensionale numerische Modellierung mit SSIIM 1 und SSIIM 2</b>	<b>29</b>
4.1. Allgemeines . . . . .	29
4.2. Hydrodynamische Modellierung . . . . .	30
4.2.1. Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen . . . . .	30
4.2.2. Turbulenzmodell und Wandgesetz . . . . .	31
4.2.3. SIMPLE-Algorithmus . . . . .	33
4.2.4. Berechnung des Wasserspiegels . . . . .	33
4.3. Morphodynamische Modellierung . . . . .	34
4.4. Numerische Implementierung der Gleichungen . . . . .	37
4.4.1. Räumliche Diskretisierung . . . . .	37
4.4.2. Zeitliche Diskretisierung . . . . .	38
4.5. Gittergenerierung . . . . .	40
4.5.1. Arten von Gittern . . . . .	40
4.5.2. Qualitätskriterien . . . . .	42
4.5.3. Gitter in SSIIM . . . . .	43
4.6. Konvergenz . . . . .	45
4.7. Ablauf einer numerischen Modellierung . . . . .	47
4.8. Die Dateienstruktur in SSIIM 1 und SSIIM 2 . . . . .	49
<b>5. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 1</b>	<b>53</b>
5.1. Simulation des absinkenden Wasserspiegels . . . . .	53
5.1.1. Festlegung des zu simulierenden Bereichs . . . . .	54
5.1.2. Gittergenerierung . . . . .	55
5.1.3. Rauheit und Berechnung des Wasserspiegels . . . . .	55
5.1.4. Einbau des Schützes . . . . .	55
5.1.5. Entwicklung zweier Simulationsvarianten . . . . .	56

5.2.	Durchführung der Simulationen mit initialer Sedimentschicht . . . . .	58
5.2.1.	Einbau der Sedimentschicht . . . . .	59
5.2.2.	Rauheit . . . . .	59
5.2.3.	Gittergenerierung . . . . .	59
5.2.4.	Parameter der hydrodynamischen Modellierung . . . . .	61
5.2.5.	Parameter der morphodynamischen Modellierung . . . . .	61
5.2.6.	Anpassung der Sedimentschicht im Bereich des Schützes . . . .	62
5.2.7.	Aufteilung der Simulation in mehrere Einzelsimulationen . . . .	65
5.3.	Ergebnisse und Interpretation . . . . .	67
5.3.1.	Methoden zur Auswertung der Ergebnisse . . . . .	67
5.3.2.	Dreidimensionale Darstellung der Simulationsergebnisse . . . .	70
5.3.3.	Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen aus dem Laborversuch . . . . .	72
5.4.	Softwaretest zur Kombination der Simulationsvarianten 1 und 2 . .	79
5.5.	Untersuchung zur Asymmetrie des Spülkegels . . . . .	81
<b>6.</b>	<b>Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 2</b>	<b>83</b>
6.1.	Vorgehen . . . . .	83
6.1.1.	Gittergenerierung . . . . .	83
6.1.2.	Einbau des Schützes - Standardvariante . . . . .	84
6.1.3.	Einbau des Schützes - Manuelle Anpassung der Schützöffnung	88
6.1.4.	Parameter der hydrodynamischen Modellierung . . . . .	90
6.1.5.	Parameter der morphodynamischen Modellierung . . . . .	92
6.2.	Ergebnisse und Interpretation . . . . .	92
6.2.1.	Methoden zur Auswertung der Ergebnisse . . . . .	92
6.2.2.	Dreidimensionale Darstellung der Simulationsergebnisse . . . .	93
6.2.3.	Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen aus dem Laborversuch . . . . .	94
<b>7.</b>	<b>Parameterstudien</b>	<b>103</b>
7.1.	Übersicht . . . . .	103
7.2.	Innere Iterationen . . . . .	107
7.3.	Verfeinerung des Gitters in vertikaler Richtung . . . . .	108

## Inhaltsverzeichnis

---

7.4. Transportformel . . . . .	109
7.5. Sedimentdichte und Shields-Parameter . . . . .	109
7.6. Reibungswinkel . . . . .	112
7.7. Sinkgeschwindigkeit . . . . .	112
7.8. Algorithmus zur Berechnung des Wasserspiegels (SSIIM 2) . . . . .	113
7.9. Algorithmus zur Gittergenerierung (SSIIM 2) . . . . .	114
7.10. Relaxationskoeffizienten (SSIIM 2) . . . . .	115
7.11. Zusammenfassung . . . . .	115
<b>8. Zusammenfassung, Fazit und Ausblick</b>	<b>117</b>
8.1. Zusammenfassung . . . . .	117
8.2. Fazit und Ausblick . . . . .	119
<b>Literatur</b>	<b>I</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>V</b>
A.1. Simulationsdateien . . . . .	V

# **Abbildungsverzeichnis**

2.1. Systematik von Stauanlagen (DWA 2006) . . . . .	5
2.2. Talsperrenarten (Wiprecht et al. 2014) . . . . .	5
2.3. Aufbau einer Talsperre und Unterteilung des Stauraums (Wiprecht et al. 2014 nach DIN (2004)) . . . . .	7
2.4. Ablagerungsschema von Sedimenten in Reservoirs nach Annandale (2006) . . . . .	10
2.5. Dichteströme in Reservoirs nach Annandale 2006 . . . . .	11
2.6. Verlust von Totraum und Betriebsraum nach Annandale et al. (2016)	12
2.7. Maßnahmen gegen die Stauraumverlandung nach Kondolf et al. (2014)	14
2.8. Stauraumspülungen ohne Absenkung und mit vollständiger Absenkung des Wasserspiegels nach Wen Shen (1999) . . . . .	16
3.1. Schematischer Längsschnitt des physikalischen Modellversuchs . . . . .	24
3.2. Schematischer Grundriss des physikalischen Modellversuchs . . . . .	24
3.3. Aufbau und Material des physikalischen Laborversuchs (Ermilov 2018)	25
3.4. Wasserstands-Abfluss-Beziehung des Schützes im physikalischen Modellversuch . . . . .	26
3.5. Messkonzept des physikalischen Modellversuchs (Ermilov 2018) . . . . .	27
3.6. Spülkegel des physikalischen Modellversuchs (Ermilov 2018) . . . . .	27
4.1. Fließgeschwindigkeiten einer turbulenten Strömung an einem festen Ort nach Olsen (1999) . . . . .	30
4.2. Explizites zeitliches Differenzenschema (Lecheler 2018) . . . . .	39
4.3. Implizites zeitliches Differenzenschema (Lecheler 2018) . . . . .	39
4.4. Vergleich zwischen einem strukturierten und einem unstrukturierten Gitter nach Olsen (1999) . . . . .	41

4.5. Seiten- und Ausdehnungsverhältnis eines Berechnungsgitters (Olsen 2012) . . . . .	42
4.6. F64 1-Algorithmus zur Gittergenerierung in SSIIM 2 (Olsen 2018) . . . . .	44
4.7. F64 2-Algorithmus zur Gittergenerierung in SSIIM 2 (Olsen 2018) . . . . .	44
4.8. F64 11-Algorithmus zur Gittergenerierung in SSIIM 2 (Olsen 2018) . . . . .	44
4.9. Divergierende iterative Berechnung einer Variablen nach Olsen (2012) . . . . .	46
4.10. Schema eines instationären Berechnungsverfahrens (Saam 2018) . . . . .	48
4.11. Dateienstruktur in SSIIM nach Olsen (2018) . . . . .	49
5.1. Längsschnitt mit Sprung im Wasserspiegel zwischen erstem und zweitem Querschnitt . . . . .	54
5.2. Schema zur Verdeutlichung der Simulation bei Variante 1 . . . . .	57
5.3. Schema zur Verdeutlichung der Simulation bei Variante 2 . . . . .	57
5.4. Sukzessive Verfeinerung des Berechnungsgitters in Strömungsrichtung bis hin zum Schütz . . . . .	60
5.5. Anpassung der Sedimentschicht im Bereich des Schützes . . . . .	62
5.6. Querschnitt des gemessenen (blau) und simulierten (orange) Spülkegels 2 cm vor dem Schütz . . . . .	63
5.7. Längsschnitt und Draufsicht des eingebauten Startkegels zur Anpassung der Sedimentschicht im Bereich des Schützes . . . . .	64
5.8. Querschnitt des eingebauten Startkegels zur Anpassung der Sedimentschicht im Bereich des Schützes . . . . .	64
5.9. Quer- und Längsschnitte zur Auswertung der Simulationen . . . . .	68
5.10. Spülkegel der Simulation mit SSIIM 1 (Variante 1) . . . . .	71
5.11. Spülkegel der Simulation mit SSIIM 1 (Variante 2) . . . . .	71
5.12. Spülkegel der Simulation mit SSIIM 1 (Variante 3) . . . . .	71
5.13. Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 und des Laborversuchs am Querprofil x=-0,02 m . . . . .	74
5.14. Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 und des Laborversuchs am Querprofil x=-0,07 m . . . . .	74
5.15. Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 und des Laborversuchs am Querprofil x=-0,12 m . . . . .	75

5.16. Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 und des Laborver- suchs am Querprofil $x=-0,17\text{ m}$ . . . . .	75
5.17. Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 und des Laborver- suchs am Querprofil $x=-0,22\text{ m}$ . . . . .	76
5.18. Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 und des Laborver- suchs am Querprofil $x=-0,27\text{ m}$ . . . . .	76
5.19. Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 und des Laborver- suchs am Längsschnitt $y=0,17\text{ m}$ . . . . .	78
5.20. Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 und des Laborver- suchs am Längsschnitt $y=0,305\text{ m}$ . . . . .	78
5.21. Interpolationsfehler von SSIIM 1 bei der Berechnung des Wasserspiegels	82
5.22. Dreidimensionale Darstellung des Spülkegels von Variante 2 ohne den Sand-Slide-Algorithmus . . . . .	82
6.1. Fließgeschwindigkeiten und abflusswirksamer Querschnitt zum Zeit- punkt $t=0\text{ s}$ in SSIIM 2 . . . . .	87
6.2. Fließgeschwindigkeiten und abflusswirksamer Querschnitt zum Zeit- punkt $t=65\text{ s}$ in SSIIM 2 . . . . .	87
6.3. Fließgeschwindigkeiten und abflusswirksamer Querschnitt zum Zeit- punkt $t=130\text{ s}$ in SSIIM 2 . . . . .	87
6.4. Fließgeschwindigkeiten und abflusswirksamer Querschnitt zum Zeit- punkt $t=0\text{ s}$ mit manueller Anpassung der Schützöffnung . . . . .	89
6.5. Fließgeschwindigkeiten und abflusswirksamer Querschnitt zum Zeit- punkt $t=65\text{ s}$ mit manueller Anpassung der Schützöffnung . . . . .	89
6.6. Fließgeschwindigkeiten und abflusswirksamer Querschnitt zum Zeit- punkt $t=130\text{ s}$ mit manueller Anpassung der Schützöffnung . . . . .	89
6.7. Spülkegel der Simulation mit SSIIM 2 (Standardvariante) . . . . .	94
6.8. Spülkegel der Simulation mit SSIIM 2 (Manuelle Anpassung der Schüt- zöffnung) . . . . .	94
6.9. Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 und des Laborver- suchs am Querprofil $x=-0,02\text{ m}$ . . . . .	96
6.10. Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 und des Laborver- suchs am Querprofil $x=-0,07\text{ m}$ . . . . .	96

## Abbildungsverzeichnis

---

6.11. Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 und des Laborver- suchs am Querprofil $x=-0,12\text{ m}$ . . . . .	97
6.12. Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 und des Laborver- suchs am Querprofil $x=-0,17\text{ m}$ . . . . .	97
6.13. Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 und des Laborver- suchs am Querprofil $x=-0,22\text{ m}$ . . . . .	98
6.14. Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 und des Laborver- suchs am Querprofil $x=-0,27\text{ m}$ . . . . .	98
6.15. Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 und des Laborver- suchs am Längsschnitt $y=0,17\text{ m}$ . . . . .	100
6.16. Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 und des Laborver- suchs am Längsschnitt $y=0,305\text{ m}$ . . . . .	100
7.1. Parameterstudie zur Sedimentdichte am Profil $x=-0,12\text{ m}$ für Variante 1111	
7.2. Parameterstudie zur Sedimentdichte am Profil $x=-0,12\text{ m}$ für Variante 2111	

# Tabellenverzeichnis

3.1. Materialparameter des physikalischen Modellversuchs . . . . .	24
5.1. Zufluss, Abfluss und Wasserstand in der timei-Datei von Variante 1 .	57
5.2. Zufluss, Abfluss und Wasserstand in der timei-Datei von Variante 2 .	57
5.3. Aufteilung der Gesamtsimulation in fünf Einzelsimulationen . . . . .	65
5.4. Vergleich des erodierten Gesamtvolumens und des RMSE der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 mit dem Laborversuch . . . . .	72
5.5. Zufluss, Abfluss und Wasserstand in der timei-Datei des Softwaretests	80
5.6. Kontinuitäts-Residuum beim Softwaretest im Vergleich zu den Varianten 1 und 2 . . . . .	80
5.7. Vergleich des erodierten Gesamtvolumens und des RMSE des Softwaretests mit den ursprünglichen Simulationsvarianten und dem Laborversuch . . . . .	80
6.1. Abflusswirksame Zellen für die Modellierung der Schützöffnung in SSIIM 2 . . . . .	85
6.2. Abflusswirksame Zellen für die Modellierung mit manueller Anpassung der Schützöffnung in SSIIM 2 . . . . .	90
6.3. Zufluss, Abfluss und Wasserstand in der timei-Datei der Simulation mit SSIIM 2 . . . . .	91
6.4. Vergleich des erodierten Gesamtvolumens und des RMSE der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 mit dem Laborversuch . . . . .	95
7.1. Parameterstudien und deren Ergebnisse für die Simulationsvariante 1 in SSIIM 1 . . . . .	104
7.2. Parameterstudien und deren Ergebnisse für die Simulationsvariante 2 in SSIIM 1 . . . . .	105

7.3. Parameterstudien und deren Ergebnisse für die Simulation in SSIIM 2 106

# **Abkürzungsverzeichnis**

BL	Bed Load (Geschiebe)
CFL	Courant-Friedrichs-Lowy(-Kriterium)
CGA	Continuity and Gravity on an Adaptive Grid
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
GUI	Graphical User Interface (Grafische Benutzeroberfläche)
IDWA	Implicit Diffusive Wave Equations with Adaptive Grid
IPDA	Implicit Pressure Difference with Adaptive Grid
NTNU	Technisch-Naturwissenschaftliche Universität Norwegens
POW	First-Order Power-Law Interpolationsverfahren
RMSE	Root Mean Square Error
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
SL	Suspended Load (Schwebstoffe)
SOU	Second-Order Upwind Interpolationsverfahren
SSIIM	Sediment Simulation in Intakes with Multiblock Option



# Symbolverzeichnis

$a$	Distanz zwischen Konzentrationspunkt und Sohle	[m]
$A_i$	Dem Messpunkt i zugeordnete Fläche	[ $m^2$ ]
$c$	Sedimentkonzentration	[−]
$c_{Sohle}$	Schwebstoffkonzentration an der Sohle	[−]
$c_{\epsilon 1}$	Empirische Konstante im $\kappa$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodell	[−]
$c_{\epsilon 2}$	Empirische Konstante im $\kappa$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodell	[−]
$c_\mu$	Empirische Konstante im $\kappa$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodell	[−]
$d$	Mittlerer Partikeldurchmesser der Kornfraktion	[m]
$d_{90}$	Korndurchmesser bei 90 % Siebdurchgang	[m]
$d_{ch}$	Charakteristischer Korndurchmesser	[m]
$f$	Beobachteter Wert für die Berechnung des RMSE	[−]
$F_G$	Gravitationskraft	[N]
$F_R$	Reibungskraft	[N]
$Fr$	Froude-Zahl	[−]
$g$	Gravitationskonstante	[ $m/s^2$ ]
$h$	Aktuelle Wassertiefe	[m]
$h_{erodiert,i}$	Erosion am Messpunkt i	[m]

## Symbolverzeichnis

---

$h_{max}$	Maximale Wassertiefe im modellierten Gebiet	[m]
$I$	Sohlgefälle	[−]
$k$	Empirische Konstante im Wandgesetz	[−]
$K$	Brooks-Faktor zur Reduktion der kritischen Schubspannungen	[−]
$k_s$	Äquivalente Sandrauheit	[m]
$k_{St}$	Strickler-Beiwert	[ $m^{1/3}/s$ ]
$l$	Charakteristische Länge	[m]
$n$	Anzahl Gitterzellen in vertikaler Richtung	[−]
$n$	Manning-Koeffizient der Sohle	[ $s/m^{1/3}$ ]
$n'$	Manning-Koeffizient der Kornfraktion	[ $s/m^{1/3}$ ]
$n_{max}$	Maximale Anzahl Gitterzellen in vertikaler Richtung	[−]
$o$	Erwarteter Wert für die Berechnung des RMSE	[−]
$p$	Faktor für die Anzahl Gitterzellen in vertikaler Richtung	[−]
$P$	Druck	[Pa]
$p_b$	Prozentualer Anteil der Kornfraktion	[−]
$P_k$	Produktion der kinetischen Energie	[ $m^2/s^3$ ]
$q_b$	Geschiebetransportrate	[ $m^2/s$ ]
$q_s$	Schwebstofftransportrate	[ $m^2/s$ ]
$r$	Relaxationskoeffizient	[−]
$r_h$	Hydraulischer Radius	[m]
$Sc$	Schmidt-Zahl	[−]

---

$t$	Zeit / zeitliche Dimension	[s]
$\Delta t$	Zeitschritt	[s]
$u$	Schwankungswert der Fließgeschwindigkeit	[m/s]
$U$	Fließgeschwindigkeit	[m/s]
$U^*$	Schergeschwindigkeit	[1/s]
$\bar{U}$	Mittelwert der Fließgeschwindigkeit	[m/s]
$v$	Startwert der Fließgeschwindigkeit in der Iteration i+1	[m/s]
$v_i$	Berechnete Fließgeschwindigkeit in der Iteration i	[m/s]
$v_{i-1}$	Berechnete Fließgeschwindigkeit in der Iteration i-1	[m/s]
$V_{Kegel}$	Volumen des Spülkegels	[m <sup>3</sup> ]
$v_s$	Sinkgeschwindigkeit	[m/s]
$x$	Ort / räumliche Dimension	[m]
$\Delta x$	Maschenweite des Berechnungsgitters	[m]
$\alpha$	Winkel zwischen Sohlschubspannung und Stromlinie	[°]
$\gamma$	Distanz zur Wand	[m]
$\Gamma$	Diffusionskoeffizient	[m <sup>2</sup> /s]
$\gamma_s$	Spezifisches Gewicht des Sediments	[N/m <sup>3</sup> ]
$\gamma_w$	Spezifisches Gewicht des Wassers	[N/m <sup>3</sup> ]
$\delta_{ij}$	Kronecker-Delta	[−]
$\epsilon$	Dissipation der kinetischen Energie	[m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$\eta$	Dynamische Viskosität	[Pa · s]

## Symbolverzeichnis

---

$\theta/\varphi$	Reibungswinkel	[°]
$\kappa$	Turbulente kinetische Energie	[J/kg]
$\nu$	Kinematische Viskosität	[m²/s]
$\nu_t$	Turbulente Wirbelviskosität	[m²/s]
$\rho$	Dichte	[kg/m³]
$\rho_s$	Dichte des Sediments	[kg/m³]
$\rho_w$	Dichte des Wassers	[kg/m³]
$\sigma_\epsilon$	Empirische Konstante im $\kappa$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodell	[−]
$\sigma_\kappa$	Empirische Konstante im $\kappa$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodell	[−]
$\tau$	Sohlschubspannung	[N/m²]
$\tau_c$	Kritische Sohlschubspannung	[N/m²]
$\psi$	Neigungswinkel der Sohle	[°]
$\omega$	Sinkgeschwindigkeit	[m/s]
$\partial$	Partieller Differentialoperator erster Ordnung	[−]

# **1. Einführung**

## **1.1. Motivation**

Mit der Speicherung von Wasser in Reservoirs werden unterschiedliche, für die Gesellschaft teils essenzielle, Aufgaben erfüllt. Hierzu gehören unter anderem der Hochwasserschutz, die Bewässerung, Trinkwasserversorgung, Stromerzeugung sowie die Naherholung (vgl. Klopries et al. 2015; DWA 2006). Infolge der Energiewende gewinnt zudem die Speicherung potentieller Energie in Reservoirs als Teil von Pumpspeicherkraftwerken zunehmend an Bedeutung.

Da die Weltbevölkerung immer weiter zunimmt, steigt der Bedarf an Reservoirs und somit an Stauvolumen, um o.g. Aufgaben für eine steigende Zahl an Menschen erfüllen zu können. Jedoch kommt es in allen Reservoirs im Laufe der Zeit zur Anlandung von Sedimenten und somit zum Verlust von Stauraum. Nach Annandale (2006) ist der jährliche Zuwachs an Stauraum durch den Bau neuer Reservoirs seit 1970 rückgängig. Gleichzeitig erhöht sich das Sedimentvolumen in Stauräumen immer mehr. Dadurch geht global gesehen derzeit mehr Stauraum durch Verlandung verloren, als durch den Bau neuer Reservoirs gewonnen wird. Das weltweit zur Verfügung stehende Stauvolumen ist damit ebenfalls rückgängig: Es kommt zu einem jährlichen Verlust von 35 bis 70 km<sup>3</sup>. Dies entspricht ca. 0,5 % - 1 % des vorhandenen Volumens (vgl. White 2001).

Ein Ansatz zur Wiedergewinnung von verlorenem Stauvolumen sind Stauraumspülungen. Dabei entstehen durch das Öffnen des Grundablasses und Absenken des Wasserspiegels im Reservoir temporär flussähnliche Zustände. Diese führen zur Erosion und Spülung eines Teils der abgelagerten Sedimente aus dem Stauraum (vgl. Morris et al. 1998).

Zur besseren Vorhersage des Erfolgs geplanter Stauraumspülungen werden physikalische Modellversuche durchgeführt. Ergänzend oder alternativ dazu können

numerische Modellierungen durchgeführt werden.

## 1.2. Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Durchführung von dreidimensionalen numerischen Modellierungen eines an der Technisch-Naturwissenschaftlichen Universität Norwegens (NTNU) in Trondheim vollzogenen physikalischen Modellversuchs zur Bestimmung des Spülkegels bei Stauraumspülungen. Dazu werden die beiden Softwares SSIIM 1 und SSIIM 2 verwendet. Diese werden anhand des Laborversuchs auf ihre Eignung zur Simulation von Stauraumspülungen geprüft. Dabei werden die Einschränkungen der jeweiligen Software herausgearbeitet. Weiterhin werden Sensitivitätsanalysen zur Ermittlung kritischer Parameter durchgeführt. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

- Darstellung theoretischer Grundlagen
- Erläuterung des physikalischen Modellversuchs als Grundlage für die numerischen Modellierungen
- Erläuterung der dreidimensionalen numerischen Modellierung mit SSIIM 1 und SSIIM 2
- Erstellung von dreidimensionalen numerischen Modellen des Laborversuchs in SSIIM 1 und SSIIM 2 und Darstellung der dabei auftretenden Einschränkungen
- Entwicklung und Durchführung verschiedener Varianten zur Simulation des Modellversuchs mit beiden Softwares
- Analyse der Ergebnisse und Vergleich mit dem Laborversuch
- Durchführung von Sensitivitätsanalysen
- Ausblick auf mögliche zukünftige Untersuchungen und mögliche Anpassungen der Softwares

## **2. Grundlagen**

Dieses Kapitel beinhaltet die für das Verständnis des weiteren Vorgehens notwendigen Grundlagenkenntnisse. Hierzu gehören Informationen über Stauanlagen und Stauräume sowie die grundlegende Erläuterung der Problematik der Stauraumverlängerung. Weiterhin wird auf Stauraumspülungen als Lösungsansatz für die Verlandung eingegangen.

### **2.1. Stauräume und Stauanlagen**

Zum besseren Verständnis der Problematik ist es zunächst von Bedeutung, die verschiedenen Nutzungen von Stauräumen sowie die Arten und den technischen Aufbau von Talsperren und Reservoirs zu kennen.

#### **2.1.1. Notwendigkeit von Stauanlagen**

Reservoirs dienen zum Ausgleich zeitlicher Schwankungen des Wasserdargebots: Durch Absperrbauwerke kann in Zeiten hohen Abflusses Wasser im Reservoir aufgestaut und gespeichert werden, um es während einer Zeit mit niedrigem Abfluss nutzen zu können (vgl. Annandale 2006). Dieses regulierte Wasserdgebot kann als wirtschaftliches Gut betrachtet werden, dessen Wert in der Zukunft steigen wird. Grund dafür ist der steigende Bedarf an gespeichertem Wasser, der sich aus der zunehmenden Bevölkerungszahl, steigendem Wirtschaftswachstum und damit einhergehendem steigenden Bewässerungsbedarf ergibt (vgl. Morris et al. 1998).

Zudem existiert eine ungleiche Verteilung von Wasser und Bevölkerungswachstum auf der Welt: Starkes Bevölkerungswachstum erfolgt oft in Regionen mit geringem Wasserdgebot wie beispielsweise Nordafrika. Das 21. Jahrhundert wird daher von Wasserknappheit geprägt sein. Reservoirs stellen in vielen Regionen, in denen

## 2. Grundlagen

---

keine Grundwassernutzung erfolgt oder möglich ist, die einzige Komponente der Wasserversorgung dar (vgl. Morris et al. 1998).

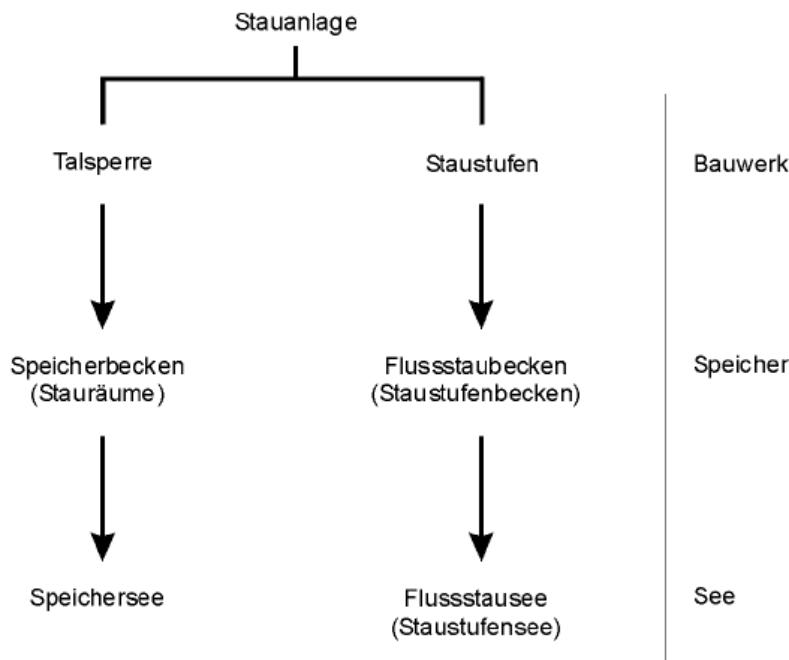
Die folgende Auflistung aus DWA (2006) zeigt die verschiedenen Aufgaben von Stauanlagen. Dabei sind Mehrfachnutzungen die Regel. Nach Morris et al. (1998) ist die Bewässerung der häufigste Nutzungszweck, gefolgt von der Stromerzeugung durch Wasserkraft.

- Bewässerung (Landwirtschaft)
- Stromerzeugung inkl. Pumpspeicherbetrieb
- Hochwasserschutz
- Trinkwasser
- Niedrigwasseraufhöhung (Schifffahrt, Kühlwasser)
- Grundwasseranreicherung
- Sedimentationsbecken (Schwebstoffe, Geschiebeschlämme)
- Aus- und Überleitungen
- Stabilisierung der Gewässersohle (Gefällereduzierung)
- Freizeit, Erholung

### 2.1.2. Arten von Stauanlagen

Nach DWA (2006) und DIN (1987) werden Stauanlagen in Talsperren und Staustufen unterteilt. Zu den Talsperren gehören Dämme und Mauern. Durch Talsperren entstehen Speicherbecken (Stauräume) und Stauteiche. Die Kategorie der Staustufen ist weiter unterteilt in die Bauarten Wehranlagen, Kraftwerke, Schleusen, Stauhaltungsdämme und Deiche. Durch die Staustufen entstehen Flussstaubecken und Flussstauteiche (Staustufenseen), vgl. Abbildung 2.1. Weitere Stauanlagen sind Hochwasserrückhaltebecken, Pumpspeicherbecken und Sedimentationsbecken.

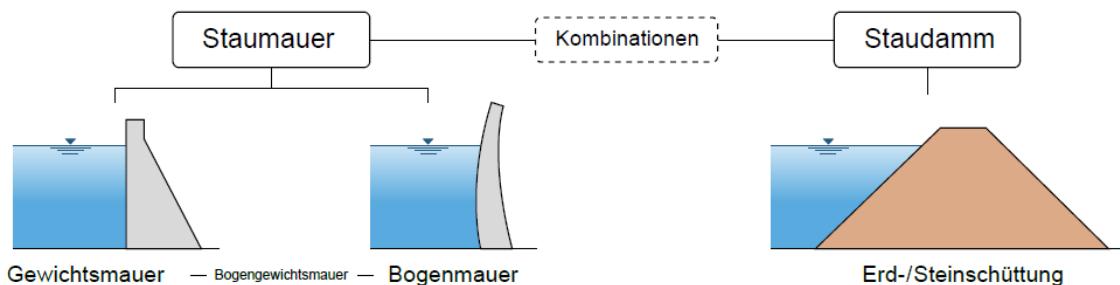
Relevant für diese Arbeit ist die Gruppe der Talsperren. Talsperren verfügen über einen Grundablass, der für Stauraumspülungen notwendig ist. Staustufen



**Abbildung 2.1.:** Systematik von Stauanlagen (DWA 2006)

hingegen besitzen meist keinen Grundablass. Nach DIN (1987) ist eine Talsperre eine „Stauanlage, die über den Querschnitt des Wasserlaufes hinaus den ganzen Talquerschnitt absperrt. Sie besteht in der Regel aus der Hauptsperre [...] mit Speicherbecken und Vorsperren [...] mit Staubecken oder Speicherbecken.“

Talsperren können grundsätzlich in Staumauern aus Beton und Staudämme aus Erdmaterialien unterteilt werden. Mauern werden weiterhin in Schwerkraftmauern und Bogenmauern unterteilt (vgl. Lattermann 2017). Darüber hinaus bestehen auch



**Abbildung 2.2.:** Talsperrenarten (Wiprecht et al. 2014)

Mischformen (vgl. Abbildung 2.2).

### 2.1.3. Technischer Aufbau von Talsperren

In Abbildung 2.3 ist der Aufbau einer Talsperre sowie die Unterteilung des Gesamtstauraums nach DIN (2004) dargestellt. Das Absperrbauwerk verfügt über einen Grundablass, einen Betriebsauslass und eine Hochwasserentlastungsanlage. Der Gesamtstauraum ist unterteilt in den Dauerstauraum, den Hochwasserrückhalterraum sowie den Freiraum. Der Dauerstauraum wiederum besteht aus dem Totraum, dem Reserverraum und dem Betriebsraum.

Die oben genannten Begriffe sind in der DIN 4048-1 wie folgt definiert (vgl. DIN (1987)):

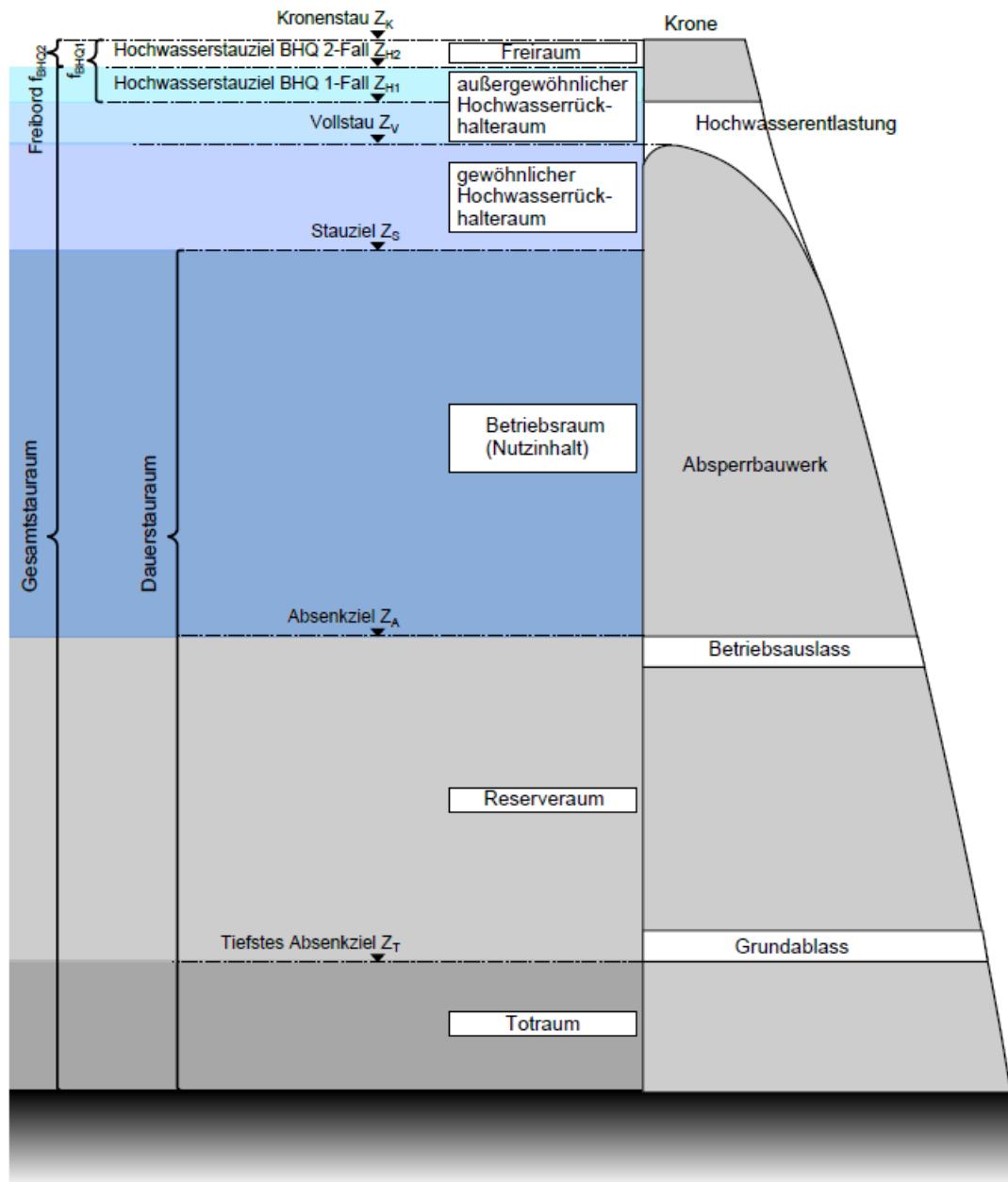
**Grundablass:** Tiefste Entnahmeanlage zum Entleeren des Nutzraumes. Sie werden nach DIN (2004) sowohl für die Entleerung des Speicherbeckens als auch für die Bewirtschaftung der Talsperre eingesetzt. Außerdem können sie zusätzlich zur Hochwasserentlastung beitragen. Die DIN 19700-11 fordert von Talsperren mindestens zwei voneinander unabhängige Grundablässe.

**Betriebsauslass:** Entnahmeanlage zur betrieblichen Nutzung gespeicherten Wassers. Nach DIN (2004) können Betriebsauslässe neben der Abgabe von Wasser für die jeweiligen Nutzungen auch für die geregelte Abgabe von Wasser an das Flussbett genutzt werden.

**Hochwasserentlastungsanlage:** Anlage, die das im Gesamtstauraum nicht speicherbare Wasser schadlos abführt, bestehend aus Einlaufbauwerk, Fortleitungsbauwerk und Energieumwandlungsbauwerk. Speicherbecken von Talsperren mit Zuflüssen müssen nach DIN (2004) zwingend Hochwasserentlastungsanlagen besitzen.

**Dauerstauraum:** Teil des Stauraumes unterhalb des Hochwasserrückhalteraumes bei Hochwasserrückhaltebecken.

**Hochwasserrückhalterraum:** Teil des Nutzraumes, der für die vorübergehende Aufnahme von Hochwasser zur Verfügung steht. Sein Inhalt kann jahreszeitlich variieren.



**Abbildung 2.3.:** Aufbau einer Talsperre und Unterteilung des Stauraums (Wieprecht et al. 2014 nach DIN (2004))

**Freiraum:** Raum zwischen höchstem Stauziel und einer ideellen Ebene in Höhe der Krone des Absperrbauwerks.

**Totraum:** Teil des Stau- oder Speicherraumes unter dem tiefsten Absenkziel, der nicht in freiem Gefälle entleert werden kann.

**Reserverraum:** Teil des Nutzraumes zwischen Absenkziel und tiefstem Absenkziel, Reserve für außergewöhnliche Betriebszustände.

**Betriebsraum:** Teil des Nutzraumes zwischen Stauziel und Absenkziel, der dem Hauptzweck der Stauanlage dient. Sein Inhalt kann jahreszeitlich variieren.

## 2.2. Die Problematik der Stauraumverlandung

Der Begriff der Stauraumverlandung beschreibt die sukzessive Anlagerung der an kommenden Sedimentfracht eines Flusses in Reservoirs (vgl. Dargahi 2012).

Im folgenden Kapitel wird auf die Ursachen, physikalischen Prozesse und Folgen der Stauraumverlandung eingegangen. Zuletzt werden verschiedene Lösungsansätze beschrieben.

### 2.2.1. Ursachen der Stauraumverlandung und Einfluss des Klimawandels

Feststoffe gelangen durch Erosion im Einzugsgebiet in die Flüsse und werden über diese in die Reservoirs transportiert. Für die Erosion im Einzugsgebiet listet DWA (2006) die folgenden Ursachen:

- Witterungsbedingte Erosion von Gestein
- Abtrag von Boden infolge von Niederschlag
- Stürze, Hangrutschungen, Fließbewegungen (schwerkraftbedingter Eintrag)
- Anthropogen bedingte Erosion durch Entfernung der Vegetation für Landwirtschaft, Brachland, Urbanisierung, Skipisten etc.

Wesentlichen Einfluss auf die Erosion haben die Faktoren Witterung, Topografie, Hydrologie, Geologie und Vegetation.

Ein Großteil der Feststoffe in Reservoirs wird während Extremereignissen einge-tragen. Durch den Klimawandel ist in Zukunft mit einer größeren hydrologischen Variabilität zu rechnen, welche auch zu stärkeren Extremereignissen führt, während denen mehr Sedimente erodiert und in Reservoirs abgelagert werden. Der Klima-wandel hat somit einen verstärkenden Einfluss auf die Stauraumverlandung (vgl. Annandale et al. 2016).

### **2.2.2. Physikalische Prozesse während der Stauraumverlandung**

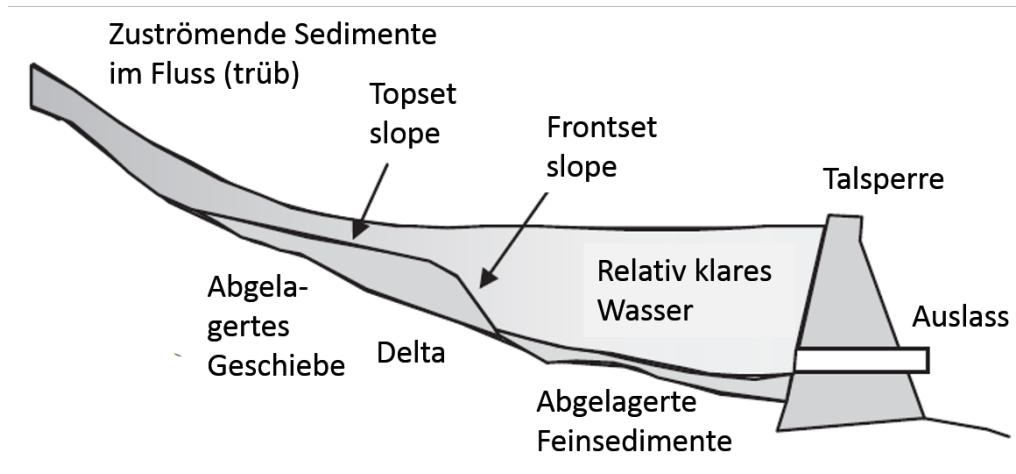
Genau wie Gewässer Wasser, Pflanzen und Lebewesen mit sich führen, führen sie auch Sedimente mit sich. Dabei besteht in einem Gewässer ein natürliches Gleichgewicht zwischen Sedimentation und Erosion von Sedimenten (vgl. Detering et al. 2014). Diese Balance wird jedoch durch den Bau von Talsperren negativ beeinflusst. Talsperren kreieren einen aufgestauten Flussabschnitt, in dem sehr niedrige Fließgeschwindigkeiten vorherrschen. Mit sinkenden Fließgeschwindigkeiten sinkt auch die Transportkapazität des Gewässers. Dies führt zu Sedimentablagerungen im Stauraum (vgl. Morris et al. 1998).

Nach der Erosion im Einzugsgebiet werden Feststoffe als Geschiebe, Schwebstoffe und Schwimmstoffe im Gewässer transportiert. Sedimente, die sich sohnah gleitend, rollend oder springend fortbewegen, werden als Geschiebe bezeichnet. Schwebstoffe dagegen werden durch Turbulenz in Schwebe gehalten und so verteilt über die gesamte Tiefe des Gewässers transportiert. Als Schwimmstoffe werden alle Feststoffe bezeichnet, die an der Wasseroberfläche transportiert werden. Der überwiegende Teil der Feststoffe in Gewässern wird als Schwebstoffe transportiert (vgl. Maniak 2016). Dies wirkt sich auch auf die im Folgenden beschriebenen Ablagerungsprozesse in Reservoirs aus.

Im Gegensatz zu natürlichen Seen besitzen Stauteen ihren tiefsten Punkt in der Regel nahe des Grundablasses. Der Prozess der Ablagerung von Sedimenten in Stauräumen wird beschrieben durch den Zusammenhang von Abfluss, Fließgeschwin-digkeit, Sohlschubspannung, Korndurchmesser und Sinkgeschwindigkeit der Feststoffe. Das Ablagerungsschema ist darüber hinaus abhängig von der Art und Zusammenset-

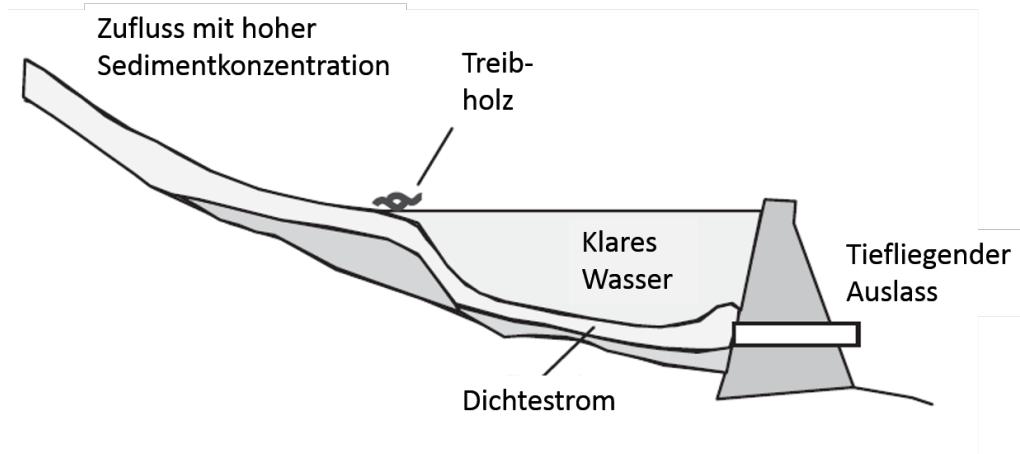
zung der Sedimente, dem Abflussregime und dessen Regelung, der Geometrie des Stauraums sowie dessen Bewirtschaftung (vgl. DWA 2006).

Nach Annandale (2006) setzen sich die größeren Partikel aufgrund ihrer höheren Sinkgeschwindigkeit bei größerem Korndurchmesser zuerst ab und bilden ein Delta am oberstromigen Ende des Reservoirs. Das Delta wächst mit der Zeit sowohl nach oberstrom als auch weiter in das Reservoir hinein (vgl. Mahmood 1987). Kleinere Partikel werden weiter nach unterstrom transportiert und können zum Teil bis zur Talsperre getragen werden. Abbildung 2.4 zeigt das charakteristische Ablagerungsschema von Sedimenten in Reservoirs mit der oberen, flacheren „Topset Slope“ und der steileren „Frontset Slope“, die sich am Ende des Deltas aus größeren Sedimenten ausbildet (vgl. Annandale 2006).



**Abbildung 2.4.:** Ablagerungsschema von Sedimenten in Reservoirs nach Annandale (2006)

Neben dem konventionellen Transport von Sedimenten, bei dem die Turbulenz im Wasser das Geschiebe und die Schwebstoffe befördert, können Sedimente in Reservoirs auch durch Dichteströmungen transportiert werden. Dabei weist das in ein Reservoir gespülte Sediment-Wasser-Gemisch eine deutlich höhere Dichte als das klare Wasser des Reservoirs auf. Infolge dessen sinkt das Gemisch beim Eintreten in das Reservoir auf den Grund ab und bewegt sich dort bis zu mehrere Kilometer weit fort (vgl. Abbildung 2.5). Dichteströme beinhalten in der Regel feine bis sehr feine Sedimente (vgl. Annandale et al. 2016).



**Abbildung 2.5.:** Dichtestrome in Reservoirs nach Annandale 2006

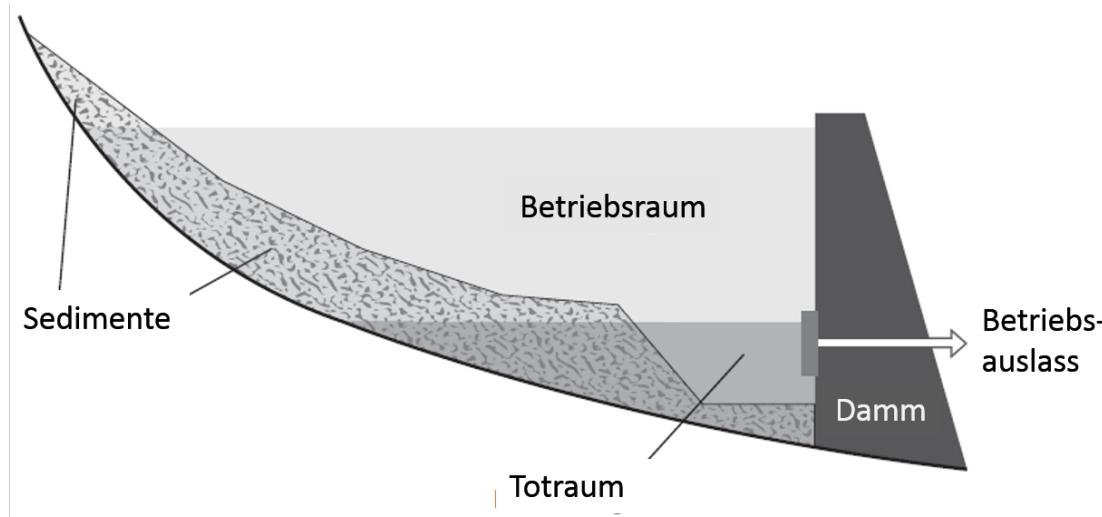
Nicht alle Sedimente werden in Reservoirs abgelagert. Ein Teil der Feststoffe, vor allem Schwebstoffe, werden bei geöffneten Betriebs- oder Grundablässen direkt durch den Stauraum gespült.

### 2.2.3. Folgen der Stauraumverlandung

Die Stauraumverlandung bringt einige, meist negative Folgen mit sich. Sie können nach DWA (2006) in Probleme oberstrom des Stauraums, Probleme im Stauraum und Probleme unterstrom des Stauraums unterteilt werden:

Oberstroms des Stauraums kann es durch die Deltabildung infolge der Ablagerung grober Sedimente zur Anhebung des Grundwasserspiegels kommen. Darüber hinaus steigt die Hochwassergefahr oberhalb des Stauraums. Grund dafür ist die Ablagerung von Sedimenten oberhalb des Hochwasserlevels, welche aus dem Aufstau des Wassers beim Einfließen in das Reservoir resultiert. Die Ablagerung von Sedimenten oberhalb des Reservoirs führt zu einer geringeren Abflusskapazität des Flusses und somit zu höheren Hochwasserständen (vgl. Annandale et al. 2016).

Im Stauraum selbst kommt es zur Reduzierung des Hochwasserrückhalteraums und infolge dessen ebenfalls zur Erhöhung der Hochwassergefahr unterstrom des Speichers, da im Hochwasserfall weniger Wasser zurückgehalten werden kann (vgl. Annandale 2006). Weiterhin kommt es durch die Verlandung zum Verlust eines Teils des Totraums und des Betriebsraums (vgl. Abbildung 2.6). Stauraumverluste im



**Abbildung 2.6.:** Verlust von Totraum und Betriebsraum nach Annandale et al. (2016)

Totraum haben keine unmittelbar negativen Folgen. Die Verluste im Betriebsraum beeinträchtigen jedoch die Nutzungen des Speichers, die in Kapitel 2.1.1 aufgeführt sind: Bei Nutzung des Speichers zur Produktion von Strom aus Wasserkraft geht mit zunehmendem Betriebsraumverlust eine sinkende Stromproduktion einher. Außerdem kommt es zu häufigeren Maschinenwartungen, da Abrasion durch harte Mineralanteile die Turbinen beschädigt. Wird der Speicher für die Wasserversorgung genutzt, so kann aufgrund des geringeren Stauraums weniger Wasser gespeichert werden. Somit besteht die Gefahr, dass in Zeiten hohen Bedarfs nicht genug Wasser zur Verfügung steht, z.B. für die Bewässerung oder die Bereitstellung von Trinkwasser (vgl. Annandale et al. 2016). Bei fortgeschrittener Verlandung kann es zur Beeinflussung der Entnahmemöglichkeit (Grundablass oder Betriebsauslass) in Form einer Blockade durch Sedimente kommen. Dann ist eine Entnahme von Wasser zunächst nicht mehr möglich. Weitere negative Folgen der Verlandung im Stauraum sind die mögliche Verschlechterung der Wasserqualität durch Akkumulation von Schadstoffen im Sediment, die Störung der Schiffahrt und Verlandung von Häfen, sowie die eingeschränkte Freizeitnutzung (vgl. DWA 2006). Je nach Ausmaß der Verlandung und Abhängigkeit von der Nutzung des Stauraums haben diese Beeinträchtigungen negative Folgen für die Gesundheit (z.B. durch Trinkwassermangel), die Wirtschaftskraft (z.B. weniger

Stromproduktion oder landwirtschaftliche Produktion) und den Lebensstandard der Bevölkerung in der Region (vgl. Annandale 2006).

Unterstrom der Talsperre steht das Gewässer unter dem Einfluss eines Feststoffdefizits. Infolge dessen kommt es zur Erosion der Sohle oder der Uferbänke, je nach kritischer Sohlschubspannung (vgl. Annandale 2006). Die Eintiefung der Sohle führt zu einem geringeren Wasserverstand im Fluss und somit zur Absenkung des Grundwassers. Darüber hinaus können Standsicherheitsprobleme an den Ufern (aufgrund erhöhter Erosionsgefahr) sowie an Bauwerken wie Brücken (durch die Gefahr der Auskolkung von Pfeilern) auftreten (vgl. DWA 2006). Hinzu kommt die Beeinflussung der aquatischen Ökosysteme: Feinsedimente enthalten normalerweise wichtige Nährstoffe für Fische. Da diese jedoch im Reservoir zurückgehalten werden, fehlen sie unterstrom und gefährden dort wertvolle Habitate. Außerdem kommt es zur Degradierung von Habitaten und Laichplätzen durch die verstärkte Erosion (vgl. Annandale 2006). Das Feststoffdefizit unterhalb von Talsperren kann zudem auf einer größeren Skala betrachtet in Mündungsbereichen von Flüssen zur Delta- und Stranderosion führen (vgl. DWA 2006).

### 2.2.4. Maßnahmen gegen die Stauraumverlandung

Abbildung 2.7 zeigt eine Übersicht von Maßnahmen gegen die Stauraumverlandung nach Kondolf et al. (2014). Grundsätzlich können hierbei drei verschiedene Ansätze unterschieden werden: Die Reduktion des Sedimenteintrags aus dem Einzugsgebiet, die Minimierung von Sedimentablagerungen im Stauraum sowie die Vergrößerung oder Wiederherstellung des Stauvolumens.

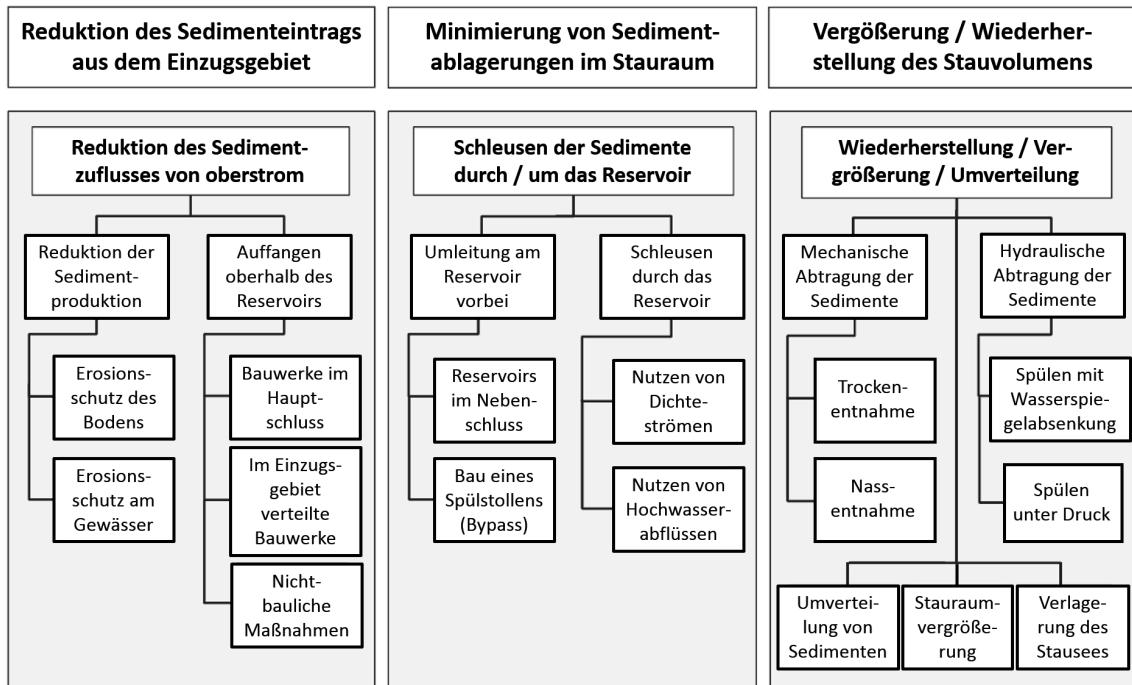
**Reduktion des Sedimenteintrags aus dem Einzugsgebiet** Ziel dieses Ansatzes ist die Reduktion der Menge an Sedimenten, die von oberstrom in das Reservoir transportiert werden.

Eine Möglichkeit ist die Verringerung der Sedimentproduktion im Einzugsgebiet. Hierzu gehören Erosionsschutzmaßnahmen des Bodens wie z.B. Bepflanzungen, Aufforstungen und Hangstabilisierungen sowie Erosionsschutzmaßnahmen am Gewässer wie Gewässerverbauungen und Sohlstabilisierungen (vgl. DWA 2006).

Eine weitere Möglichkeit ist das Auffangen von Sedimenten oberhalb des Reservoirs.

## 2. Grundlagen

---



**Abbildung 2.7.:** Maßnahmen gegen die Stauraumverlandung nach Kondolf et al. (2014)

Hierzu gehören Bauwerke im Hauptschluss oberhalb des Reservoirs. Dabei handelt es sich um Vorsperren im Deltabereich, die als Geschieberückhalt dienen, und um Sedimentationsbecken, in denen sich neben dem Geschiebe auch feineres Material absetzen kann. Diese müssen jedoch regelmäßig geräumt oder über einen Bypass am Reservoir vorbei gespült werden. Ein Großteil des Geschiebes kann auch über mehrere, im Einzugsgebiet verteilte Bauwerke zurückgehalten werden. Dabei handelt es sich um kleinere Geschieberückhaltebecken in Gebirgsbächen und Zuflüssen (vgl. DWA 2006). Nicht-bauliche Maßnahmen beinhalten zum Beispiel das „Warping“, bei dem landwirtschaftliche Flächen gezielt mit sedimenthaltigem Wasser geflutet werden, was einer Düngung des Bodens gleichkommt (vgl. Kondolf et al. 2014).

**Minimierung von Sedimentablagerungen im Stauraum** Um die Ablagerungen im Stauraum möglichst klein zu halten, wird die zeitliche Variabilität des Sedimentzuflusses genutzt, um sedimentreichen Abfluss (z.B. während Hochwassereignissen) am Reservoir vorbei oder durch das Reservoir hindurch zu schleusen.

Eine Umleitung der Sedimente am Reservoir vorbei kann auf zwei Arten realisiert werden: Zum einen kann ein Spülstollen (Bypass) gebaut werden, durch den die Feststoffe (v.a. Schwebstoffe) am Reservoir vorbei gespült werden und unten dem natürlichen Flusslauf wieder zugegeben werden. Zum anderen ist es möglich, das Reservoir nicht im Hauptschluss, sondern im Nebenschluss eines Flusslaufs zu errichten. Die Befüllung erfolgt über einen Einlauf und ist so geregelt, dass nur sedimentarmes Wasser in das Reservoir strömt (vgl. DWA 2006).

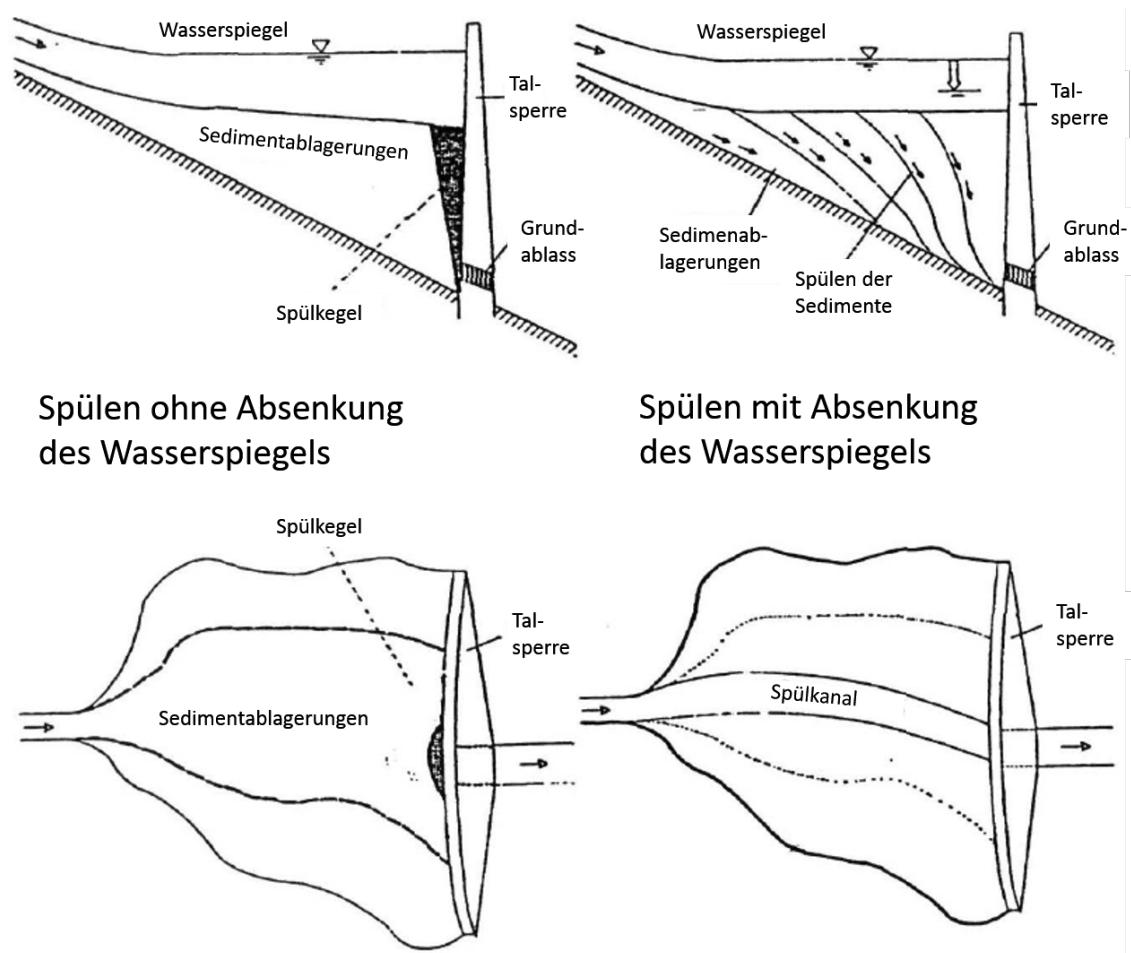
Für eine Durchschleusung der Sedimente können Dichtestrome oder Hochwasserabflüsse herangezogen werden. Durch Öffnen der Auslässe beim Auftreten eines Dichtestroms kann ein Großteil der transportierten Sedimente durch das Reservoir hindurch geschleust werden. Dasselbe Prinzip wird im Hochwasserfall angewendet, allerdings wird hierbei der Wasserspiegel teilweise abgesenkt, um höhere Geschwindigkeiten zu erzielen und somit den Sedimentrückhalt möglichst gering zu halten. Darüber hinaus sind in manchen Regionen saisonale Absenkungen in Zeiten hohen Sedimenteintrags sinnvoll (vgl. DWA 2006 und Morris et al. 1998).

**Vergrößerung und Wiederherstellung des Stauvolumens** Die hier genannten Maßnahmen sind reaktiv und dienen der teilweisen Wiederherstellung des durch Verlandung verlorengegangenen Stauraums. Hierzu bestehen die Möglichkeiten der mechanischen oder hydraulischen Abtragung der Sedimente. Unter der hydraulischen Abtragung versteht man Stauraumspülungen, auf die in Kapitel 2.3 genauer eingegangen wird. Bei der mechanischen Abtragung unterscheidet man zwischen Trockenentnahme mit einhergehender Entleerung des Stauraums und Nassentnahme mit Saugbaggern oder mechanischen Baggern auf Schiffen ohne Stauraumentleerung. Weitere Möglichkeiten sind die Umverteilung von Sedimenten, die Vergrößerung des Stauraums z.B. durch Erhöhung der Talsperre oder die Verlagerung des Stausees.

## 2.3. Stauraumspülungen

Unter Stauraumspülungen versteht man eine Technik, bei der die Fließgeschwindigkeiten im Reservoir so stark erhöht werden, dass dort abgelagerte Sedimente mobilisiert und durch Auslässe in der Talsperre gespült werden (vgl. Annandale 2006). Stau-

raumspülungen sind ein Mittel zur teilweisen Wiederherstellung des Stauvolumens in Reservoirs. Nach Kondolf et al. (2014) kann zwischen dem Spülen mit vollständiger Absenkung des Wasserspiegels (Drawdown Flushing) und Spülen ohne Absenkung des Wasserspiegels (Pressure Flushing) unterschieden werden. Abbildung 2.8 zeigt einen Vergleich der beiden Arten. Darüber hinaus sind Spülungen mit partiellem Abstau möglich.



**Abbildung 2.8.:** Stauraumspülungen ohne Absenkung und mit vollständiger Absenkung des Wasserspiegels nach Wen Shen (1999)

### 2.3.1. Spülen mit vollständiger Absenkung des Wasserspiegels

Bei dieser Art von Stauraumspülungen erfolgt eine komplette Entleerung des Reservoirs über tiefliegende Grundablässe. Der Wasserspiegel wird dabei so weit abgesenkt, dass es zum freiem Abfluss durch den Auslass und somit zu einer flussähnlichen Strömung im Reservoir kommt. Die dadurch erreichten hohen Fließgeschwindigkeiten führen zur Mobilisierung und zum Transport der im Reservoir abgelagerten Feinsedimente (vgl. Kondolf et al. 2014). Im Reservoir bildet sich ein Spülkanal aus, in dem rückschreitende Erosion Richtung oberstrom stattfindet (vgl. Abbildung 2.8). Der Spülkanal ist jedoch in seiner Breite begrenzt, sodass nur ein Teil der Sedimente aus dem Reservoir gespült werden kann.

Die DWA (2006) listet die Kriterien für eine erfolgreiche Stauraumspülung nach White (2001), die hier noch durch Angaben von Kondolf et al. (2014) ergänzt werden. Hierzu gehören die Einhaltung der flussähnlichen Zustände über einen ausreichend langen Zeitraum, um die gewünschte Menge an Sedimenten spülen zu können. Dazu müssen eine ausreichende Wassermenge zur Verfügung stehen und tiefliegende Auslässe im Damm vorhanden sein. Diese sollen ausreichend dimensioniert sein, um den zur Spülung notwendigen Abfluss ohne oberstromigen Aufstau abführen zu können. Der Wasserspiegel soll dabei stets unter der Oberkante der Schützöffnung liegen, sodass ein freier Abfluss vorherrscht (vgl. Kondolf et al. 2014). Die Mobilisierung der Sedimente muss gewährleistet sein. Die kritische Schubspannung zum Transportbeginn ist daher vorher zu ermitteln und der Abfluss entsprechend zu dimensionieren. Eine entscheidende Rolle spielt darüber hinaus die Geometrie des Stauraums: Aufgrund der Ausbildung des Spülkanals mit begrenzter Breite eignen sich lange, schmale Stauräume mit steilen Flanken und einem großen Sohlgefälle am besten für Spülungen mit vollständiger Absenkung des Wasserspiegels. Mit der Spülung soll eine Verlängerung der Nutzungszeit von mehr als einem Drittel der ursprünglichen Nutzungszeit erreicht werden. Nach Kondolf et al. (2014) soll außerdem das Speichervolumen nicht größer als 4 % des jährlichen Zuflusses sein, da eine Absenkung sonst nur schwer realisierbar ist. Kleine Stauräume eignen sich somit besser für Spülungen als große.

Während mit einer gut geplanten und ausgeführten Spülung die Nutzungsdauer des Stauraums verlängert werden kann, bringen Spülungen mit vollständiger Absenkung

des Wasserspiegels auch negative Folgen mit sich. Einige davon sind in DWA (2006) gelistet. Dazu gehören vor allem lokale Auflandungen und flächenhafte Ablagerungen bei einer Stauraumspülung während geringem Abfluss. Durch die geringe Transportkapazität werden die ausgespülten Feinsedimente nicht weiter nach unterstrom transportiert, sondern lagern sich unmittelbar hinter der Talsperre ab (vgl. Kondolf et al. 2014). Dadurch kommt es zur Überdeckung von Benthos und Laichgebieten und infolge dessen zur Schädigung und zum Absterben aquatischer Organismen, speziell von Fischen. Weitere Folgen der Auflandungen unterhalb der Talsperre sind die Reduzierung der Hochwassersicherheit, Behinderung der Schifffahrt, Verlegung von Ausleitungen sowie die Beeinträchtigung von Wasserfassungen. Darüber hinaus kann es durch Spülungen zu erhöhtem Abrieb von Turbinen und Verschlüssen kommen. Zudem müssen Stauräume unterhalb des zu spülenden Stauraums in Betracht gezogen werden. Ein ganzheitliches Spülungskonzept (Kaskadenspülung) für mehrere aufeinanderfolgende Stauräume ist anzustreben, um die Sedimente nicht nur von einem Stauraum in den nächsten zu spülen.

Insgesamt ist eine Spülung bei Hochwasserabfluss zu bevorzugen, da zum einen mehr abgelagerte Sedimente aufgrund der größeren Transportkapazität des Wassers gespült werden können. Zum anderen wird ein Teil der ankommenden Sedimente aus dem Hochwasser dann direkt durch den Stauraum gespült, ohne sich dort abzulagern. Somit besteht die Möglichkeit, auch grobkörniges Material zu spülen. Allerdings müssen die tiefliegenden Verschlüsse hierzu ausreichend dimensioniert sein. Weiterhin sind mehrere kleine Spülungen aus den o.g. ökologischen Gründen einer großen Spülung vorzuziehen (vgl. Kondolf et al. 2014).

### **2.3.2. Spülen ohne Absenkung des Wasserspiegels**

Der Wasserspiegel im Reservoir wird bei dieser Art von Stauraumspülungen nicht abgesenkt. Die Auslässe werden geöffnet und es kommt zu einer Spülung unter Druck. Man spricht daher auch von „Pressure Flushing“. Bei der Spülung ohne Absenkung des Wasserspiegels können deutlich weniger Sedimente aus dem Stauraum gespült werden als bei einer Spülung mit Absenkung des Wasserspiegels. Lediglich die Sedimente unmittelbar oberhalb des Auslasses werden mobilisiert und ausgespült. Dabei entsteht ein sogenannter Spülkegel um den Auslass. Dieser ist in Abbildung

2.8 zu sehen.

Ziele der Stauraumspülungen ohne Absenkung des Wasserspiegels sind der Erhalt der Betriebsfähigkeit des Auslasses sowie die Reduktion der Sedimentkonzentrationen im Turbineneinlauf und damit die Reduktion der Abrasion hydraulischer Strukturen.

### **2.3.3. Spülen mit partiellem Abstau**

Der Wasserspiegel im Reservoir wird bei dieser Art von Spülung nur teilweise abgesenkt. Dies ist z.B. der Fall, wenn der Zufluss zum Reservoir während der Spülung viel geringer ist als der Abfluss. Es stellt sich jedoch niemals ein Freispiegel-Abfluss ein, sondern die Spülung erfolgt auch in diesem Fall jederzeit unter Druck. Dadurch entsteht bei einer Spülung mit partiellem Abstau ebenfalls ein Spülkegel um den geöffneten Auslass herum.



## **3. Physikalischer Modellversuch zur Bestimmung des Spülkegels**

In diesem Kapitel werden zunächst einige grundlegende Informationen zu physikalischen Modellversuchen dargelegt. Anschließend wird der physikalische Modellversuch beschrieben, der den numerischen Modellierungen dieser Arbeit zugrunde liegt. Die Durchführung des Versuchs erfolgt im wasserbaulichen Labor der Technisch-Naturwissenschaftlichen Universität Norwegens (NTNU) in Trondheim. Der Versuch ist Teil eines Projekts mit dem Ziel der Generierung von Wissen über Sedimentationsprozesse in Stauräumen mit hohem Sedimenteneintrag (vgl. Ermilov 2018).

### **3.1. Allgemeines**

Ein physikalisches Modell ist eine skalierte Repräsentation einer realen hydraulischen Strömungssituation. Die Randbedingungen, die oberstromigen Strömungsbedingungen und das Strömungsfeld müssen dabei in angemessener Weise skaliert werden (vgl. Chanson 2004).

Physikalische Modelle werden benötigt, um komplexe Strömungsvorgänge, die nicht analytisch beschreibbar sind, zu veranschaulichen. Dazu gehören instationäre, turbulente Fließvorgänge in natürlichen Gerinnen und an Bauwerken sowie die Interaktion zwischen Strömung und der beweglichen Gewässersohle. Darüber hinaus werden sie für Fälle verwendet, bei denen eine intuitive physikalische Veranschaulichung des Systems benötigt wird (vgl. Morris et al. 1998). Während reale Strömungen komplex sind, sind die numerischen Berechnungsansätze (vgl. Kapitel 4) vereinfacht und beinhalten empirische Beiwerte.

Physikalische Modellversuche eignen sich besonders für Probleme mit komplexer Geometrie und morphologische Betrachtungen, die zu einem sowohl in transversaler als auch in longitudinaler Richtung variierenden Ablagerungsschema führen. Probleme

dieser Art beinhalten z.B. den Entwurf von Schützen und tiefliegenden Auslässen für Stauraumspülungen, die Betrachtung von Kolken und Ablagerungsschemata an Bauwerken sowie Erosions- und Sedimentationsprozesse in Kanälen (vgl. Morris et al. 1998).

Physikalische Modellversuche werden im Labor durchgeführt. Sie sind daher begrenzt durch den Zeitaufwand, die entstehenden Kosten und den zur Verfügung stehenden Platz im Labor. Physikalische Modelle können nur schwer transportiert oder reproduziert werden. Eine Vorhaltung des Modells über einen langen Zeitraum belegt Platz im Labor, der für andere Modelle benötigt wird (vgl. Morris et al. 1998).

Physikalische Modellversuche streben die vollständige mechanische Ähnlichkeit zwischen Modell und Natur an. Die vollständige Ähnlichkeit setzt geometrische, kinematische und dynamische Ähnlichkeit voraus. Die geometrische Ähnlichkeit besagt, dass alle Strecken in Natur und Modell im konstanten Verhältnis zueinander stehen. Dieses Verhältnis wird als Maßstabszahl bezeichnet. Als kinematische Ähnlichkeit bezeichnet man konstante Verhältnisse der Geschwindigkeiten zwischen Natur und Modell. Unter dynamischer Ähnlichkeit versteht man, dass die sich in Natur und Modell entsprechenden Kräfte stets im gleichen Verhältnis zueinander stehen (vgl. Chanson 2004). Jedoch ist ein skaliertes Modell nicht in der Lage, vollständige dynamische Ähnlichkeit zu repräsentieren. Die Verhältnisse der Kräfte können nicht beibehalten werden, wenn die physikalischen Dimensionen skaliert werden. Somit wird bei Modellversuchen stattdessen die angenäherte dynamische Ähnlichkeit angestrebt. Dabei werden nur die dominierenden Kräfte berücksichtigt (vgl. Morris et al. 1998). Deren Verhältnis zueinander kann durch eine dimensionslose Kennzahl dargestellt werden. Dies bezeichnet man als Modellgesetz. Für alle Fließvorgänge mit freiem Wasserspiegel sind die Schwerkraft und die Trägheitskraft die beiden dominierenden Kräfte. Die dimensionslose Kennzahl, die das Verhältnis dieser beiden Kräfte beschreibt, ist die Froude-Zahl (vgl. Chanson 2004):

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot l}} \quad (3.1)$$

Dabei ist  $U$  die Fließgeschwindigkeit,  $g$  die Gravitationskonstante und  $l$  eine charakteristische Länge. Zur Einhaltung des Froude'schen Modellgesetzes muss die Froude-Zahl des Modells der Froude-Zahl in der Natur entsprechen. Der in dieser

Arbeit modellierte Laborversuch entspricht dem Froude'schen Modellgesetz.

Eine Schwierigkeit bei physikalischen Modellversuchen stellt die Skalierung der Sedimente dar. Zur Einhaltung der geometrischen Ähnlichkeit müssen in Modellversuchen Sedimente mit einer geringeren Korngröße verwendet werden. Jedoch werden die Transportprozesse von Feinsedimenten wie Ton und Schluff durch andere physikalische Gesetze (z.B. das Auftreten kohäsiver Kräfte oder Schwebstofftransport anstelle von Geschiebetransport) beschrieben als der Transport von größeren Sedimenten (vgl. Kapitel 4.3). Physikalische Modelle sind nicht in der Lage, das Verhalten von kohäsiven Sedimenten akkurat zu skalieren. Für die Sedimente in Laborversuchen werden anstelle von natürlichen Materialien oft künstliche Ersatzmaterialien mit geringerer Dichte verwendet (vgl. Morris et al. 1998).

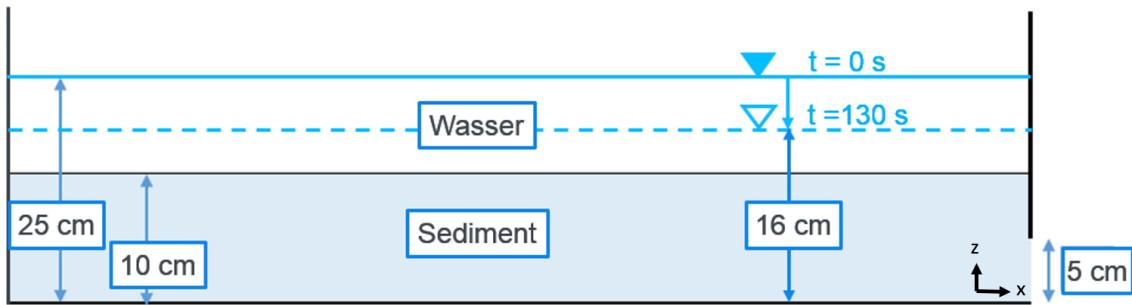
## 3.2. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus einem gläsernen Kanal mit horizontaler Sohle und einem eingebauten Schütz. Oberstrom des Schützes ist der Kanal 8 m lang, unterhalb des Schützes 4 m. Die lichte Breite des Kanals beträgt 61 cm. Das Schütz ist mittig im Kanal eingebaut und ist 5 cm breit. Zu Beginn des Versuchs ist der Kanal oberhalb des Schützes mit Wasser gefüllt. Dabei beträgt der Wasserstand 25 cm. Außerdem ist eine Sedimentschicht mit einer Stärke von 10 cm eingebracht und das Schütz geschlossen.

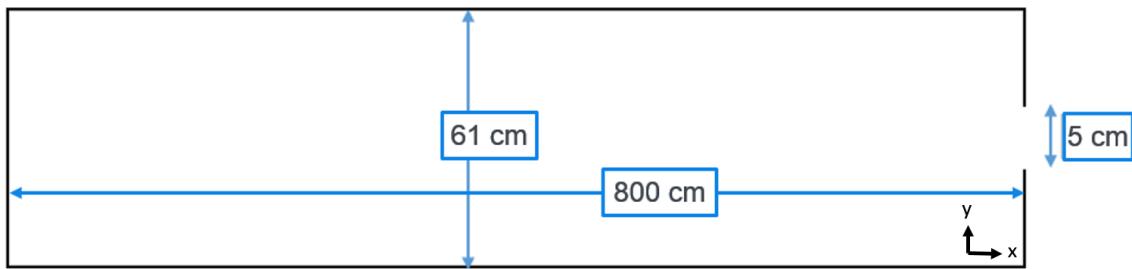
Der Versuch beginnt mit dem abrupten Öffnen des Schützes bis zu einer Durchflusshöhe von 5 cm. Da von oberstrom kein Zufluss erfolgt, sinkt der Wasserstand während des Spülvorgangs von 25 cm auf 16 cm ab. Der Abfluss durch das Schütz ist dabei abhängig vom jeweiligen Wasserstand. Die Spüldauer beträgt 130 s. Währenddessen wird ein Teil der Sedimentschicht erodiert und durch das Schütz gespült, sodass sich ein Spülkegel ausbildet. Der mit dem Laborversuch modellierte Spülvorgang entspricht somit einer Reservoirspülung mit partiellem Abstau (vgl. Kapitel 2.3.3). Die Abbildungen 3.1 und 3.2 zeigen einen schematischen Längsschnitt und einen schematischen Grundriss des physikalischen Modellversuchs.

### 3. Physikalischer Modellversuch zur Bestimmung des Spülkegels

---



**Abbildung 3.1.:** Schematischer Längsschnitt des physikalischen Modellversuchs



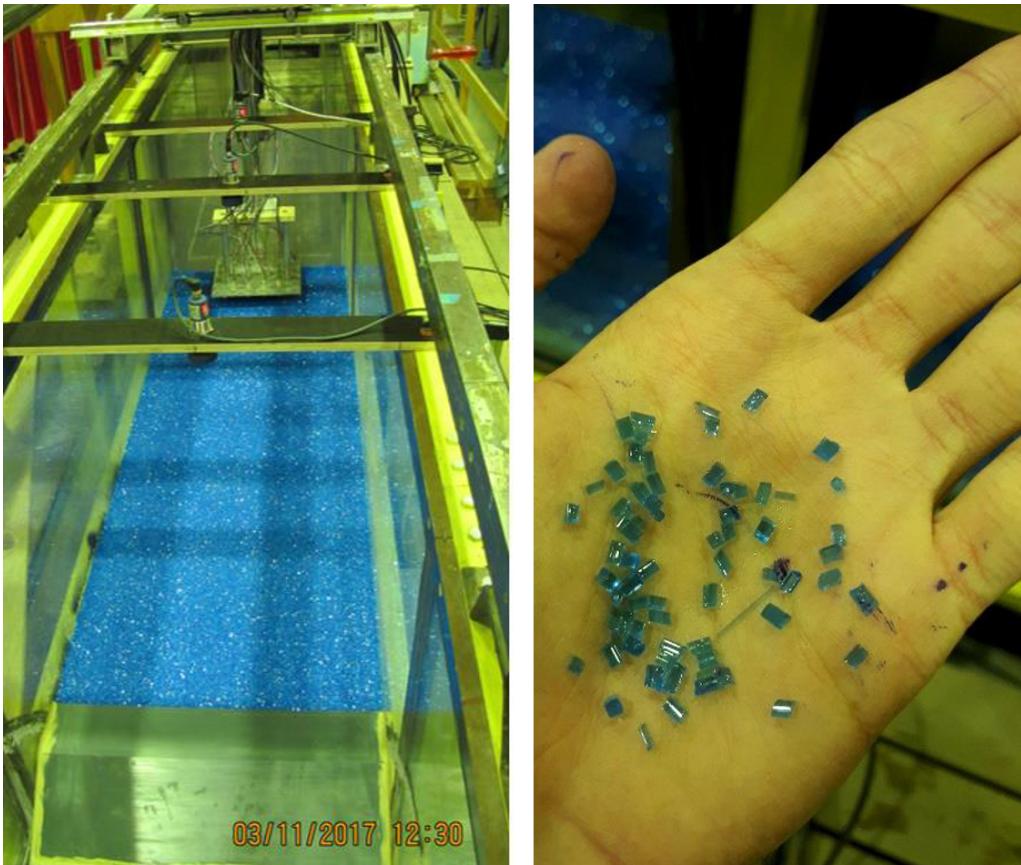
**Abbildung 3.2.:** Schematischer Grundriss des physikalischen Modellversuchs

## 3.3. Verwendetes Material

Für den Versuch wird ein blaues, granulatartiges Material als Sediment verwendet. Der Aufbau in der Versuchshalle sowie das verwendete Material sind anhand von Abbildung 3.3 zu erkennen. Die Materialparameter sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Die Werte des charakteristischen Korndurchmessers, der Trockendichte und des Reibungswinkels entsprechen den Angaben der NTNU.

**Tabelle 3.1.:** Materialparameter des physikalischen Modellversuchs

Materialparameter	Formelzeichen	Wert
Charakteristischer Korndurchmesser	$d_{ch}$	2,4 mm
Partikeldichte	$\rho_s$	1,18 kg/l
Reibungswinkel (trocken)	$\varphi$	30°
Sinkgeschwindigkeit	$v_s$	$5,65 \cdot 10^{-4}$ m/s



**Abbildung 3.3.:** Aufbau und Material des physikalischen Laborversuchs (Ermilov 2018)

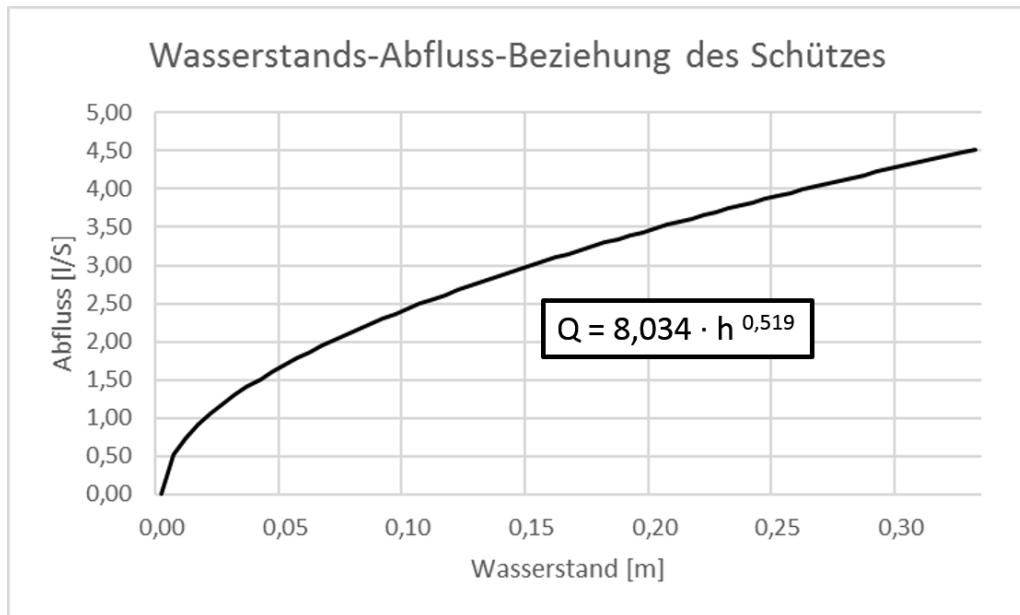
Die Sinkgeschwindigkeit wird über das Gesetz von Stoke berechnet (vgl. Morris et al. 1998). Dabei wird die Reibungskraft mit der Gewichtskraft des Sedimentkorns unter Wasser gleichgesetzt und die Gleichung nach der Sinkgeschwindigkeit aufgelöst:

$$F_R = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot \frac{d_{ch}}{2} \cdot v_s = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{ch}}{2}\right)^3 \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot g = F_G \quad (3.2)$$

Dabei ist  $v_s$  die Sinkgeschwindigkeit eines Sedimentpartikels,  $\rho_s$  die Trockendichte des verwendeten Materials und  $d_{ch}$  der charakteristische Korndurchmesser. Diese Werte können Tabelle 3.1 entnommen werden.  $\eta$  beschreibt die dynamische Viskosität des Wassers (1,0 mPa·s),  $\rho_w$  die Dichte des Wassers (1000 kg/m<sup>3</sup>) und  $g$  die Gravitationskonstante (9,81 m/s<sup>2</sup>).

### 3.4. Messkonzept und Ergebnisse

Zur Messung des Wasserstands werden drei Ultraschall-Sensoren verwendet. Somit steht der zeitlich variierende Verlauf des Wasserspiegels oberhalb des Schützes als Datenreihe zur Verfügung. Die Absenkung erfolgt näherungsweise linear von 25 cm auf 16 cm. Weiterhin steht die Wasserstands-Abfluss-Beziehung des Schützes zur Verfügung. Diese ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

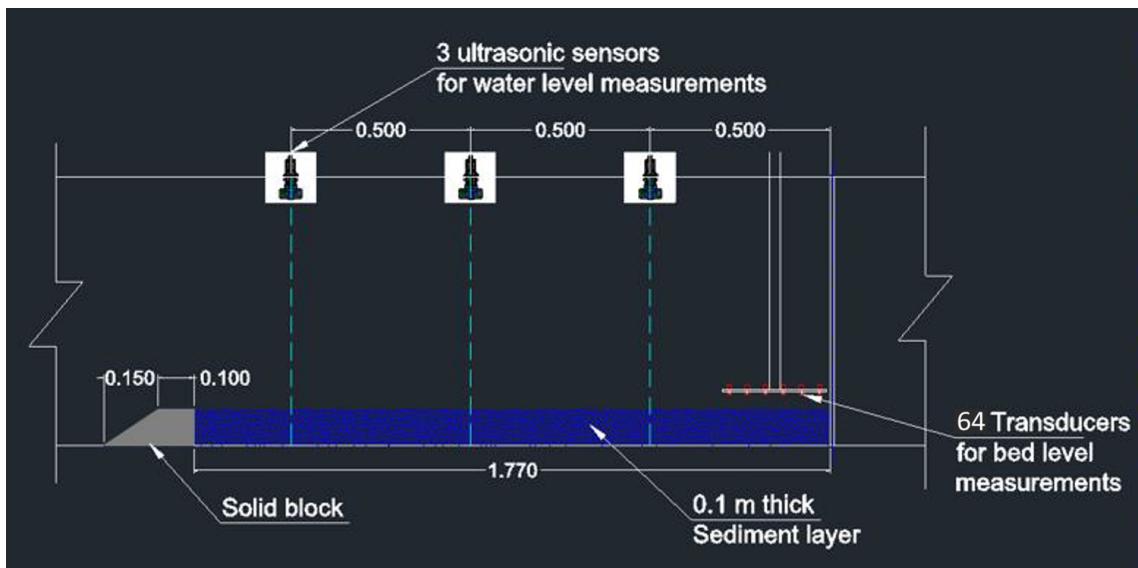


**Abbildung 3.4.:** Wasserstands-Abfluss-Beziehung des Schützes im physikalischen Modellversuch

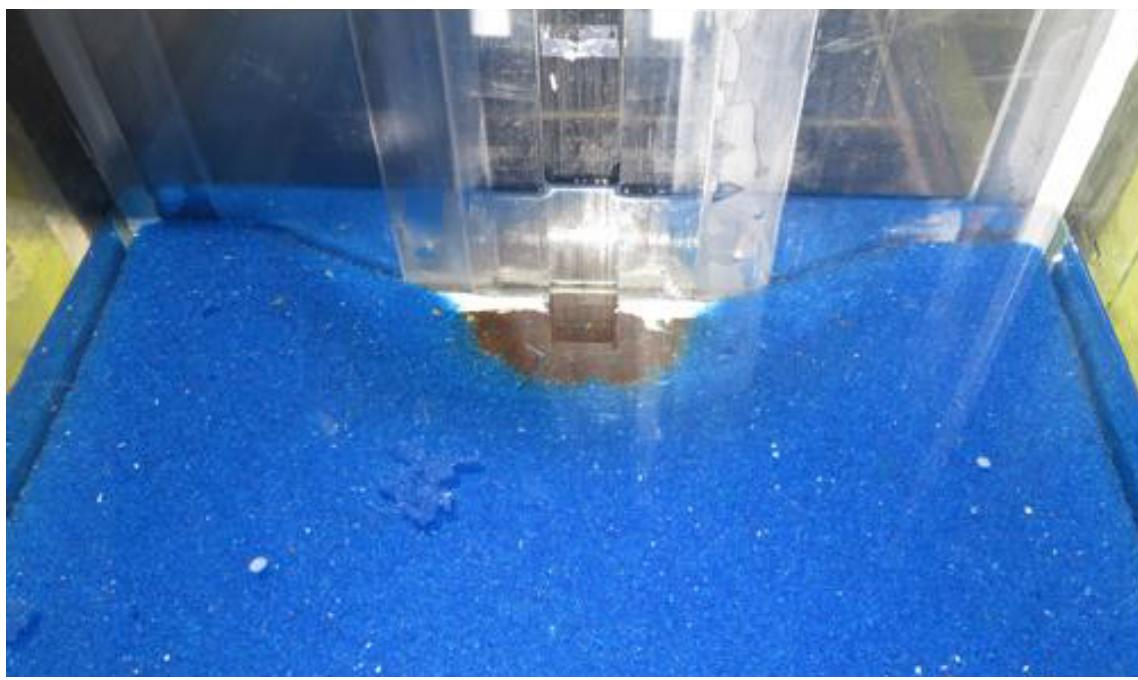
Zur Messung des Sohlneivaus nach dem Ende der Spülung werden 64 Sensoren verwendet. Sie sind in sechs Profilen im Abstand von 2 cm, 7 cm, 12 cm, 17 cm, 22 cm und 27 cm vor dem Schütz angeordnet. Ein Profil besteht in der Regel aus zwölf Messpunkten im Abstand von 5 cm. Die beiden Profile bei 22 cm und 27 cm vor dem Schütz verfügen über lediglich acht Messpunkte. Abbildung 3.5 zeigt das Messkonzept des physikalischen Modellversuchs aus Ermilov (2018). Die Darstellung des Metallblocks ist hierbei nicht korrekt. Stattdessen ist die komplette Sohle des Kanals oberstrom des Schützes mit der Sedimentschicht bedeckt.

Abbildung 3.6 zeigt den Spülkegel, der sich im physikalischen Modellversuch nach einer Spüldauer von 130 s entwickelt. Das erodierte Gesamtvolumen beträgt dabei

ca.  $3470 \text{ cm}^3$ . Auf die genauen Messergebnisse wird im Rahmen der Auswertung der numerischen Modellierung eingegangen.



**Abbildung 3.5.:** Messkonzept des physikalischen Modellversuchs (Ermilov 2018)



**Abbildung 3.6.:** Spülkegel des physikalischen Modellversuchs (Ermilov 2018)



## **4. Dreidimensionale numerische Modellierung mit SSIIM 1 und SSIIM 2**

Dieses Kapitel beinhaltet die zum Verständnis dieser Arbeit notwendigen Grundlagen der dreidimensionalen numerischen Modellierung und deren Umsetzung in den beiden Programmen SSIIM 1 und SSIIM 2.

### **4.1. Allgemeines**

Strömungen werden durch die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie beschrieben. Diese Differentialgleichungen haben nur für einfache Anwendungen theoretische Lösungen. Damit ist eine analytische Berechnung der Drücke und Geschwindigkeiten nur für solche Spezialfälle möglich. Für reale Strömungsprobleme wie die Ermittlung des Spülkegels bei Stauraumspülungen muss die Strömung entweder experimentell (vgl. den in Kapitel 3 beschriebenen Modellversuch) oder numerisch ermittelt werden.

Zur numerischen Modellierung des Modellversuchs werden in dieser Arbeit die beiden Softwares SSIIM 1 und SSIIM 2 verwendet. SSIIM steht für „Sediment Simulation In Intakes with Multiblock Option“. Das Programm wird von Professor Nils R. Olsen am Department of Hydraulic and Environmental Engineering der Technisch-Naturwissenschaftlichen Universität Norwegens (NTNU) in Trondheim entwickelt. Ursprünglicher Zweck des Programms ist die Simulation von Sedimentbewegungen in gewöhnlichen Fluss- und Kanalabschnitten, da dies in physikalischen Modellversuchen für Feinsedimente nur schwer umsetzbar ist. Der Fokus des Programms liegt heute auf der Modellierung von Sedimenttransport in Flüssen, Reservoirs und um hydraulische Strukturen. Der wesentliche Unterschied zwischen SSIIM 1 und SSIIM 2 besteht in der Implementierung des Berechnungsgitters: SSIIM 1 verwendet ein strukturiertes Gitter, SSIIM 2 ein unstrukturiertes Gitter (vgl. Olsen 2018). Weitere Unterschiede

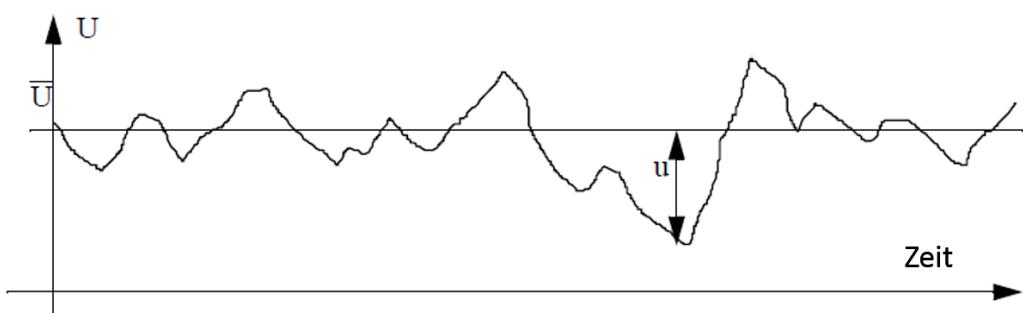
werden im Verlauf dieses Kapitels erläutert.

## 4.2. Hydrodynamische Modellierung

Das Verhalten linear-viskoser (newtonscher) Fluide wird durch die Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben. Die Gleichungen definieren die Fließgeschwindigkeiten und die Turbulenz in einem Fluss oder einem hydraulischen System (vgl. Olsen 1999). Als Navier-Stokes-Gleichungen werden die fünf Erhaltungsgleichungen von Masse, Impuls und Energie bezeichnet. Die vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen beschreiben die Strömung mit allen Wirbeln und Turbulenzen, unabhängig von deren Größe. Eine numerische Lösung der vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen führt jedoch zu unzumutbar großen Rechenzeiten. Für praktische Anwendungen werden daher die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen verwendet (vgl. Lecheler 2018).

### 4.2.1. Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen

Bei der Reynolds-Mittelung wird die Geschwindigkeit  $U$  in einen Mittelwert  $\bar{U}$  und einen Schwankungswert  $u$  aufgeteilt. Abbildung 4.1 zeigt den zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeit einer turbulenten Strömung an einem festen Ort sowie die Aufteilung der Geschwindigkeit in Mittel- und Schwankungswert. Einsetzen dieser Werte in die vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen führt zu den Reynolds-gemittelten Navier-



**Abbildung 4.1.:** Fließgeschwindigkeiten einer turbulenten Strömung an einem festen Ort nach Olsen (1999)

Stokes-Gleichungen (vgl. Olsen 1999):

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \cdot \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial j} \cdot (-P \cdot \delta_{ij} - \rho \cdot \overline{u_i \cdot u_j}) \quad (4.1)$$

Dabei bezeichnet  $U_i$  die mittlere Fließgeschwindigkeit,  $\rho$  die Dichte des Wassers,  $P$  den Druck,  $x$  die räumliche Dimension,  $t$  die zeitliche Dimension und  $\delta_{ij}$  das Kronecker-Delta. Für Schubspannungen gilt dabei  $\delta_{ij} = 0$  und für Normalspannungen  $\delta_{ij} = 1$ . Der Term  $\rho \cdot \overline{u_i \cdot u_j}$  wird auch als Reynoldsscher Spannungstensor bezeichnet und beinhaltet das zeitliche Mittel der fluktuierenden Geschwindigkeitskomponenten.

## 4.2.2. Turbulenzmodell und Wandgesetz

Zur Schließung des Gleichungssystems ist die Anwendung eines Turbulenzmodells nötig. In SSIIM wird hierfür standardmäßig das  $\kappa$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodell verwendet (vgl. Olsen 2018). Dieses ist in Olsen (1999) erläutert:

Für den Reynoldsschen Spannungstensor gilt entsprechend der Näherung von Boussinesq:

$$-\overline{u_i \cdot u_j} = \nu_t \cdot \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \cdot \rho \cdot \kappa \cdot \delta_{ij} \quad (4.2)$$

Dabei ist  $\nu_t$  die turbulente Wirbelviskosität und  $\kappa$  die turbulente kinetische Energie. Sie werden wie folgt berechnet:

$$\kappa = \frac{1}{2} \cdot \overline{u_i \cdot u_j} \quad (4.3)$$

$$\nu_t = c_\mu \cdot \frac{\kappa}{\epsilon^2} \quad (4.4)$$

$\epsilon$  beschreibt dabei die Dissipation der kinetischen Energie.  $\kappa$  und  $\epsilon$  werden mit den beiden folgenden Gleichungen modelliert:

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + U_j \cdot \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} \cdot \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + P_k - \epsilon \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\epsilon 1} \cdot \frac{\epsilon}{\kappa} \cdot P_k + c_{\epsilon 2} \cdot \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (4.6)$$

Die Produktion der kinetischen Energie  $P_k$  ist dabei:

$$P_k = \nu_t \cdot \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \cdot \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (4.7)$$

Die in den Formeln verwendeten empirischen Konstanten werden von Rodi (1993) mittels experimenteller Untersuchungen ermittelt und ergeben sich wie folgt:

$$c_\mu = 0,09 \quad c_{\epsilon 1} = 1,44 \quad c_{\epsilon 2} = 1,92 \quad \sigma_\kappa = 1,0 \quad \sigma_\epsilon = 1,26 \quad (4.8)$$

Ein Vorteil der Verwendung des  $\kappa$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodells sind die allgemein gültigen empirischen Konstanten. Dadurch kann das Modell ohne Kalibrierung für verschiedene Strömungszustände gelöst werden (vgl. Olsen 1999). Darüber hinaus ist das Modell stabil und benötigt nur wenig zusätzlichen Rechenaufwand (vgl. Lecheler 2018).

Der Geschwindigkeitsgradient ist nahe des Berechnungsrandes oft sehr steil. Um dies mit einem Gitter aufzulösen, sind sehr viele Gitterzellen notwendig. Stattdessen werden am Berechnungsrand Wandgesetze für das  $\kappa$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodell verwendet. Dabei wird angenommen, dass das Geschwindigkeitsprofil einer bestimmten empirischen Funktion entspricht. In SSIIM ist folgendes Wandgesetz hinterlegt:

$$\frac{U(z)}{U_*} = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{30\gamma}{k_s}\right) \quad (4.9)$$

Dabei ist  $U_*$  die Schergeschwindigkeit,  $k = 0,4$ ,  $\gamma$  die Distanz zur Wand und  $k_s$  die äquivalente Sandrauheit (vgl Olsen 2018). Diese kann nach Olsen (2001) wie folgt berechnet werden:

$$k_s = \left(\frac{26}{k_{St}}\right)^6 \quad (4.10)$$

Dabei bezeichnet  $k_{St}$  den Strickler-Beiwert.

### 4.2.3. SIMPLE-Algorithmus

Zur Bestimmung des unbekannten Druckterms der Navier-Stokes-Gleichungen wird in SSIIM der SIMPLE-Algorithmus verwendet. SIMPLE steht hierbei für „Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations“. Das Konzept hinter dem Algorithmus besteht aus der Schätzung eines Wertes für den Druck und der anschließenden Ermittlung des Fehlers in der Kontinuität, um eine Gleichung für die Druckkorrektur zu erhalten. Nach dem Hinzufügen der Korrektur ist die Kontinuität erfüllt. Der SIMPLE-Algorithmus ist in Olsen (1999) näher erläutert.

### 4.2.4. Berechnung des Wasserspiegels

SSIIM 1 berechnet den initialen Wasserspiegel zu Beginn der Simulation über eine „Backwater calculation“ mit der Gleichung nach Manning-Strickler (vgl. Olsen 2012):

$$U = k_{St} \cdot r_h^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

Dabei ist  $U$  die mittlere Fließgeschwindigkeit,  $k_{st}$  der Strickler-Beiwert,  $r_h$  der hydraulische Radius und  $I$  das Sohlgefälle. SSIIM 1 fordert die Eingabe des Abflusses, des Unterwasserstands und der Rauheit, um mittels der Manning-Strickler-Gleichung die Wasserstände im Berechnungsgebiet bestimmen zu können. In SSIIM 2 dagegen ist der initiale Wasserspiegel standardmäßig horizontal implementiert. In den darauf folgenden Iterationen können für die Berechnung des Wasserspiegels verschiedene Algorithmen verwendet werden (vgl. Olsen 2018):

**Pressure-Bernoulli-Algorithmus:** Dieser Algorithmus ist sowohl in SSIIM 1 als auch in SSIIM 2 implementiert. Er kann für stationäre und instationäre Berechnungen verwendet werden. Der Algorithmus basiert auf dem berechneten Druckfeld. Er verwendet die Bernoulli-Gleichung entlang der Wasseroberfläche, um die Lage des Wasserspiegels zu ermitteln, basierend auf einem Fixpunkt, der sich nicht bewegt.

**Gravity and Control Volume-Algorithmus:** Dieser Algorithmus verwendet den ansonsten vernachlässigten Schwerkraftsterm in den Navier-Stokes-Gleichungen. Anstel-

le des SIMPLE-Algorithmus verwendet er die Kontinuitätsgleichung zur Berechnung der Wasserspiegellage. Der Algorithmus ist sehr instabil und erfordert einen kleinen Zeitschritt. Er wird vorzugsweise bei steilen Wasserspiegelgradienten verwendet.

**Implicit Pressure Difference with Adaptive Grid (IPDA):** Dieser Algorithmus existiert nur für SSIIM 2. Die Lage des Wasserspiegels wird dabei berechnet, indem eine partielle Differentialgleichung für die lokale Neigung als Funktion des Druckgradienten zu den vier Nachbarzellen gelöst wird.

**Implicit Diffusive Wave Equations with Adaptive Grid (IDWA):** Dieser Algorithmus ist ebenfalls nur für SSIIM 2 programmiert. Er ist dem Pressure-Bernoulli-Algorithmus ähnlich, liefert jedoch stabilere Lösungen. Für komplexe Wasseroberflächen ist er weniger akkurat als der Pressure-Bernoulli-Algorithmus. Er liefert jedoch Resultate von ausreichender Qualität bei annähernd horizontalem Wasserspiegel.

**Horizontaler Wasserspiegel:** In SSIIM 2 besteht darüber hinaus die Möglichkeit, die Lage des horizontalen Wasserspiegels vorzugeben. Der anfängliche Wasserspiegel wird dabei entsprechend den in der timei-Datei (vgl. Kapitel 4.8) vorgegebenen zeitabhängigen Unterwasserständen nach oben oder nach unten bewegt.

Detailliertere Erläuterungen zu den unterschiedlichen Algorithmen sind in Olsen (2015) zu finden.

### 4.3. Morphodynamische Modellierung

Der Transport von Sedimenten in Flüssen kann in Schwebstoff- und Geschiebetransport unterteilt werden, vgl. Kapitel 2.2.2. Die beiden Transportprozesse beruhen auf unterschiedlichen physikalischen Grundlagen.

Der Schwebstofftransport wird durch die Konvektions-Diffusions-Gleichung beschrieben (vgl. Olsen 2018):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \cdot \frac{\partial c}{\partial x_j} + w \cdot \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot (\Gamma \cdot \frac{\partial c}{\partial x_j}) \quad (4.12)$$

$c$  ist dabei die Sedimentkonzentration abhängig von der Zeit  $t$  und vom Ort  $x$ ,  $U_j$  die mittlere Fließgeschwindigkeit,  $w$  die Sinkgeschwindigkeit des Schwebstoffpartikels und  $\Gamma$  der Diffusionskoeffizient. Dieser ergibt sich wie folgt (vgl. Olsen 2018):

$$\Gamma = \frac{v_t}{Sc} \quad (4.13)$$

Dabei bezeichnet  $v_t$  die turbulente Wirbelviskosität aus dem  $\kappa$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodell (vgl. Kapitel 4.2) und  $Sc$  die Schmidt-Zahl. Die Schmidt-Zahl ist in SSIIM standardmäßig auf 1 gesetzt. Dies bedeutet, dass der Diffusionskoeffizient der turbulenten Wirbelviskosität entspricht (vgl. Olsen 2012).

Zur Lösung der Konvektions-Diffusions-Gleichung muss eine Randbedingung nahe der Sohle vorgegeben werden. SSIIM verwendet hierzu van Rijns Formel für die Schwebstoffkonzentration an der Sohle (vgl. Rijn 1987):

$$c_{Sohle} = 0,015 \cdot \frac{d}{a} \cdot \frac{\left(\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c}\right)^{1,5}}{\left(d \cdot \left(\frac{(\rho_s - \rho_w) \cdot g}{\rho_w \cdot \nu^2}\right)^{\frac{1}{3}}\right)^{0,3}} \quad (4.14)$$

Dabei ist  $a$  die Distanz des Konzentrationspunkts von der Sohle. In SSIIM wird hierfür die halbe Höhe der untersten Gitterzelle verwendet (vgl. Olsen 2018).  $d$  bezeichnet den mittleren Partikeldurchmesser des Sediments,  $\tau$  die Schubspannung und  $\tau_c$  die kritische Schubspannung für die Mobilisierung der Sedimentpartikel.  $\rho_s$  steht für die Dichte des Sediments,  $\rho_w$  für die Dichte des Wassers und  $\nu$  für die kinematische Viskosität des Wassers (vgl. Olsen 1999).

Die Berechnung des Geschiebetransports erfolgt in SSIIM ebenfalls nach van Rijn (vgl. Olsen 2012):

$$\frac{q_b}{d^{1,5} \cdot \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_w) \cdot g}{\rho_w}}} = 0,053 \cdot \frac{\left(\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c}\right)^{2,1}}{d^{0,3} \cdot \left(\frac{(\rho_s - \rho_w) \cdot g}{\rho_w \cdot \nu^2}\right)^{0,1}} \quad (4.15)$$

$q_b$  bezeichnet dabei den Geschiebetransport pro Meter Breite der Gewässersohle in der Einheit [ $\text{m}^2/\text{s}$ ].

Zur Berechnung des Sedimenttransports in SSIIM können die Transportformeln für Schwebstoffe und Geschiebe nach van Rijn kombiniert oder jeweils einzeln angewandt werden.

Alternativ zu den Formeln nach van Rijn können in SSIIM 1 und SSIIM 2 die Formeln von Wu et al. (2000) verwendet werden. Die Berechnung des Schwebstofftransports nach Wu erfolgt mit folgender Formel:

$$q_s = 0,0000262 \cdot \left[ \left( \frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right) \cdot \frac{U}{\omega} \right]^{1,74} \cdot p_b \cdot \sqrt{\left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \cdot g \cdot d^3} \quad (4.16)$$

Der Geschiebetransport nach Wu wird wie folgt berechnet:

$$q_b = 0,0053 \cdot \left[ \left( \frac{n'}{n} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right]^{2,2} \cdot p_b \cdot \sqrt{\left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \cdot g \cdot d^3} \quad (4.17)$$

In den Formeln nach Wu ist  $p_b$  der prozentuale Anteil der Kornfraktion.  $n'$  bezeichnet den Manning-Koeffizienten entsprechend der äquivalenten Sandrauheit der Kornfraktion,  $n$  den Manning-Koeffizienten der gesamten Gewässersohle. Da in dieser Arbeit nur eine Kornfraktion verwendet wird, ist  $p_b = 1$  und  $n' = n$ .  $\gamma_s$  und  $\gamma_w$  bezeichnen das spezifische Gewicht des Sediments bzw. des Wassers in [N/m<sup>3</sup>].

SSIIM 2 bietet darüber hinaus die Möglichkeit, den Sedimenttransport nach der Formel von Meyer-Peter und Müller zu berechnen (vgl. Meyer-Peter et al. 1948):

$$q_b = \frac{8}{g \cdot \sqrt{\rho_w}} \cdot \frac{1}{(\rho_s - \rho_w)} \cdot (\tau - \tau_c)^{\frac{3}{2}} \quad (4.18)$$

Für die o.g. Formeln zum Sedimenttransport sind die Schubspannungen und kritischen Schubspannungen nötig. Diese werden in SSIIM anhand der turbulenten kinetischen Energie berechnet (vgl. Olsen 2018). Die Berechnung ist in Mouris (2017) beschrieben: Im sohnahen Bereich besteht nach Rodi (1993) ein Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Dissipation von Turbulenz. Die Sohlschubspannungen in der sohnahen Zelle werden dann wie folgt berechnet:

$$\tau = \sqrt{c_\mu} \cdot \rho_w \cdot \kappa \quad (4.19)$$

Dabei hat die Konstante  $c_\mu$  den Wert 0,09 nach Launder et al. (1972).

Die kritische Sohlschubspannung wird standardmäßig entsprechend des Shields-Diagramms ermittelt (vgl. Shields 1936). Dabei muss allerdings zwischen dem Bewegungsbeginn gleicher Partikel auf ebenen und geneigten Flächen unterschieden

werden. Mittels des F7 B-Algorithmus erfolgt in SSIIM eine Reduktion der kritischen Schubspannungen auf einer geneigten Sohle (vgl. Olsen 2018). Nach Olsen (2001) wird die Reduktion der kritischen Schubspannungen über eine Multiplikation mit dem Faktor  $K$  nach Brooks (1963) umgesetzt:

$$K = -\frac{\sin(\psi) \cdot \sin(\alpha)}{\tan(\theta)} + \sqrt{\left(\frac{\sin(\psi) \cdot \sin(\alpha)}{\tan(\theta)}\right)^2 + \cos^2(\psi) \cdot \left(1 - \left(\frac{\tan(\psi)}{\tan(\theta)}\right)^2\right)} \quad (4.20)$$

Dabei ist  $\alpha$  der Winkel zwischen der Richtung der Sohlschubspannung und der Stromlinie,  $\psi$  der Neigungswinkel der Sohle und  $\theta$  der Reibungswinkel der verwendeten Kornfraktion.

SSIIM verfügt über eine Sand-Slide-Funktion, die über den F56-Algorithmus in der control-Datei aktiviert werden kann. Dabei wird der Tangens des Reibungswinkels angegeben. Der Algorithmus bewirkt eine Korrektur von Netzlinien, die steiler als der angegebene Winkel sind.

## 4.4. Numerische Implementierung der Gleichungen

Zur Lösung der in den Kapiteln 4.2 und 4.3 vorgestellten Differentialgleichungen (Navier-Stokes- und Kovektions-Diffusions-Gleichung) müssen diese auf diskrete Punkte in Raum und Zeit überführt werden. Dieser Vorgang wird auch als Diskretisierung der räumlichen und zeitlichen Ableitungen bezeichnet. Dabei werden die partiellen Ableitungen (Differentiale) in endliche Differenzen umgewandelt (vgl. Lecheler 2018).

### 4.4.1. Räumliche Diskretisierung

Bezüglich der räumlichen Diskretisierung unterscheidet man zwischen drei Methoden: der Finite-Differenzen-Methode, der Finite-Elemente-Methode und der Finite-Volumen-Methode. Das Programm SSIIM verwendet die Finite-Volumen-Methode. Daher wird auf die anderen beiden Methoden hier nicht eingegangen.

Bei der Finite-Volumen-Methode wird das Lösungsgebiet in mehrere Kontrollvolumina unterteilt. Als Ursprung für die Methode wird die Integralform der Erhaltungsgleichung benutzt. Diese wird auf jedes Kontrollvolumen angewandt. Die

Variablenwerte werden dann im Schwerpunkt jedes einzelnen Kontrollvolumens berechnet. Zur Ermittlung der Variablenwerte auf der Oberfläche der Kontrollvolumina können verschiedene Interpolationsverfahren verwendet werden (vgl. Ferziger et al. 2008).

Die Diskretisierung der Navier-Stokes- sowie der Konvektions-Diffusions-Gleichung erfolgt in SSIIM mittels des First-Order Power-Law Interpolationsverfahrens (POW) oder des Second-Order Upwind Interpolationsverfahrens (SOU). Die Verfahren sind in Olsen (1999) beschrieben. Auf sie wird hier nicht näher eingegangen. Das SOU-Verfahren wird in dieser Arbeit für die Gleichungen der Geschwindigkeiten in x-, y- und z-Richtung verwendet. Für die Druckgleichung und die Turbulenzgleichungen wird das POW-Verfahren benutzt.

Die Finite-Volumen-Methode kann sowohl für strukturierte als auch für unstrukturierte Gitter verwendet werden. Damit ist eine exakte Anpassung an die Topographie sowie an komplexe Geometrien möglich. Ein Bezug des Gitters auf ein Koordinatensystem ist nicht nötig. Die Methode ist konservativ: Die Massenerhaltung ist sowohl für das gesamte Lösungsgebiet als auch für jedes einzelne Element eingehalten (vgl. Ferziger et al. 2008).

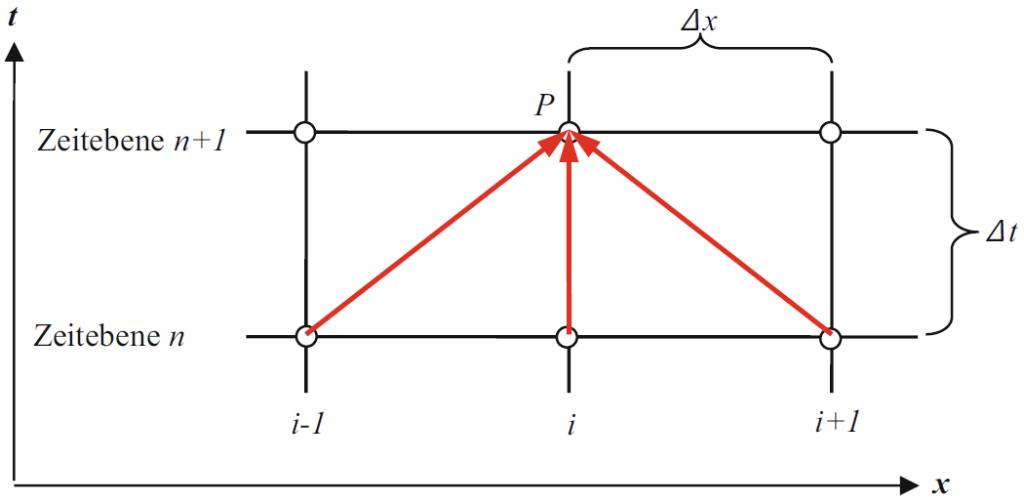
#### 4.4.2. Zeitliche Diskretisierung

Bezüglich der zeitlichen Diskretisierung kann zwischen expliziten und impliziten Berechnungsverfahren unterschieden werden.

Bei expliziten Verfahren wird der Zustand der Variablen am Gitterknoten aus den Werten der Nachbarknoten der vorherigen Zeitebene berechnet. Dies ist schematisch in Abbildung 4.2 dargestellt. Der gewählte Zeitschritt darf dabei nicht größer sein als die Zeit, die ein Partikel benötigt, um von einem Gitterpunkt zum nächsten zu wandern. Dies führt zum Courant-Friedrichs-Lowy-Kriterium (vgl. Lecheler 2018):

$$CFL = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (4.21)$$

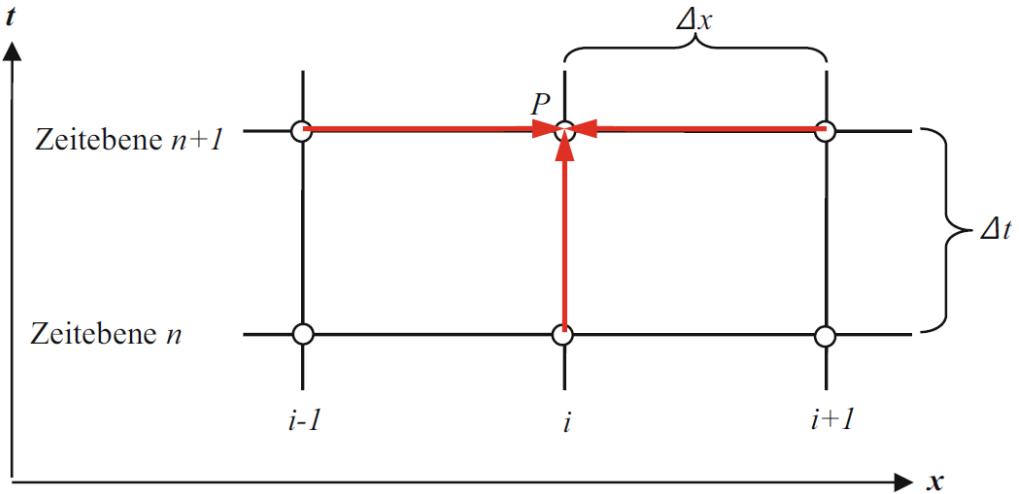
Die numerische Berechnung ist stabil, wenn gilt:  $CFL < 1$ . Andernfalls kann es zu Instabilität und Fortpflanzung von numerischen Fehlern kommen.  $\Delta t$  bezeichnet dabei den gewählten Zeitschritt und  $\Delta x$  die Maschenweite des Gitters. Explizite



**Abbildung 4.2.:** Explizites zeitliches Differenzenschema (Lecheler 2018)

Verfahren führen somit bei engen Gittern und großen Fließgeschwindigkeiten zu einem geringen Zeitschritt und damit zu einer hohen benötigten Rechenzeit, wenn das CFL-Kriterium eingehalten werden soll.

Im Gegensatz dazu sind implizite Berechnungsverfahren nicht an das CFL-Kriterium gebunden. Die Berechnung des Zustands der Variablen am Knoten erfolgt aus den Werten der Nachbarknoten der vorherigen und der aktuellen Zeitebene (vgl. Abbildung 4.3). Implizite Verfahren sind hochiterative Prozesse mit vergleichsweise langer



**Abbildung 4.3.:** Implizites zeitliches Differenzenschema (Lecheler 2018)

Rechendauer. Zu jedem Zeitschritt erfolgt die Lösung des gesamten Gleichungssystems. Die Verfahren sind jedoch sehr stabil und ermöglichen größere Zeitschritte als explizite Verfahren.

Die Software SSIIM verwendet ein implizites Verfahren. Damit ist die Wahl des Zeitschritts nicht an das CFL-Kriterium gebunden.

## 4.5. Gittergenerierung

Die diskreten Punkte, an denen die Variablen ermittelt werden, werden durch ein numerisches Gitter definiert. Das Gitter ist also eine diskrete Darstellung des Lösungsgebiets. Das Lösungsgebiet wird durch das Gitter in eine finite Anzahl von Teilgebieten aufgeteilt. Bei den Teilgebieten handelt es sich um Abschnitte bei eindimensionaler Berechnung, Flächen bei zweidimensionaler Berechnung und Volumina bei dreidimensionaler Berechnung. Bezuglich der Art des Gitters wird zwischen strukturierten und unstrukturierten Gittern unterschieden (vgl. Ferziger et al. 2008).

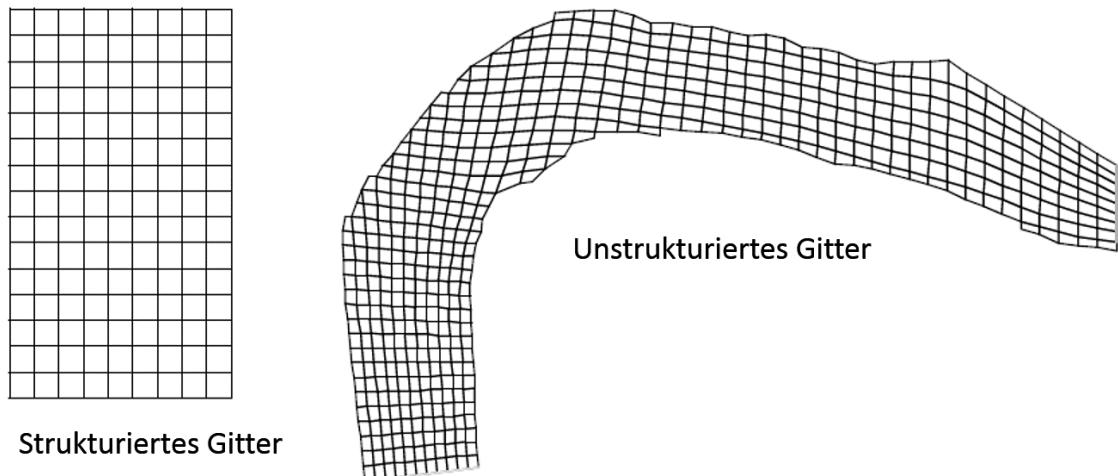
### 4.5.1. Arten von Gittern

Bei strukturierten Gittern ist die Anzahl an Unterteilungen je Raumdimension konstant. Sie bestehen aus Sätzen von Gitterlinien. Die Linien eines Satzes kreuzen sich selbst nicht. Sie kreuzen jede Linie eines anderen Satzes nur einmal. Somit kann jeder Gitterpunkt bei einer dreidimensionalen Berechnung eindeutig durch drei Indizes angesprochen werden. Die Zellnachbarn einer jeden Zelle sind somit direkt bekannt. Der Rechenraum ist als Matrix mit regulärer Struktur darstellbar. Durch die vereinfachten Gleichungsstrukturen und darauf optimierten Verfahren zur Gleichungslösung wird das Programmieren vereinfacht und die Berechnung beschleunigt. Auf der anderen Seite sind strukturierte Gitter jedoch geometrisch unflexibel. Hochdetaillierte Gegebenheiten können nur mit extrem hoher Auflösung genau berücksichtigt werden, was zu unnötig kleinen Gitterabständen in anderen Teilen des Lösungsgebiets führt (vgl. Ferziger et al. 2008).

Bei unstrukturierten Gittern dagegen müssen die Lage der Knoten und die Nachbarbeziehungen explizit definiert werden. Die Datenstruktur ist damit irregulär und die Matrix des Gleichungssystems hat keine regelmäßige diagonale Struktur. Daher

müssen kompliziertere Lösungsalgorithmen verwendet werden. Die dreidimensionalen Kontrollvolumina können durch Tetraeder, Hexaeder oder andere Polyeder repräsentiert werden. Vorteile unstrukturierter Gitter sind die hohe geometrische Flexibilität und die exakte Anpassung an räumliche Details, ohne dabei die Auflösung im gesamten Lösungsgebiet erhöhen zu müssen. Nachteile sind die längere Berechnungszeit aufgrund der benötigten komplizierten Gleichungsalgorithmen sowie die komplexe Datenstruktur (vgl. Ferziger et al. 2008).

Abbildung 4.4 zeigt den Vergleich zwischen einem strukturierten und einem unstrukturierten Gitter nach Olsen (1999).



**Abbildung 4.4.:** Vergleich zwischen einem strukturierten und einem unstrukturierten Gitter nach Olsen (1999)

Gitter können sich während der Berechnungen verändern. Ein Gitter, das sich abhängig von der Lösung der Gleichungen aus dem vorherigen Zeitschritt verändert, wird adaptives Gitter genannt. Beispiele hierfür sind vertikale Änderungen des Gitters aufgrund von Veränderungen im Wasserspiegel oder Veränderungen der Sohle infolge von Erosion oder Sedimentation (vgl. Olsen 2012). In SSIIM werden standardmäßig adaptive Gitter verwendet.

### 4.5.2. Qualitätskriterien

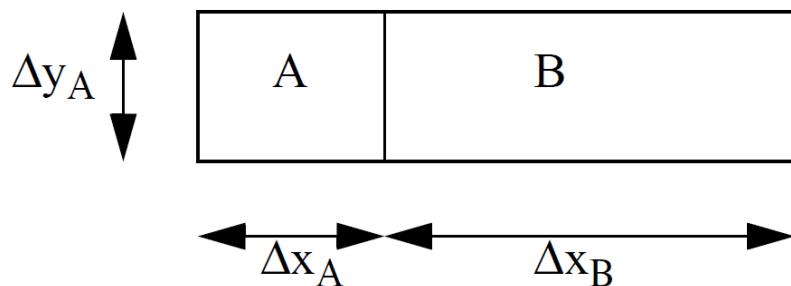
Die Genauigkeit und Konvergenz einer Finite-Volumen-Berechnung hängt von der Qualität des Gitters ab. Dabei sind drei Aspekte von besonderer Bedeutung (vgl. Olsen 2012):

- (Nicht-)Orthogonalität
- Seitenverhältnis
- Ausdehnungsverhältnis

Das Kriterium der Orthogonalität besagt, dass die Verbindungsgeraden zweier Zellmittpunkte die gemeinsame Zellkante möglichst unter  $90^\circ$  schneiden soll. Schneidet die Verbindungsgeraden die Zellkante in einem Winkel kleiner als  $45^\circ$  oder größer als  $135^\circ$ , so ist das Gitter als nicht-orthogonal zu betrachten. Eine hohe Orthogonalität des Gitters führt zu einer schnelleren Konvergenz der Berechnung und in manchen Fällen zu einer höheren Genauigkeit (vgl. Olsen 1999).

Abbildung 4.5 zeigt das Seiten- und Ausdehnungsverhältnis des Gitters. Das Seitenverhältnis von Zelle A wird berechnet durch  $\Delta x_A / \Delta y_A$ . Zur Vermeidung von Konvergenzproblemen und Oszillationen sollte das Seitenverhältnis einer Zelle immer kleiner als 10 sein. Dabei ist ein Verhältnis von kleiner als 2-3 optimal und somit anzustreben (vgl. Olsen 2012). Die längere Seite der Zelle sollte dabei möglichst parallel zur Hauptströmungsrichtung verlaufen (vgl. Olsen 1999).

Das Ausdehnungsverhältnis dieser beiden Zellen ist  $\Delta x_A / \Delta x_B$ . Es sollte bei der Gittererstellung immer kleiner als 10 sein, um noch physikalische Ergebnisse zu



**Abbildung 4.5.:** Seiten- und Ausdehnungsverhältnis eines Berechnungsgitters (Olsen 2012)

erhalten. Anzustreben ist ein Verhältnis von kleiner als 1,2 (vgl. Olsen 1999).

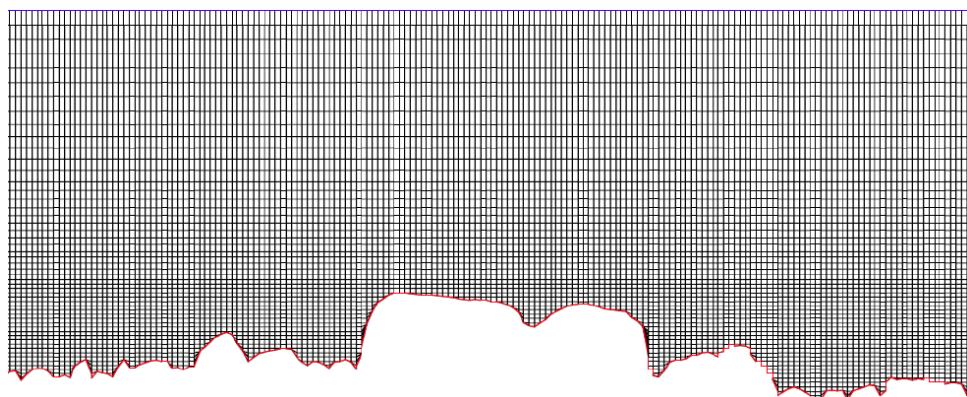
### 4.5.3. Gitter in SSIIM

SSIIM 1 verwendet ein strukturiertes Gitter. Die horizontale Gitteraufteilung wird in der koordina-Datei festgelegt, vgl. Kapitel 4.8. Die Anzahl vertikaler Zellen kann vom Benutzer festgelegt werden. Deren vertikale Aufteilung erfolgt mittels prozentualer Angaben der Höhe der Gitterlinien in Abhängigkeit des Wasserspiegels. Das Gitter befindet sich immer zwischen Sohle und Wasserspiegel. Sinkt der Wasserspiegel oder verändert sich die Sohle, so verändert sich auch das Gitter in seiner vertikalen Richtung. Die Anzahl der Zellen sowie deren Nummerierung bleiben jedoch immer gleich.

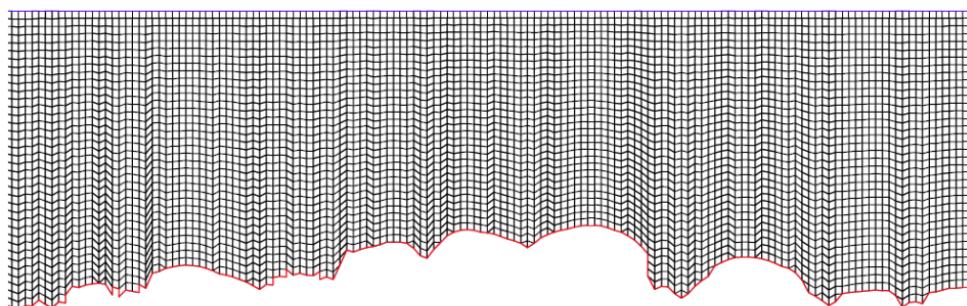
SSIIM 2 verwendet zwei Gitter: Ein zweidimensionales, tiefengemitteltes strukturiertes Gitter und ein weiteres, dreidimensionales unstrukturiertes Gitter. Die beiden Gitter beschreiben die gleiche Fläche. Das zweidimensionale Gitter ist in seiner Örtlichkeit über die Zeit fixiert. Das dreidimensionale Gitter verändert sich je nach Änderungen im Wasserspiegel und in der Sohle. Somit kann sich auch die Gesamtzahl der Zellen im dreidimensionalen Gitter verändern, genau wie deren Nummerierung.

Zur Generierung der Gitterlinien in Längs- und Querrichtung stehen in SSIIM 2 mehrere Algorithmen zur Verfügung: Der F64 0-Algorithmus generiert horizontale Gitterlinien, ebenso wie der F64 1-Algorithmus. Beim F64 1-Algorithmus sind die Zellen an der Sohle jedoch nicht horizontal. Stattdessen werden Tetra- oder Hexaeder als Zellen entlang der Sohle verwendet, vgl. Abbildung 4.6. Die F64 2-Option ist ähnlich wie die F 64 1-Option, jedoch muss bei diesem Algorithmus keine Linie mehr horizontal sein, vgl. Abbildung 4.7. Der F64 11-Algorithmus (vgl. Abbildung 4.8) ist die meistgetestete Option für die Berechnung von Sedimenttransport in Flüssen. Dieser Algorithmus verwendet immer Hexaeder als sohlennahe Zellen, die exakt an die Sohle angepasst werden. Diese eignen sich besser als Tetraeder zur Berechnung des Sedimenttransports, da die meisten Sedimente sohnah transportiert werden. Die F64 13-Option ist ähnlich der F64 11-Option, beinhaltet jedoch zusätzliche Kriterien für trockenfallende Bereiche des Gitters (vgl. Olsen 2018).

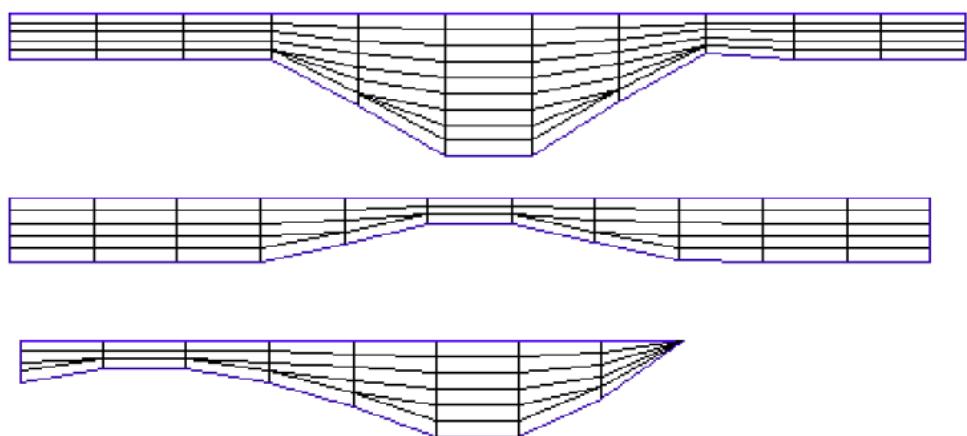
Die Anzahl der Zellen in vertikaler Richtung wird in SSIM 2 über eine maximale Anzahl an Zellen, welche zuvor festgelegt wird, berechnet. Die Berechnung der



**Abbildung 4.6.:** F64 1-Algorithmus zur Gittergenerierung in SSIIM 2 (Olsen 2018)



**Abbildung 4.7.:** F64 2-Algorithmus zur Gittergenerierung in SSIIM 2 (Olsen 2018)



**Abbildung 4.8.:** F64 11-Algorithmus zur Gittergenerierung in SSIIM 2 (Olsen 2018)

Zellenanzahl wird durch folgende Formel umgesetzt:

$$n = n_{max} \cdot \left(\frac{h}{h_{max}}\right)^p \quad (4.22)$$

Dabei ist  $n_{max}$  die vorgegebene maximale Anzahl an Zellen in vertikaler Richtung,  $h_{max}$  die maximale Wassertiefe im modellierten Gebiet,  $h$  die aktuelle Wassertiefe und  $p$  ein Faktor, der vom Benutzer festgelegt werden kann. In dieser Arbeit wird, wie in SSIIM 2 standardmäßig implementiert, ein Wert von 0,6 für  $p$  benutzt. Die Implementierung bewirkt, dass mit sinkendem Wasserspiegel Zellen in vertikaler Richtung wegfallen. Dabei ist zu beachten, dass jeweils die sohnahen Zellen entfernt werden (vgl. Olsen 2018).

## 4.6. Konvergenz

In der numerischen Strömungsberechnung werden iterative Lösungsmethoden angewendet: Zunächst wird ein Startwert geschätzt. Dieser wird in den Iterationen angepasst, um eine bessere Lösung zu erhalten. Dies wird so lange getan, bis der korrekte Wert erreicht ist (vgl. Olsen 2012).

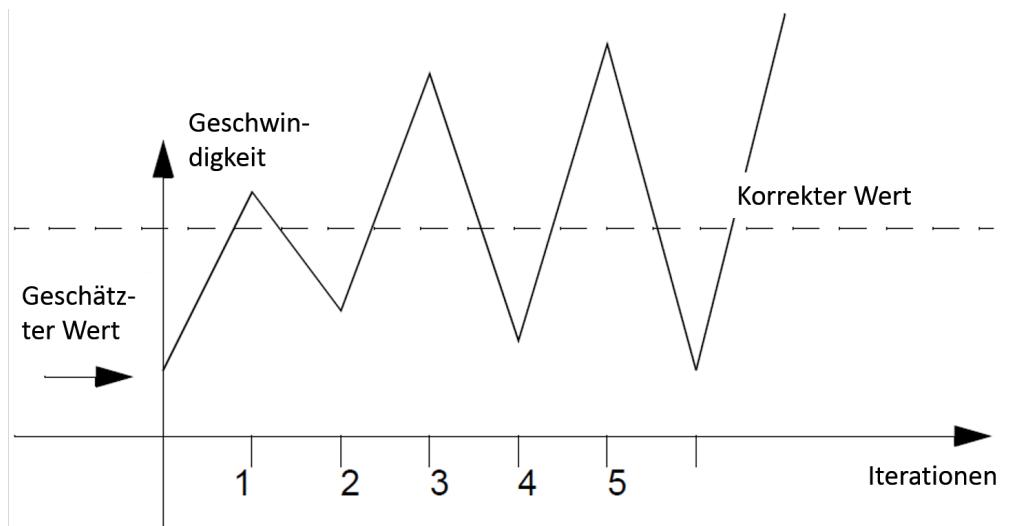
Eine numerische Lösung ist nach Lecheler (2018) dann konvergent, wenn die Differentialgleichungen erfüllt sind. Bei Zeitschrittverfahren erfolgt die Überprüfung der Konvergenz anhand der Residuen. Ein Residuum ist ein Zahlenwert, der für jede Erhaltungsgleichung angibt, wie genau die stationäre Erhaltungsgleichung erfüllt ist. Zur Berechnung der Residuen gibt es verschiedene Methoden. Diese sind in Olsen (2012) erläutert und werden hier nicht genauer beschrieben.

Theoretisch muss das Residuum null sein, um die Erhaltungsgleichung zu erfüllen. In der Praxis jedoch werden Kriterien eingeführt, um zu entscheiden, ob eine Simulation konvergiert. Das Konvergenzkriterium besagt, ab welchem Wert der Residuen die Simulation als konvergent betrachtet werden kann (vgl. Olsen 2012).

In SSIIM beträgt das Konvergenzkriterium für die Turbulenz- und die Navier-Stokes-Gleichungen 0,001. Sind die Residuen aller Gleichungen (Geschwindigkeiten in x-, y- und z-Richtung, Druck und Turbulenz) kleiner als dieser Wert, so gilt die Berechnung als konvergent und der nächste Zeitschritt wird eingeleitet. Für die Konvektions-Diffusions-Gleichung liegt das Konvergenzkriterium in SSIIM bei 0,01.

Die Kriterien können vom Benutzer vor der Berechnung angepasst werden (vgl. Olsen 2018).

Nach Ferziger et al. (2008) wird eine numerische Lösungsmethode als stabil bezeichnet, wenn sie die Fehler, die im Laufe des numerischen Lösungsprozesses auftreten, nicht anfacht. Für iterative Methoden, wie sie in dieser Arbeit vorkommen, bedeutet Stabilität, dass die Iterationen nicht divergieren. Kommt es bei der Berechnung zu Instabilitäten, sieht der Konvergenzgraph einer Zelle aus wie in Abbildung 4.9. Die Werte oszillieren und werden dabei immer extremer. Sie entfernen sich zusehends vom korrekten Zielwert. Daher wird meist ein Abbruch der Berechnung bei Überschreitung eines gewissen Residuenwerts programmiert (vgl. Olsen 2012). In SSIIM ist dieser Wert standardmäßig auf  $10^{10}$  festgelegt. In SSIIM 2 kann der Wert vom Benutzer geändert werden (vgl. Olsen 2018).



**Abbildung 4.9.:** Divergierende iterative Berechnung einer Variablen nach Olsen (2012)

Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Stabilität beim Auftreten von Divergenz ist die Anwendung von Relaxationskoeffizienten. Dabei wird der Startwert der Variable in der Iteration  $i+1$  aus den beiden berechneten Variablen der Iterationen  $i-1$  und  $i$  gebildet. Beispielhaft ist dies nach Olsen (2012) für die Fließgeschwindigkeit in der folgenden Formel beschrieben:

$$v = r \cdot v_i + (1 - r) \cdot v_{i-1} \quad (4.23)$$

Dabei ist  $v$  der Startwert der Fließgeschwindigkeit in der Iteration  $i+1$  und  $r$  der Relaxationskoeffizient.  $v_i$  und  $v_{i-1}$  sind die berechneten Fließgeschwindigkeiten der beiden vorangegangenen Iterationen. Der Relaxationskoeffizient beschreibt somit den Anteil des Variablenwerts der vorangegangen Iteration am Startwert der aktuellen Iteration. Er hat normalerweise einen Wert zwischen 0 und 1. Der Relaxationskoeffizient wird reduziert, wenn Instabilitäten auftreten. Dadurch reduziert sich die Berechnungsgeschwindigkeit. Die Berechnung wird jedoch stabiler (vgl. Olsen 2012).

## 4.7. Ablauf einer numerischen Modellierung

Nach Olsen (2018) besteht eine numerische Strömungsberechnung aus drei Schritten:

- Pre-Processing
- Computations
- Post-Processing

Das „Pre-Processing“ beinhaltet die Erstellung des Berechnungsnetzes und der Eingabedateien. Dabei werden Geometrie und Gitterauflösung, Rauheit und Sedimenteigenschaften festgelegt. Die Art der Berechnung wird gewählt (stationär oder instationär) und bei instationärer Berechnung werden die zeitabhängigen Größen angegeben. Dies sind der Zeitschritt und die inneren Iterationen. Weiterhin werden die Rand- und Anfangsbedingungen definiert. Die Randbedingungen können bei instationären Berechnungen ebenfalls zeitabhängig sein. Zusätzlich werden die zu verwendenden Algorithmen definiert. Diese Angaben werden in SSIIM 1 und SSIIM 2 zum größten Teil über Eingabedateien festgelegt. Ein Teil der Angaben kann über die grafische Benutzeroberfläche (GUI) ausgeführt werden. In SSIIM 2 müssen der Zu- und Abfluss sowie deren räumliche Zuordnung in der GUI festgelegt werden.

Die „Computations“ beschreiben die Berechnungen der Fließgeschwindigkeiten, des Sedimenttransports sowie der Veränderungen der Sohle, des Wasserspiegels und der Wasserqualität, wie sie in den Kapiteln 4.2 und 4.3 erläutert sind. Jede Berechnung wird dabei von einem eigenen Modul in SSIIM ausgeführt. Es besteht die Möglichkeit, mehrere Berechnungen zu kombinieren. So werden in dieser Arbeit die hydrodynamische Berechnung der Fließgeschwindigkeiten und des Wasserspiegels mit der

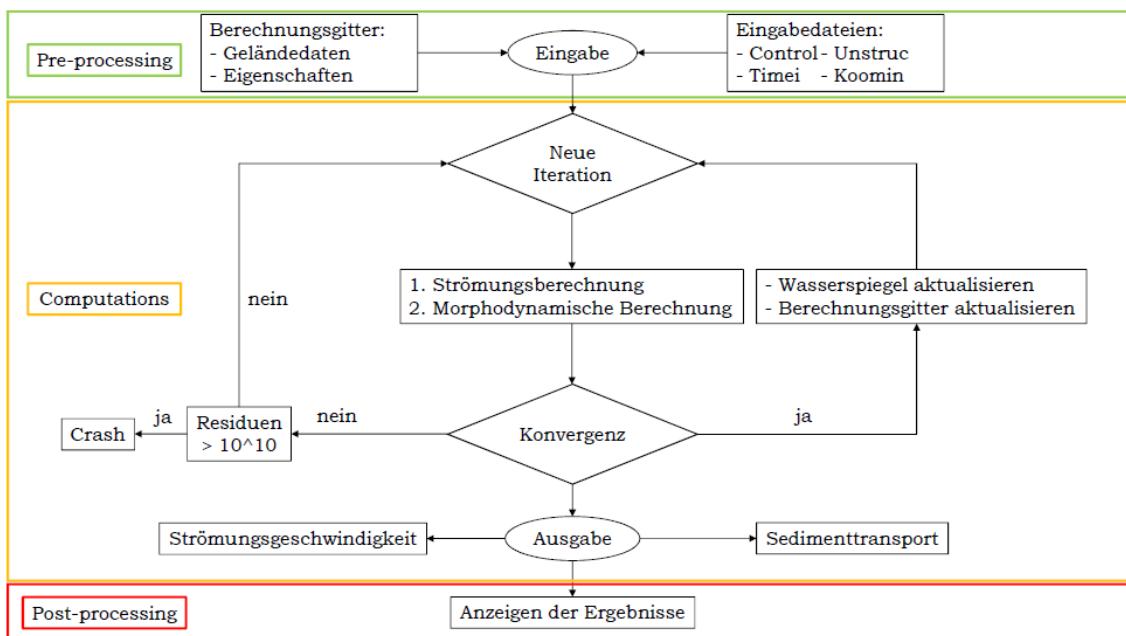
#### 4. Dreidimensionale numerische Modellierung mit SSIIM 1 und SSIIM 2

---

morphodynamischen Berechnung des Sedimenttransports und der Sohlveränderungen kombiniert.

Im „Post-Processing“ werden die Ergebnisse der Berechnungen aufbereitet, betrachtet und interpretiert. SSIIM 1 und 2 verfügen über eigene Grafikmodule zur Ergebnisdarstellung. Alternativ dazu können Nachbearbeitungsprogramme wie Tecplot oder Paraview verwendet werden. Entsprechende Ausgabedateien für diese Softwares können mit SSIIM generiert werden. In dieser Arbeit wird die Software Paraview zur Betrachtung des dreidimensionalen Spülkegels verwendet.

Abbildung 4.10 zeigt das Schema eines instationären Berechnungsverfahrens in SSIIM nach Saam (2018). Nach dem Pre-Processing beginnt die erste Iteration, bestehend aus einer Strömungsberechnung und einer morphodynamischen Berechnung. Sind die Konvergenzkriterien erfüllt (vgl. Kapitel 4.6), wird die Lage des Wasserspiegels aktualisiert und eine neue Iteration eingeleitet. in SSIIM 2 wird außerdem das unstrukturierte Gitter aktualisiert. Sind die Konvergenzkriterien nicht erfüllt, kommt es entweder zum Abbruch der Simulation oder zu einer neuen Iteration nach Durchlauf aller inneren Iterationen, deren Anzahl im Pre-Processing festgelegt wird. Ein Abbruch erfolgt, falls eines der Residuen einen Wert größer als  $10^{10}$  aufweist.

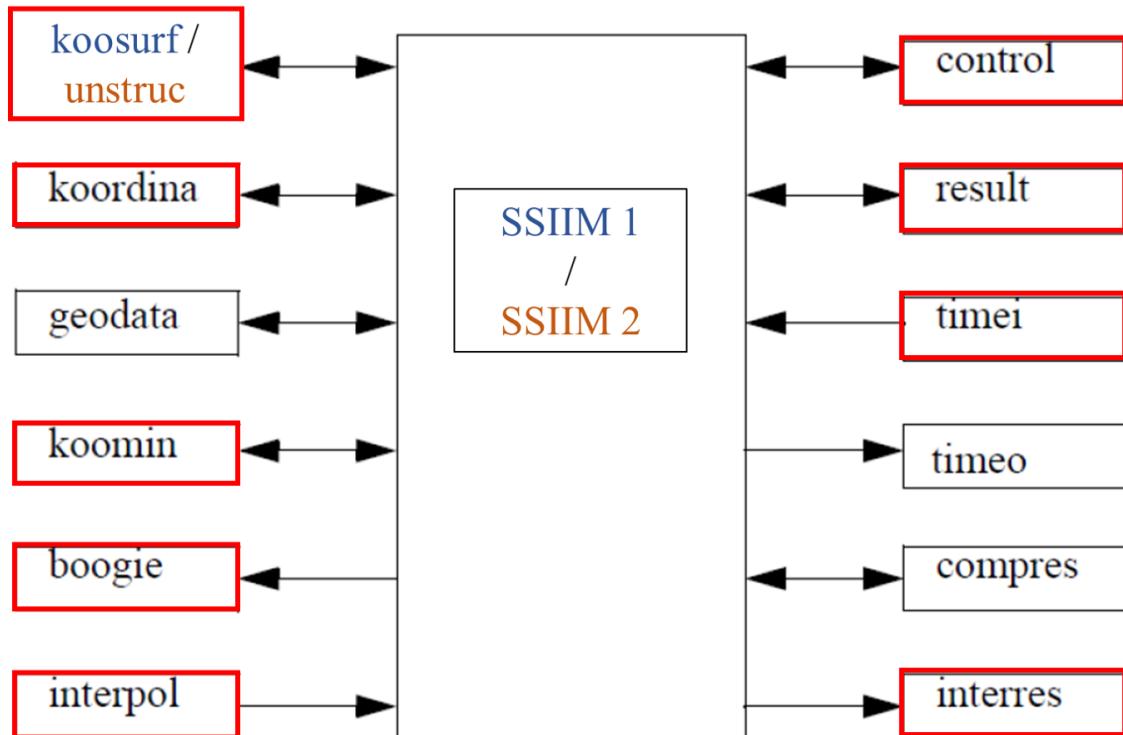


**Abbildung 4.10.:** Schema eines instationären Berechnungsverfahrens (Saam 2018)

Nach Durchlauf aller Iterationen erfolgt die Ausgabe der Fließgeschwindigkeiten und des Sedimenttransports. Die Ergebnisse werden anschließend im Post-Processing ausgewertet.

## 4.8. Die Dateienstruktur in SSIIM 1 und SSIIM 2

Die Struktur aus Ein- und Ausgabedateien in SSIIM 1 und SSIIM 2 ist in Abbildung 4.11 zu sehen. Der einzige Unterschied in der Dateienstruktur zwischen den beiden Softwares besteht darin, dass SSIIM 2 die unstruc-Datei anstelle der koordina-Datei verwendet. Ein Doppelpfeil im Schema bedeutet, dass die Dateien sowohl von SSIIM erzeugt als auch in SSIIM eingelesen werden können. Ein Pfeil von der Software zur Datei bezeichnet eine Ausgabedatei. Ein Pfeil von der Datei zur Software bezeichnet eine Eingabedatei. Die in dieser Arbeit verwendeten Dateitypen sind in rot markiert. Sie sind in Olsen (2018) beschrieben und werden im Folgenden näher erläutert:



**Abbildung 4.11.:** Dateienstruktur in SSIIM nach Olsen (2018)

**boogie** Die boogie-Datei ist eine Ausgabedatei. Sie beinhaltet einen Ausdruck der Zwischenresultate der Berechnungen. Darüber hinaus beinhaltet sie Parameter wie mittlere Fließgeschwindigkeit, Schubspannung und Wassertiefe im Ausgangszustand sowie die Korngrößenverteilung. Fehlermeldungen werden in diese Datei geschrieben, insofern das Programm die Simulation abbricht.

**control** Die control-Datei beinhaltet die meisten der Parameter, die das Programm benötigt. Hierzu gehören die Daten des Berechnungsnetzes. Für die Berechnung des Wasserspiegels im Anfangszustand ist hier die Vorgabe eines unterstromigen Wasserspiegels, des Abflusses und der Rauheit notwendig. Existiert keine control-Datei, muss der Benutzer diese Daten in einer Dialogbox in SSIIM eingeben und die control-Datei wird vom Programm selbst erzeugt. Darüber hinaus können in der control-Datei weitere Parameter verändert oder Algorithmen eingebaut werden. Dies erfolgt über den Einbau von Datensätzen. Ein Datensatz besteht dabei jeweils aus einem Großbuchstaben und einer Nummer. So werden zum Beispiel im F11-Datensatz die Sedimentdichte und der Shields-Koeffizient angegeben. Die control-Datei kann über einen gewöhnlichen Editor erstellt werden und wird von SSIIM automatisch eingelesen.

**koordina, koomin und koosurf** Die koordina-Datei beinhaltet die Sohle der Geometrie mit einem strukturierten Gitter in SSIIM 1. Für jeden Knoten des Gitters wird dabei dessen Lage in x-, y- und z-Richtung angegeben. Es ist möglich, eine zweite z-Koordinate anzugeben. Diese beinhaltet den Wasserspiegel. In SSIIM 2 beinhaltet die koordina-Datei immer beide z-Koordinaten. Die x-Richtung verläuft in Strömungsrichtung, die y-Richtung von der rechten Kanalseite zur linken und die z-Richtung von unten nach oben. Die Nummerierung der Netzlinien beginnt mit der Zahl 1. Die Nummerierung der Zellen beginnt jedoch mit der Zahl 2.

Die Daten in der koordina-Datei definieren eine Oberfläche. Durch Generierung einer koomin-Datei mit dem exakt selben Format wird die darin enthaltene Oberfläche als minimale Erhebung der Sohlhöhe angesehen. Damit erfolgt keine Erosion der Sohle unterhalb der in der koomin-Datei angegebenen z-Koordinaten. Die koordina- und die koomin-Datei können gleichzeitig verwendet werden.

Die koosurf-Datei wird von SSIIM 1 am Ende der Berechnung ausgegeben. Sie ist

identisch zur koordina-Datei, beinhaltet aber zusätzlich den Wasserspiegel für jeden Gitterpunkt. Sie kann auch von SSIIM 1 eingelesen werden.

**unstruc** Die unstruc-Datei wird nur von SSIIM 2 verwendet. Sie enthält die geometrischen Daten und die Koordinaten aller Netzlinien und deren Kreuzungspunkte, Verbindungen zwischen Zellen und Zellen sowie zwischen Zellen und Oberflächen. Außerdem werden Informationen über den Zu- und Abfluss sowie die Wasserqualität in der unstruc-Datei gespeichert. Aufgrund des unstrukturierten Netzes in SSIIM 2 ist die unstruc-Datei sehr komplex. Sie muss daher nach der Netzerstellung in SSIIM 2 von der Software selbst generiert werden.

**result** Diese Datei enthält die Resultate der Strömungsberechnung. Die result-Dateien von SSIIM 1 und SSIIM 2 unterscheiden sich in ihrer Struktur und sind somit nicht untereinander kompatibel. Die result-Datei wird vom Programm geschrieben, wenn die vorher festgesetzte Anzahl an Iterationen beendet wurde oder die Lösung konvergiert ist. Sie enthält die Geschwindigkeiten in allen drei Richtungen,  $\kappa$ ,  $\epsilon$ , den Druck sowie die Strömung durch alle Wände der Zellen. Darüber hinaus werden die Residuen, die verwendeten Rauheiten und die Netzgröße dargestellt. Result-Dateien können von der Software eingelesen werden, um eine neue Simulation mit dem vorherigen Resultat zu starten.

**interpol und interres** In der interpol-Datei werden die Koordinaten für Profile festgelegt. Für diese Profile werden je nach Spezifikation im F48-Datensatz in der control-Datei die vertikalen Strömungsprofile und Turbulenzen, die Sedimentkonzentration oder die Sohlhöhe in der interres-Datei ausgegeben. In dieser Arbeit werden die interpol- und interres-Dateien zur Auswertung der Sohlhöhe des Spülkegels verwendet.

**timei** Die timei-Datei ist relevant für instationäre numerische Strömungsberechnungen. Sie ist eine Eingabedatei, in der zeitliche Veränderungen des Abflusses, des Wasserspiegels und der Sedimentkonzentration vorgegeben werden können.



# **5. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM**

## **1**

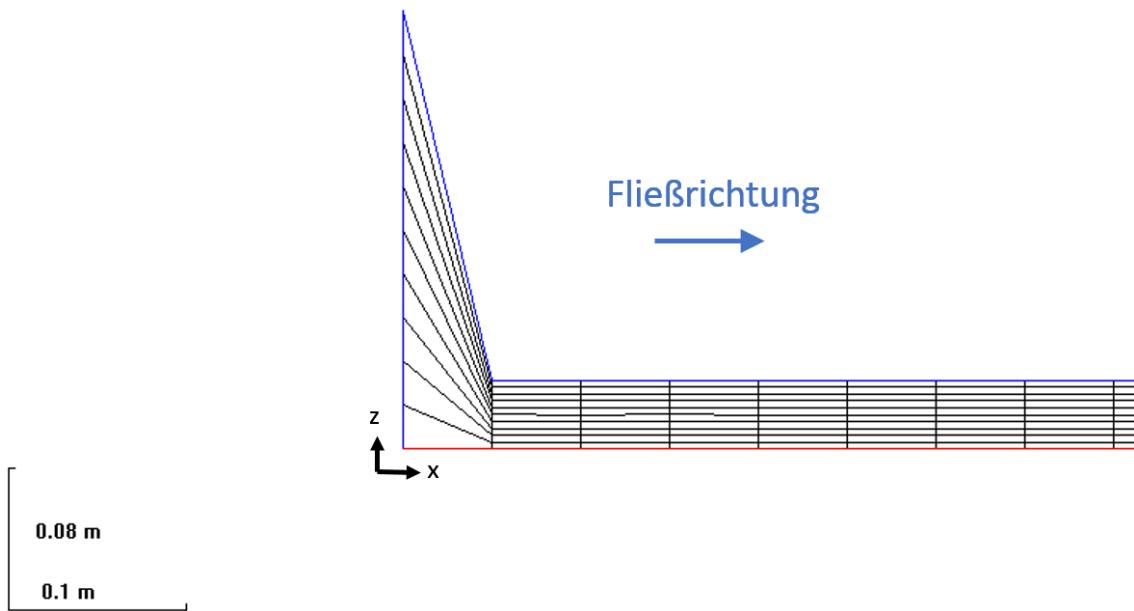
Dieses Kapitel beinhaltet die Simulation des in Kapitel 3 beschriebenen Laborversuchs zur Bestimmung des Spülkegels bei Stauraumspülungen in SSIIM 1. Die Simulation wird zunächst ohne den Einbau der Sedimentschicht durchgeführt. Daraus werden zwei Varianten zur Simulation des absinkenden Wasserspiegels entwickelt und diese mit dem Einbau der Sedimentschicht kombiniert. Zusätzlich wird eine dritte Variante der Simulation entwickelt, bei der die Gesamtsimulation in mehrere Einzelsimulationen mit unterschiedlichen Wasserständen aufgeteilt wird. Die Simulationsergebnisse werden ausgewertet, miteinander verglichen und interpretiert. Anschließend wird ein Softwaretest zur Kombination der beiden vorher entwickelten Varianten durchgeführt und eine Untersuchung zur Asymmetrie des Spülkegels eingeleitet.

### **5.1. Simulation des absinkenden Wasserspiegels**

Der Wasserspiegel im Laborversuch sinkt während der 130-sekündigen Durchführung von 25 cm auf 16 cm ab. Grund dafür ist der nicht vorhandene Zufluss im Oberwasser bei gleichzeitigem Abfluss des Wassers durch das Schütz. Hinter dem Schütz befindet sich ein Auslaufbereich von 4 m Länge mit horizontaler Sohle (vgl. Kapitel 3.2). Es wird zunächst versucht, diese Situation in SSIIM 1 ohne den Einbau der Sedimentschicht zu simulieren. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden nicht ausgewertet. Es werden lediglich das Vorgehen zur Simulation des absinkenden Wasserspiegels und die dabei auftretenden Einschränkungen und notwendigen Modifizierungen in SSIIM 1 dargelegt.

### 5.1.1. Festlegung des zu simulierenden Bereichs

SSIIM 1 berechnet den initialen Wasserstand mit einer Backwater-Calculation (vgl. Kapitel 4.2.4). Hierzu müssen der Unterwasserspiegel, der Abfluss und der Strickler-Beiwert im W1-Datensatz als Randbedingungen vorgegeben werden. Eine Simulation ohne diese Angaben ist in SSIIM 1 nicht möglich. In der timei-Datei besteht die Möglichkeit, den Abfluss und den Wasserstand im Ober- und Unterwasser in Abhängigkeit der Zeit vorzugeben. Der Wasserstand im Auslauf hinter dem Schütz ist nicht bekannt, da hier keine Messungen vorgenommen werden. Daher wird zunächst versucht, einen angenommenen Unterwasserstand von 3 cm im Auslauf zu simulieren. Werden jedoch ein Unterwasserstand von 3 cm und ein Oberwasserstand von 25 cm als initiale Randbedingungen vorgegeben, so befindet sich der Sprung im Wasserspiegel nicht im Bereich des Schützes, sondern zwischen dem ersten und zweiten Querschnitt in x-Richtung (vgl. Abbildung 5.1). Grund dafür ist die Backwater-Calculation, die die initialen Wasserstände in allen Querschnitten rückwärts auf der Grundlage des Wasserstands im Unterwasser (letzter Querschnitt in x-Richtung) berechnet. Lediglich der Wasserstand im Oberwasser (erster Querschnitt in x-Richtung) beträgt



**Abbildung 5.1.:** Längsschnitt mit Sprung im Wasserspiegel zwischen erstem und zweitem Querschnitt

die als initiale Randbedingung vorgegebenen 25 cm. Damit ist eine Simulation des Auslaufbereichs in SSIIM 1 nicht möglich. Stattdessen wird lediglich der initial mit Wasser gefüllte Bereich des Kanals von 8,00 m mal 0,61 m mit dem mittigen Schütz von 5,0 mal 5,0 cm simuliert.

### 5.1.2. Gittergenerierung

Für die Berechnung wird ein Gitter mit einer Zellgröße von 5,0 cm mal 2,5 cm gewählt. Dies entspricht 160 Zellen in Längsrichtung und 24 Zellen in Querrichtung. In vertikaler Richtung werden 10 Zellen festgelegt. Die Zellen haben damit initial eine Höhe von 2,5 cm bei einem Wasserstand von 25 cm. Die Zellhöhe ändert sich jedoch proportional zum absinkenden Wasserspiegel.

### 5.1.3. Rauheit und Berechnung des Wasserspiegels

Der zu simulierende Kanal besteht aus Glas. Aufgrund der glatten Oberfläche wird für die Rauheit daher ein Strickler-Beiwert von  $100 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  festgelegt (vgl. Bauformel Verlag GmbH 2019). Dies entspricht nach Formel 4.10 einer äquivalenten Sandrauheit von  $3,09 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ . Der Wert für die Rauheit gilt an der Sohle und an den Wänden.

Zur Berechnung des Wasserspiegels wird der Pressure-Bernoulli-Algorithmus verwendet (vgl. Kapitel 4.2.4). Dieser wird über den F36 2-Datensatz in der control-Datei implementiert. SSIIM 1 fordert die Eingabe eines Abflusses zur Berechnung des initialen Wasserstandes. Damit ist es nicht möglich, eine Simulation ohne Zufluss durchzuführen, wie es im Laborversuch der Fall ist. Eine Vorgabe von 0 l/s als Zufluss in der timei-Datei führt zu einem Abbruch der Simulation.

### 5.1.4. Einbau des Schützes

In SSIIM 1 sind standardmäßig der komplette oberstromige Querschnitt als Zuflussbereich und der komplette unterstromige Querschnitt als Abflussbereich definiert. Der Zuflussquerschnitt wird bei dieser Berechnung nicht verändert. Zur Beschränkung des Abflussquerschnitts auf weniger Zellen können in SSIIM 1 zusätzliche Wände über W4-Datensätze definiert werden. Der Abfluss in dieser Simulation soll lediglich

## 5. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 1

---

über den Bereich des Schützes von 5,0 mal 5,0 cm erfolgen. Hierzu werden drei W4-Datensätze benötigt:

- Wand rechts der Schützöffnung: horizontal: Zellen Nr. 2 bis 12 ( $y=0,0$  cm bis  $y=27,5$  cm); vertikal: Zellen Nr. 2 bis 11 ( $z=0,0$  cm bis  $z=25,0$  cm)
- Wand links der Schützöffnung: horizontal: Zellen Nr. 15 bis 25 ( $y=32,5$  cm bis  $y=60,0$  cm); vertikal: Zellen Nr. 2 bis 11 ( $z=0,0$  cm bis  $z=25,0$  cm)
- Wand über der Schützöffnung: horizontal: Zellen Nr. 13 und 14 ( $y=27,5$  cm bis  $y=32,5$  cm); vertikal: Zellen Nr. 4 bis 11 ( $z=5,0$  cm bis  $z=25,0$  cm)

Es ist zu beachten, dass die Wände über Zellen, nicht über Koordinaten definiert werden. Somit führt eine Absenkung des Wasserspiegels von 25 cm auf 16 cm theoretisch proportional dazu zu einer Verringerung der Schützöffnung von ursprünglich 5 cm auf 3,2 cm. In horizontaler Richtung erfolgt keine Veränderung der Zellbreite während der Simulation.

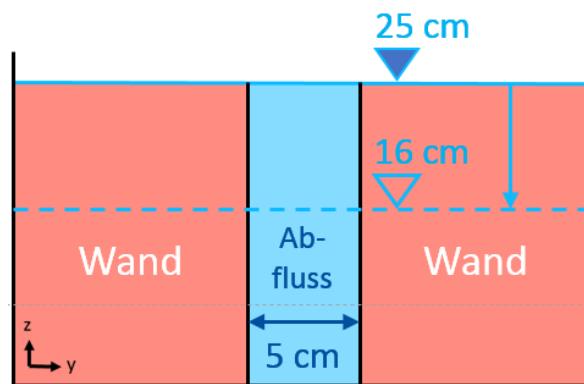
Bei der Simulation mit dem Einbau aller o.g. Wände wird festgestellt, dass trotz entsprechender Vorgaben in der timei-Datei kein Absinken des Wasserspiegels stattfindet. Der Wasserspiegel bleibt konstant bei 25 cm während der gesamten Simulation. Durch punktuelle Veränderungen der Datensätze in der control-Datei wird schließlich festgestellt, dass der Einbau der Wände dazu führt, dass die Absenkung des Wasserspiegels nicht mehr ausgeführt wird. Grund dafür ist vermutlich das Abschneiden der Verbindung zum Unterwasser beim Einbau aller drei W4-Datensätze. Werden nur zwei der drei o.g. Datensätze verwendet, funktioniert die Absenkung.

### 5.1.5. Entwicklung zweier Simulationsvarianten

Aufgrund der Inkompatibilität zwischen dem Einbau der W4-Datensätze und dem Absinken des Wasserspiegels ist es nicht möglich, die Laborbedingungen mit SSIIM 1 exakt wiederzugeben. Es kann entweder das Absinken des Wasserspiegels oder die Geometrie des Schützes korrekt wiedergegeben werden. Daher werden zwei verschiedene Varianten zum Umgang mit dieser Problematik entwickelt.

### 5.1. Simulation des absinkenden Wasserspiegels

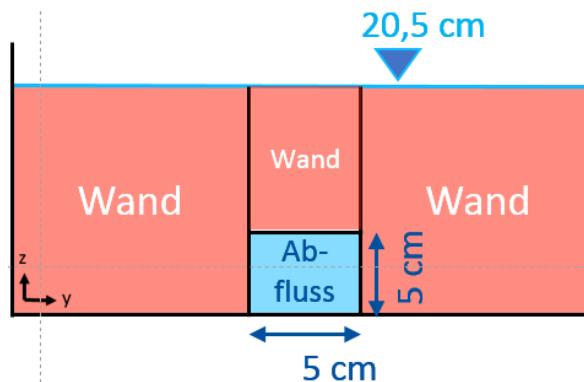
---



**Abbildung 5.2.:** Schema zur Verdeutlichung der Simulation bei Variante 1

**Tabelle 5.1.:** Zufluss, Abfluss und Wasserstand in der timei-Datei von Variante 1

Zeitpunkt	Zufluss	Abfluss	Wasserstand
t = 0 s	0,50 l/s	3,91 l/s	25,0 cm
t = 130 s	0,50 l/s	3,11 l/s	16,0 cm



**Abbildung 5.3.:** Schema zur Verdeutlichung der Simulation bei Variante 2

**Tabelle 5.2.:** Zufluss, Abfluss und Wasserstand in der timei-Datei von Variante 2

Zeitpunkt	Zufluss	Abfluss	Wasserstand
t = 0 s	3,52 l/s	3,52 l/s	20,5 cm
t = 130 s	3,52 l/s	3,52 l/s	20,5 cm

**Variante 1** simuliert den absinkenden Wasserspiegel entsprechend der Laborbedingungen. Der Abfluss erfolgt auf einer Breite von 5 cm im Zentrum des Kanals. Dies entspricht der Breite des Schützes aus dem Laborversuch. Jedoch wird die gesamte Höhe des Wasserspiegels als abflusswirksam definiert. Ein Schema dieser Simulation ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Tabelle 5.1 zeigt die in der timei-Datei festgelegten Wasserstände, Zuflüsse und Abflüsse. Die Abflüsse entsprechen der Wasserstands-Abfluss-Beziehung des Schützes (vgl. Abbildung 3.4). Der Zufluss wird so gering wie möglich gehalten, um die Laborbedingung ohne Zufluss möglichst genau zu erfüllen. Der Wert von 0,5 l/s ist so gewählt, dass es im Programm nicht zum Abbruch der Simulation aufgrund eines Fehlers in der Kontinuität kommt.

**Variante 2** modelliert einen konstanten Wasserstand von 20,5 cm über den gesamten Verlauf der Simulation. Dies entspricht dem Mittelwert aus dem Wasserstand zu Beginn des Laborversuchs (25 cm) und zum Ende des Laborversuchs (16 cm). Der Abfluss erfolgt durch einen Querschnitt von 5,0 mal 5,0 cm im Zentrum des Kanals. Dies entspricht der Öffnungsweite des Schützes aus dem Laborversuch. Ein Schema dieser Simulation ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Tabelle 5.2 zeigt die in der timei-Datei festgelegten Wasserstände, Zuflüsse und Abflüsse. Die Abflüsse entsprechen dem Abfluss durch das Schütz bei einem Wasserstand von 20,5 cm gemäß der Wasserstands-Abfluss-Beziehung des Schützes (vgl. Abbildung 3.4). Da der Wasserstand im Becken über die Zeit der Simulation konstant bleibt, wird der Zufluss hier gleich dem Abfluss gesetzt. Somit ist die Simulation physikalisch korrekt.

## 5.2. Durchführung der Simulationen mit initialer Sedimentschicht

Im nächsten Schritt werden die Simulationen mit dem Einbau der Sedimentschicht vorgenommen. Für die Festlegung des Wasserspiegels und der Zu- und Abflüsse werden hierzu die in Kapitel 5.1.5 entwickelten Varianten verwendet.

### 5.2.1. Einbau der Sedimentschicht

Der Einbau der Sedimentschicht erfolgt über die gleichzeitige Verwendung der koordina- und der koomin-Datei. In der koordina-Datei werden dabei die initialen Sohlhöhen für jeden Gitterpunkt festgelegt. So wird die 10 cm starke Sedimentschicht in SSIIM 1 in der Ebene  $z=0,10$  m eingebaut. Die koomin-Datei legt den Boden des Glaskanals fest. Hier werden an jedem Gitterpunkt die z-Koordinaten festgelegt, bis zu der die Sohle erodiert werden kann. In den hier durchgeföhrten Simulationen steht die Ebene  $z=0$  für den horizontalen Boden des Glaskanals.

### 5.2.2. Rauheit

Die Festlegung der Rauheit erfolgt über die Kombination der bedrough-Datei mit dem F16-Datensatz der control-Datei. Wird diese Kombination verwendet, so wird die im F16-Datensatz verwendete Rauheit lediglich für die Wände definiert, während die Rauheit in der Sohle über die bedrough-Datei definiert wird (vgl. Olsen 2018). Im F16-Datensatz wird die in Kapitel 5.1.3 beschriebene äquivalente Sandrauheit von  $3,09 \cdot 10^{-4}$  m für den Glaskanal festgelegt. In der bedrough-Datei wird für jeden Gitterpunkt die Rauheit in der Sohle ebenfalls in Form der äquivalenten Sandrauheit angegeben. Diese kann für das verwendete uniforme granulatartige Material nach van Rijn berechnet werden (vgl. Olsen 2018):

$$k_s = 3 \cdot d_{90} \quad (5.1)$$

Aufgrund der uniformen Kornverteilung des Materials kann angenommen werden, dass  $d_{90}$  dem charakteristischen Korndurchmesser von 2,4 mm entspricht (vgl. Tabelle 3.1). Damit beträgt die äquivalente Sandrauheit des Materials  $7,2 \cdot 10^{-3}$  m. Aufgrund der gleichmäßigen Verteilung der Sedimente im Laborversuch wird dieser Wert für jeden Gitterpunkt der Sohle als Rauheit definiert.

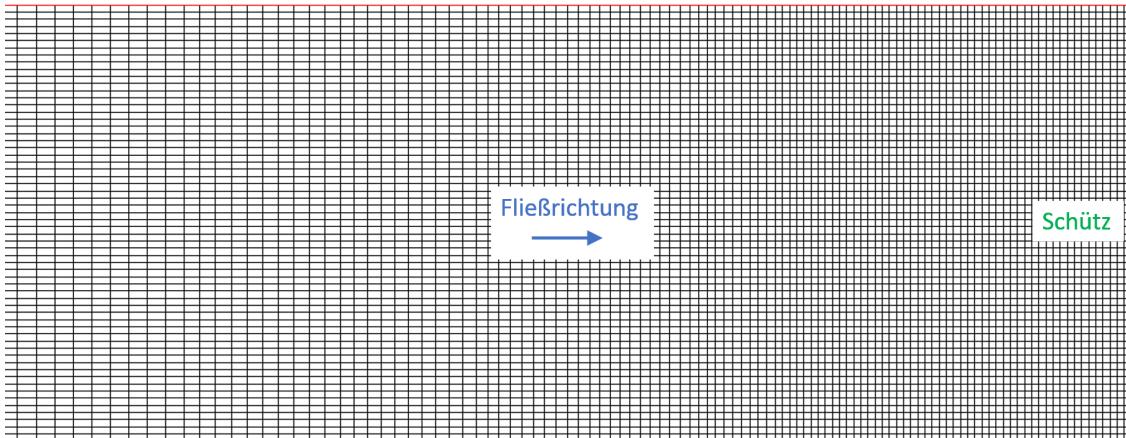
### 5.2.3. Gittergenerierung

Das in Kapitel 5.1.2 verwendete Gitter wird im Bereich des Schützes verfeinert. Das Becken oberhalb des Schützes ist 8 m lang. Davon sind jedoch hauptsächlich

## 5. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 1

---

die 50 cm unmittelbar vor dem Schütz relevant. Hier bildet sich der Spülkegel aus. Daher werden die Zellen im Grundriss in diesem Bereich auf 1,0 cm mal 1,0 cm verkleinert, um eine höhere Auflösung und somit genauere Berechnungsergebnisse zu generieren. Im Bereich von  $x=0$  m bis  $x=7,50$  m kann eine größere Zellaufösung gewählt werden, da hier keine relevanten Informationen benötigt werden. Um das Ausdehnungsverhältnis (vgl. Kapitel 4.5.2) einzuhalten, haben die Zellen von  $x=0$  m bis  $x=5,30$  m eine Länge von 5,0 cm und werden anschließend sukzessiv verkürzt, sodass das Ausdehnungsverhältnis jeweils kleiner als 1,2 ist. Die Breite der Zellen beträgt dabei immer 1,0 cm. Somit ist das Seitenverhältnis immer kleiner als 5. Aufgrund der gleichbleibenden Breite der Zellen ist auch das Orthogonalitätskriterium eingehalten. Das Gitter besteht insgesamt aus 246 Zellen in x-Richtung und 61 Zellen in y-Richtung. Ein Ausschnitt des verwendeten Gitters ist in Abbildung 5.4 zu sehen. Der Abschnitt zeigt die sukzessive Verkürzung der Zellen in Strömungsrichtung (von links nach rechts) bis vor dem Schütz. Alle Zellen oberstrom dieses Abschnitts haben dieselbe Größe wie die Zellen auf der linken Seite der Abbildung. In vertikaler Richtung wird das Berechnungsgebiet in 10 Zellen aufgeteilt. Das Berechnungsgitter befindet sich immer zwischen Sohle und Wasserspiegel. Die Höhe der Zellen variiert damit abhängig vom Wasserstand und der Sohlhöhe.



**Abbildung 5.4.:** Sukzessive Verfeinerung des Berechnungsgitters in Strömungsrichtung bis hin zum Schütz

### 5.2.4. Parameter der hydrodynamischen Modellierung

Die in diesem Kapitel verwendeten Parameter sind in Kapitel 4.2 näher erläutert. Zur Berechnung der Geschwindigkeitsfelder wird ein Zeitschritt von einer Sekunde gewählt. Die Gesamtzahl an Zeitschritten beträgt damit 130, sodass die Dauer der Stauraumspülung im Laborversuch entspricht. Pro Zeitschritt werden zunächst maximal 50 innere Iterationen durchgeführt. Sind alle Residuen bereits vor der Durchführung aller inneren Iterationen kleiner als das Konvergenzkriterium von 0,001, so wird direkt der nächste Zeitschritt eingeleitet.

Zur Berechnung des Wasserspiegels wird der Pressure-Bernoulli-Algorithmus verwendet. Die dazugehörige Referenzzelle befindet sich in der Mitte des unterstromigen Abflussquerschnitts und an der Wasseroberfläche. Der Wasserspiegel wird in jedem Zeitschritt aktualisiert. Der zugehörige Relaxationskoeffizient beträgt zunächst 0,5. Das Konvergenzkriterium beträgt 0,001.

Wandgesetze werden in dieser Simulation an der Sohle und an den Wänden angewandt. An der Wasseroberfläche hingegen wird ein Null-Gradient festgelegt. Die Relaxationskoeffizienten betragen zunächst 0,8 für die Geschwindigkeiten in x-, y- und z-Richtung, 0,1 für die Korrektur des Druckterms und 0,5 für die turbulenten Terme  $\kappa$  und  $\epsilon$ . Darüber hinaus wird eine Blockkorrektur zur Beschleunigung des Lösungsverfahrens verwendet.

### 5.2.5. Parameter der morphodynamischen Modellierung

Die in diesem Kapitel verwendeten Parameter sind in Kapitel 4.3 näher erläutert. Die Parameter Dichte, Korndurchmesser, Reibungswinkel und Sinkgeschwindigkeit werden entsprechend Tabelle 3.1 implementiert. Zur Berechnung des Sedimenttransports wird zunächst die Formel für den Schwebstofftransport nach van Rijn verwendet.

Der Shields-Koeffizient wird zunächst standardmäßig mit 0,047 angesetzt. Da es bei diesem Wert des Koeffizienten jedoch zu keiner Erosion kommt, wird er auf 0,03 angepasst. Für den Wasseranteil in der Sedimentschicht wird der in SSIIM 1 standardmäßig implementierte Wert von 50 % gewählt. Die kritischen Schubspannungen auf geneigter Sohle werden entsprechend dem F7 B-Algorithmus reduziert. Außerdem wird der Sand-Slide-Algorithmus angewandt.

Für die Berechnung des Sedimenttransports werden 50 innere Iterationen bei einem

## 5. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 1

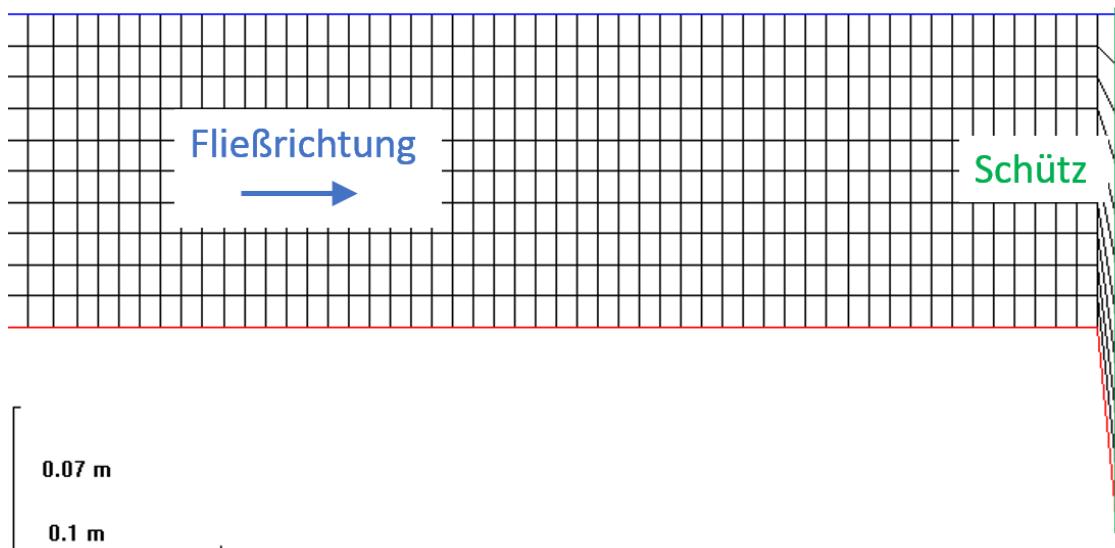
---

Konvergenzkriterium von  $1 \cdot 10^{-5}$  in der Simulation implementiert. Der Relaxationskoeffizient beträgt dabei 0,8.

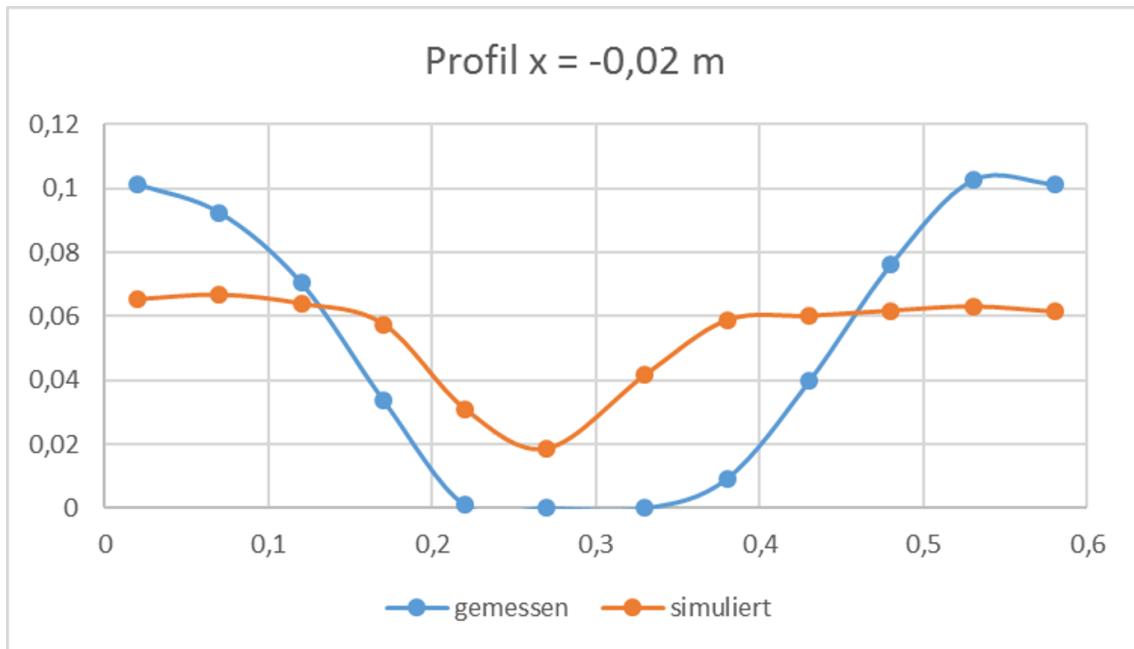
### 5.2.6. Anpassung der Sedimentschicht im Bereich des Schützes

Im Laborversuch wird die gläserne Kanalsohle bis unmittelbar vor dem Schütz mit einer 10 cm starken Sedimentschicht bedeckt. Das Schütz wird dort von der Sedimentschicht blockiert. In SSIIM befindet sich das Berechnungsgitter jedoch nur im Bereich zwischen der Sohle (Oberkante der Sedimentschicht) und der Wasseroberfläche. Die Festlegung des Abflussquerschnitts erfolgt über die Angabe von Zellen im Berechnungsgitter. Somit kann das blockierte Schütz in SSIIM nicht exakt modelliert werden.

Daher wird die Sedimentschicht zunächst nur bis zum vorletzten Querschnitt in Fließrichtung eingebaut. Abbildung 5.5 zeigt einen Längsschnitt in der Mitte des Kanals bei einer Simulation der Variante 1. Auf der rechten Seite ist die Anpassung der Sohle (hier rot dargestellt) in der letzten Zelle vor dem Schütz zu sehen. Die Aussparung der Sedimentschicht in der letzten Zelle erfolgt dabei über die gesamte Breite. So wird ermöglicht, dass der Abfluss durch den Schützquerschnitt erfolgen kann und sich ein Spülkegel ausbildet.



**Abbildung 5.5.:** Anpassung der Sedimentschicht im Bereich des Schützes



**Abbildung 5.6.:** Querschnitt des gemessenen (blau) und simulierten (orange) Spülkegels 2 cm vor dem Schütz

Die Aussparung der Sedimentschicht führt jedoch zu erhöhten Erosionen an den Seiten unmittelbar vor dem Schütz. Hierzu zeigt Abbildung 5.6 den simulierten Querschnitt durch den Spülkegel an der Stelle  $x=-0,02$  m (2 cm vor dem Schütz) im Vergleich zu den Messwerten des Spülkegels aus dem Laborversuch. Die Überschätzung der Erosion an den Seiten ist hier deutlich erkennbar.

Um dies zu vermeiden, wird die Aussparung der Sedimentschicht nur auf den Bereich unmittelbar vor dem Schütz reduziert. Damit wird die Sedimentschicht nur in den Zellen Nr. 30 bis 34 ausgespart. Dieser Versuch führt jedoch zu einem Abbruch der Simulation aufgrund von hohen Residuen in den ersten Zeitschritten. Die Methode wird daher nicht weiter verfolgt.

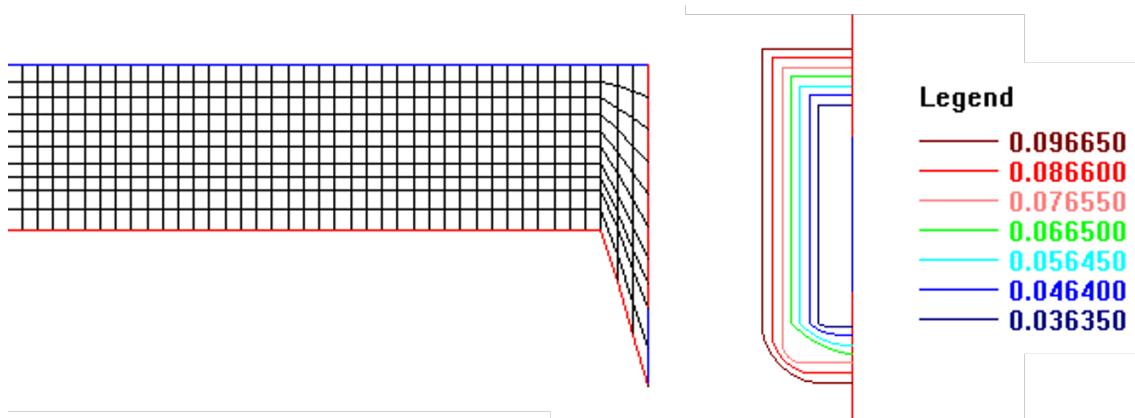
Daraufhin wird ein Startkegel als Anfangsbedingung vor dem Schütz eingebaut. Gleichzeitig werden die Relaxationskoeffizienten für die Fließgeschwindigkeiten von 0,8 auf 0,4, für die Druckkorrektur von 0,1 auf 0,05 sowie für die turbulenten Terme  $\kappa$  und  $\epsilon$  von 0,5 auf 0,2 verringert. Der Relaxationskoeffizient zur Berechnung des Wasserspiegels wird von 0,5 auf 0,3 verringert. Der Relaxationskoeffizient der Berechnung des Sedimenttransports wird ebenfalls von 0,8 auf 0,4 reduziert. Gleichzeitig werden

## 5. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 1

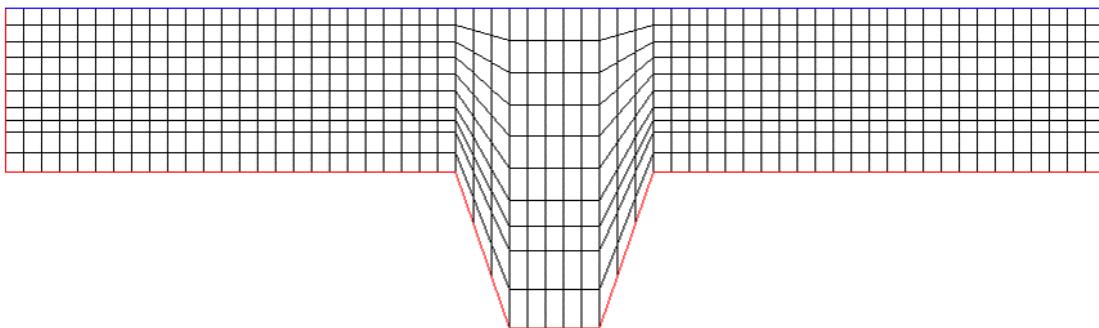
---

die inneren Iterationen der hydrodynamischen und der morphodynamischen Berechnung von 50 auf 100 erhöht. Alle Konvergenzkriterien werden auf 0,01 verringert. Als Transportformel werden nun sowohl die Formel für den Geschiebetransport als auch die Formel für den Schwebstofftransport nach van Rijn verwendet. Ziel dieser Maßnahmen ist die Erhöhung der Stabilität der Berechnung, um einen Abbruch wie in der o.g. Simulation zu vermeiden.

Die Abbildungen 5.7 und 5.8 zeigen einen Längsschnitt in der Mitte, eine Draufsicht und einen Querschnitt unmittelbar am Schütz durch den Startkegel. Eine Zelle ist dabei jeweils 1 cm breit und 1 cm lang. Die Abbildungen zeigen den Startkegel beispielhaft bei der Simulation mit Variante 2. Er wird jedoch analog auch bei den



**Abbildung 5.7.:** Längsschnitt und Draufsicht des eingebauten Startkegels zur Anpassung der Sedimentschicht im Bereich des Schützes



**Abbildung 5.8.:** Querschnitt des eingebauten Startkegels zur Anpassung der Sedimentschicht im Bereich des Schützes

Simulationen mit Variante 1 und Variante 3 (vgl. Kapitel 5.2.7) eingebaut.

Bei Anwendung des Startkegels mit den o.g. Veränderungen zur Erhöhung der Stabilität kommt es bei beiden Varianten nicht mehr zum Abbruch der Simulation. Die Berechnungen liefern sinnvolle Ergebnisse (vgl. Kapitel 5.3.2). Daher wird der hier dargestellte Startkegel in allen Simulationen verwendet.

### **5.2.7. Aufteilung der Simulation in mehrere Einzelsimulationen**

In Kapitel 5.1.5 werden zwei Simulationsvarianten zur Vorgabe des Wasserspiegels entwickelt. Zusätzlich wird hier nun eine dritte Variante kreiert, die auf der Aufteilung der Gesamtsimulation in mehrere Einzelsimulationen bei verschiedenen Wasserständen beruht.

Zunächst wird die Simulation in fünf Einzelsimulationen eingeteilt. Die Einzelsimulationen A bis E sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Jede Simulation besteht dabei aus 26 Zeitschritten von jeweils 1 s. Der Wasserstand ist konstant und entspricht dem Wasserstand zum mittleren Zeitpunkt der Einzelsimulation, also beispielsweise dem Wasserstand bei 13,5 s in Simulation A. Der Wasserstand wird jeweils aus den Messwerten des zeitlich variierenden Verlaufs des Wasserspiegels während des physikalischen Modellversuchs entnommen. Der Abfluss wird entsprechend der Wasserstands-Abfluss-Beziehung des Schützes implementiert (vgl. Kapitel 3.4). Zur Einhaltung der Kontinuität bei gleichbleibendem Wasserstand in den Einzelsimulationen wird für den oberstromigen Zufluss der gleiche Wert wie für den unterstromigen Abfluss festgelegt.

**Tabelle 5.3.:** Aufteilung der Gesamtsimulation in fünf Einzelsimulationen

Simulation	Zeitschritt von	Zeitschritt bis	Wasserstand	Abfluss	Zellen Schütz	Schützöffnung
A	1	26	24,42 cm	3,86 l/s	5	4,88 cm
B	27	52	22,55 cm	3,71 l/s	6	5,41 cm
C	53	78	20,44 cm	3,52 l/s	6	4,91 cm
D	79	104	18,77 cm	3,37 l/s	7	5,26 cm
E	105	130	16,90 cm	3,19 l/s	7	4,73 cm

## 5. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 1

---

Das Gitter besteht dabei in vertikaler Richtung aus 25 Zellen gleicher Höhe. Mit sinkendem Wasserspiegel reduziert sich also auch die Höhe jeder Zelle. In Einzelsimulation A werden die fünf sohnahen Zellen auf einer Breite von 5 cm, entsprechend der Breite des Schützes im Laborversuch, als abflusswirksam definiert. Dies entspricht einer simulierten Schützöffnung von 4,88 cm bei einem Wasserstand von 24,42 cm. Die Zahl der abflusswirksamen Zellen wird in den darauffolgenden Einzelsimulationen so angepasst (vgl. Tabelle 5.3), dass über die GesamtSimulation eine mittlere Schützöffnung von 5,04 cm vorherrscht. Dies ist der Mittelwert aus den fünf Schützöffnungen in der letzten Spalte der Tabelle.

Zur Durchführung dieser Simulationsvariante müssen die Ergebnisse der vorherigen Einzelsimulation jeweils als Anfangsbedingung in der nächsten Einzelsimulation implementiert werden. Beispielhaft wird dieses Vorgehen hier anhand der Einzelsimulationen A und B erklärt. Dies erfolgt grundsätzlich über die Verwendung der koosurf-Datei. Die koosurf-Datei der Simulation A wird von SSIIM 1 am Ende der Simulation ausgegeben und enthält die Sohlhöhen und damit die Geometrie des Spülkegels zum Zeitpunkt  $t=26$  s. Diese Datei muss nun umbenannt und als koordina-Datei in Simulation B verwendet werden. Damit beginnt Simulation B mit dem Spülkegel aus Simulation A. Bei der Durchführung fällt jedoch auf, dass die alleinige Umbenennung der koosurf- in die koordina-Datei nicht genügt: Zusätzlich muss zunächst die letzte Spalte der koosurf-Datei entfernt werden. Sie enthält die Wasserstände an den einzelnen Knoten, welche in Simulation B allerdings über die timei-Datei vorgegeben werden. Daraüber hinaus müssen einzelne Werte, die kleiner als 0,001 m sind, aus der Spalte der Sohlhöhen in der koosurf-Datei auf den Wert von 0,001 m korrigiert werden. Andernfalls liest SSIIM 1 die koordina-Datei nicht ein und liefert eine Fehlermeldung über zu geringe Werte der Sohlhöhen. Auffällig ist hierbei auch, dass trotz Festlegung der Ebene  $z=0$  als minimale Sohlhöhe in der koomin-Datei (tiefer darf nicht erodiert werden) Sohlhöhen mit geringfügig negativen Werten auftreten. Diese müssen ebenfalls korrigiert werden. Die Korrekturen der koosurf-Datei können in einem Tabellenkalkulationsprogramm wie z.B. Microsoft Excel vorgenommen werden. Außerdem müssen der Wasserstand sowie der Zu- und Abfluss in der timei-Datei von Simulation A auf die Werte der Simulation B angepasst werden. Hinzu kommt noch die Anpassung der abflusswirksamen Zellen in der control-Datei.

Ziel dieses Versuchs ist die noch feinere Aufteilung der Simulation in Einzelsimulationen. Dies soll allerdings nicht händisch wie oben beschrieben, sondern durch ein Skript erfolgen. Aufgrund der oben gennanten notwendigen Veränderungen an den Dateien und Bearbeitung dieser in einem Tabellenkalkulationsprogramm gestaltet sich die Umsetzung in Form eines Skript jedoch als sehr komplex. Daher wird diese Möglichkeit hier nicht weiter verfolgt.

## 5.3. Ergebnisse und Interpretation

### 5.3.1. Methoden zur Auswertung der Ergebnisse

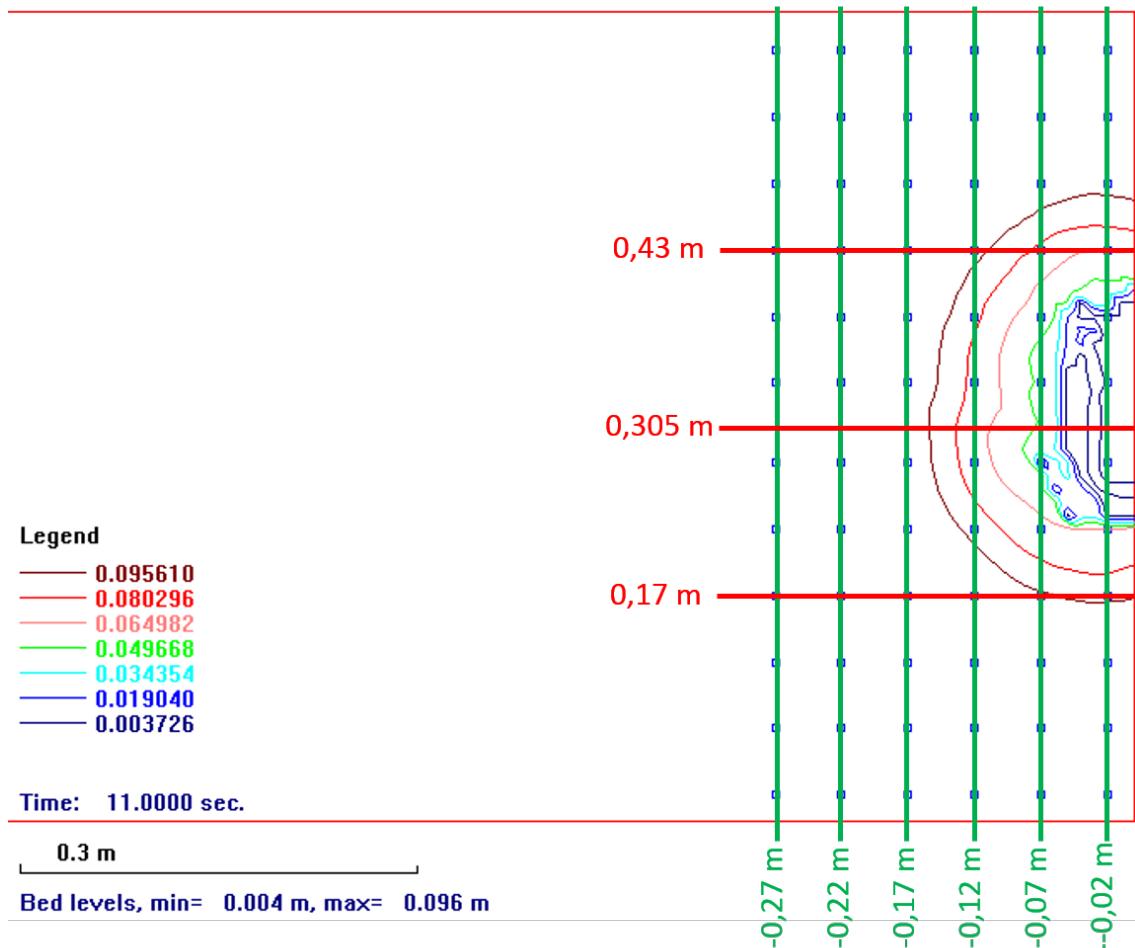
Zur Auswertung der Simulationsergebnisse und zum Vergleich der Spülkegel aus den Simulationen mit dem Spülkegel aus dem Laborversuch werden verschiedene Methoden benutzt:

SSIIM ermöglicht es dem Benutzer, sogenannte interres-Dateien zu generieren. Hierzu werden in der interpol-Datei die Koordinaten der gewünschten Punkte angegeben. Die interpol-Dateien werden in dieser Arbeit so generiert, dass SSIIM dem Benutzer die Sohlhöhen an den in der interpol-Datei vorgebenen Punkten nach Simulationsende ausgibt. Als Punkte werden dabei exakt die 64 Punkte gewählt, an denen die Sohlhöhe auch im Laborversuch gemessen wird (vgl. Kapitel 3.4).

Zur Auswertung der simulierten Spülkegel werden jeweils mehrere Messpunkte zu Quer- und Längsschnitten zusammengefasst, an denen die Sohlhöhen der Simulationen mit denen aus dem Laborversuch verglichen werden können. Die zur Auswertung verwendeten Schnitte sind in Abbildung 5.9 dargestellt. Diese zeigt drei Längsschnitte in rot an den Positionen  $y=0,17\text{ m}$ ,  $y=0,305\text{ m}$  (Dies entspricht der Mitte des Kanals) und  $y=0,43\text{ m}$ . Außerdem sind die sechs Querschnitte an den Positionen  $x=-0,02\text{ m}$ ,  $x=-0,07\text{ m}$ ,  $x=-0,12\text{ m}$ ,  $x=-0,17\text{ m}$ ,  $x=-0,22\text{ m}$  und  $x=-0,27\text{ m}$  in grün dargestellt. Die Messpunkte sind als blaue Quadrate dargestellt. Für die vier äußeren Messpunkte (jeweils zwei pro Seite) in den Querschnitten  $x=-0,22\text{ m}$  und  $x=-0,27\text{ m}$  liegen keine Messwerte aus dem Laborversuch vor. Die Fließrichtung verläuft von links nach rechts, ebenso die x-Koordinate. Die y-Koordinate verläuft von unten nach oben. Der Ursprung befindet sich im Bild unten rechts an der Kanalecke. Der hier dargestellte Spülkegel ist für die Festlegung der Querschnitte nicht relevant. Es handelt sich

## 5. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 1

---



**Abbildung 5.9.:** Quer- und Längsschnitte zur Auswertung der Simulationen

dabei um einen Spülkegel zum Zeitpunkt  $t=11$  s der Berechnung. Es ist somit damit zu rechnen, dass der Kegel noch größer werden wird. Der Kegel ist in Form von Sohlhöhen dargestellt. Für diese gilt die Legende.

Eine weitere Möglichkeit der Auswertung der Simulationen stellt der Root Mean Square Error (RMSE) dar. Er bezeichnet normalerweise die Standardabweichung der Residuen von der Regressionslinie. Der Root Mean Square Error ist ein Mittel, um zu beschreiben, wie stark die beobachteten Werte von den erwarteten Werten abweichen. Er wird wie folgt berechnet (vgl. Statistics How To 2019):

$$RMSE = \sqrt{(f - o)^2} \quad (5.2)$$

Dabei sind  $f$  die beobachteten und  $o$  die erwarteten Werte. Im Fall dieser Arbeit entsprechen die erwarteten Werte den Messwerten aus dem Laborversuch und die beobachteten Werte den Simulationswerten der Sohlhöhe an den 64 Messpunkten. Der RMSE beschreibt also für jede Simulation die Standardabweichung der 64 Simulationswerte von den Messwerten. Er ist damit ein Indikator der Genauigkeit der Simulation. Je kleiner der RMSE, desto genauer die Simulation. Zur Berechnung des RMSE werden in dieser Arbeit die Sohlhöhen in der Einheit [cm] verwendet. Somit hat der RMSE ebenfalls die Einheit [cm].

Bei der Auswertung der Simulationen wird außerdem das Gesamtvolumen des simulierten Spülkegels mit dem Gesamtvolumen des Spülkegels aus dem Laborversuch verglichen. Die Berechnung des Volumens erfolgt dabei näherungsweise über die Erosion  $h_{erodiert,i}$  in [cm] an den 64 Messpunkten und der dem Messpunkt zugeordneten Fläche  $A_i$ :

$$V_{Kegel} = \sum_{n=1}^{64} (h_{erodiert,i} \cdot A_i) \quad (5.3)$$

Die Fläche  $A_i$  ergibt sich bei einem Messpunktabstand von 5 cm zu  $25 \text{ cm}^2$ . Messpunkte an den Rändern haben entsprechend kleinere zugeordnete Flächen.

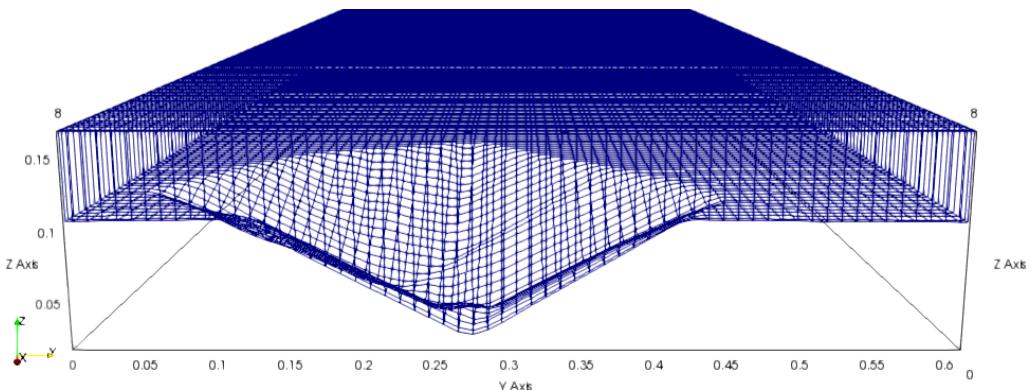
Darüber hinaus verfügt SSIIM 1 über die Möglichkeit, zwei- und dreidimensionale Dateien zur Betrachtung mit der Software Paraview zu erzeugen. Jedoch können interres- und Paraview-Dateien nicht im selben Programmdurchlauf erzeugt werden. Somit wird jede Simulation dreimal durchgeführt, um interres-, 2-D-Paraview- und 3-D-Paraview-Dateien zu generieren. SSIIM 1 gibt dem Benutzer die Möglichkeit, ein Intervall anzugeben, in dem die Paraview-Dateien ausgegeben werden. Hierzu wird in dieser Arbeit ein Intervall von 5 s gewählt, sodass jeweils 27 Paraview-Dateien bei einer Simulationsdauer von 130 s erzeugt werden. Die Paraview-Dateien enthalten neben der Geometrie des Spülkegels auch die Werte der Wasserstände, der Sohlhöhen, der Sedimentmächtigkeit, der Sohlschubspannungen, der Rauheit und der Fließgeschwindigkeiten. Diese können in Paraview visualisiert werden.

### 5.3.2. Dreidimensionale Darstellung der Simulationsergebnisse

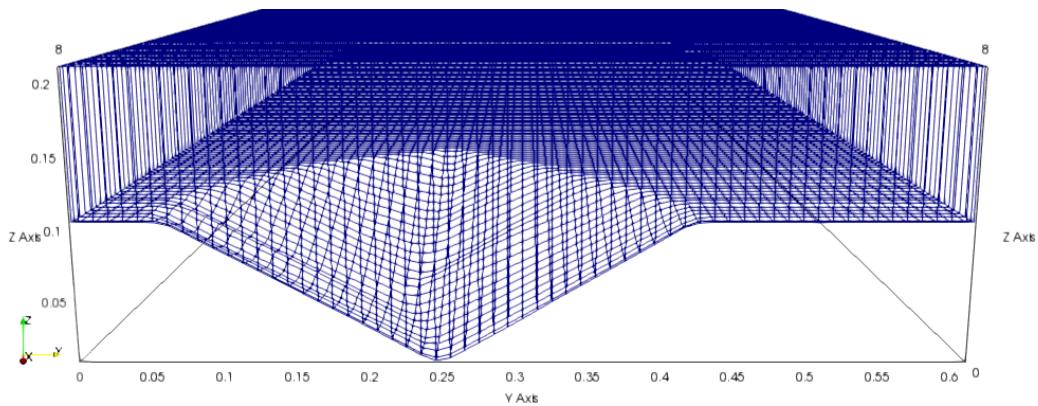
Die Abbildungen 5.10, 5.11 und 5.12 zeigen dreidimensionale Darstellungen der Spülkegel, die sich aus der Simulation mit SSIIM 1 mit Variante 1, Variante 2 und Variante 3 ergeben. Der Blick richtet sich dabei von unterstrom auf den Kegel. Der Abfluss erfolgt somit aus der Bildebene heraus. Die Visualisierungen werden mit der Software Paraview erzeugt. Die Abbildungen zeigen die Spülkegel zum Zeitpunkt  $t=130$  s am Ende des Spülvorgangs. Dabei ist zu erkennen, dass der Wasserstand bei den Varianten 1 und 3 auf 16 cm abgesunken ist, während er bei Variante 2 konstant bei 20,5 cm gehalten wird.

Auffällig bei allen Varianten ist die Asymmetrie der Spülkegel. Nach der Erwartung soll der tiefste Punkt des Spülkegels am Schütz und in der Mitte des Kanals bei  $y=30,5$  cm liegen. Bei Variante 1 ist jedoch eine Verschiebung des tiefsten Punktes um ca. 3 cm nach rechts (in Fließrichtung) am Schütz festzustellen. Weiter entfernt vom Schütz ist diese Verschiebung noch größer, da sich der Kegel schräg nach hinten rechts entwickelt. Der Spülkegel bei Variante 2 ist entgegen der Erwartung um ca. 5 cm nach rechts verschoben. Im Gegensatz zum Kegel der Variante 1 entwickelt er sich allerdings gerade nach hinten und ist somit in sich symmetrisch. Der Kegel der Variante 3 weist am Schütz ebenfalls eine Verschiebung um ca. 5 cm nach rechts auf. Er entwickelt sich wie der Kegel der Variante 2 gerade nach hinten und ist in sich größtenteils symmetrisch. Ein Grund für die auftretende Asymmetrie bei der Simulation der Spülkegel ist zunächst nicht zu erkennen. In Kapitel 5.5 werden weitere Untersuchungen bezüglich dieses Phänomens dargestellt.

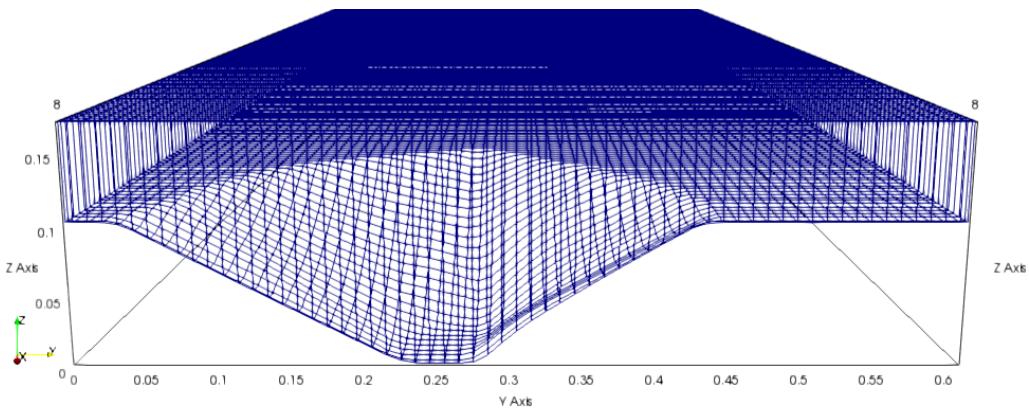
Zudem fällt auf, dass bei Variante 1 keine Erosion bis zur Kanalsohle bei  $z=0,0$  m stattfindet. Der tiefste Punkt befindet sich entgegen der Erwartung nicht direkt am Schütz, sondern weiter hinten. In Variante 2 dagegen wird am Schütz bis zur Sohle erodiert. In Variante 3 kommt es ebenfalls zu einer Erosion bis zur Sohle nahe des Schützes. Dort liegen auch die tiefsten Punkte der Spülkegel der Varianten 2 und 3. Bei Variante 3 erfolgt die Erosion bis zur Sohle am Schütz auf einer Breite von ca. 4 cm. Grund hierfür sind die bei Variante 1 auftretenden geringeren Fließgeschwindigkeiten an der Sohle. Der Abfluss erfolgt im Bereich des Schützes über die gesamte Wassersäule. Somit sind die Fließgeschwindigkeiten dort weniger stark auf den Sohlbereich konzentriert als bei den Varianten 2 und 3, in denen der Abfluss nur über



**Abbildung 5.10.:** Spülkegel der Simulation mit SSIIM 1 (Variante 1)



**Abbildung 5.11.:** Spülkegel der Simulation mit SSIIM 1 (Variante 2)



**Abbildung 5.12.:** Spülkegel der Simulation mit SSIIM 1 (Variante 3)

die Höhe von 5 cm am Schütz erfolgt. Die höheren sohnahen Fließgeschwindigkeiten bei den Varianten 2 und 3 führen zu größeren Sohlschubspannungen und damit zu mehr Erosion im Bereich der Sohle nahe des Schützes.

### **5.3.3. Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen aus dem Laborversuch**

**Erodierter Gesamtvolumen und Root Mean Square Error** Tabelle 5.4 zeigt einen Vergleich der erodierten Gesamtvolumina aus den Simulationen mit dem erodierten Gesamtvolumen des physikalischen Modellversuchs. Weiterhin enthält die Tabelle die Root Mean Square Errors für die Simulationen der drei Varianten. Bei der Betrachtung des erodierten Gesamtvolumens fällt auf, dass alle Varianten das Volumen des Modellversuchs unterschätzen. Während das Gesamtvolumen bei der Simulation mit Variante 1 lediglich um 9,22 % vom Volumen des Spülkegels im Labor abweicht, beträgt die Abweichung bei Variante 2 29,00 %. Variante 3 führt bezüglich des erodierten Gesamtvolumens zum besten Ergebnis mit einer Unterschätzung des Kegels aus dem Laborversuch von 5,75 %. Der RMSE der Variante 1 beträgt 2,38 cm und ist damit größer als der RMSE der Variante 2 von 2,11 cm und der RMSE der Variante 3 von 1,89 cm. Der kleine RMSE von Variante 3 deutet auf eine größere Genauigkeit der Simulation hin. In Kombination mit der geringsten Abweichung beim erodierten Volumen liefert Variante 3 das beste Simulationsergebnis. Variante 2 liefert bezüglich des RMSE ein genaueres Ergebnis als Variante 1. Jedoch führt Variante 2 beim erodierten Gesamtvolumen zu einer deutlich größeren Abweichung vom Laborversuch als Variante 1. Der Grund hierfür wird bei der Betrachtung der Querschnitte deutlich.

**Tabelle 5.4.:** Vergleich des erodierten Gesamtvolumens und des RMSE der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 mit dem Laborversuch

<b>Variante</b>	<b>Labor</b>	<b>V1</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>
<b>erodiertes Vol. [cm<sup>3</sup>]</b>	3468,62	3148,95	2462,90	3269,28
<b>Abweichung</b>	0,00%	-9,22%	-29,00%	-5,75%
<b>RMSE [cm]</b>	0,00	2,38	2,11	1,89

**Querschnitte** Die Querschnitte sind in den Abbildungen 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 und 5.18 dargestellt. Dabei werden jeweils die Messwerte aus dem Laborversuch (blau) mit den Simulationsergebnissen der Sohlhöhen für Variante 1 (orange), Variante 2 (gelb) und Variante 3 (grau) verglichen.

Abbildung 5.13 zeigt den Querschnitt an der Stelle  $x=-0,02\text{ m}$  unmittelbar vor dem Schütz. Bei allen Varianten ist dabei eine deutliche Unterschätzung des Spülkegels zu erkennen. Bei Variante 3 kommt es dabei zur stärksten Erosion. In Variante 1 wird am wenigsten erodiert. Variante 3 liefert damit für diesen Querschnitt die besten Simulationsergebnisse, gefolgt von Variante 2. Jedoch ist die Asymmetrie des Spülkegels bei den Varianten 2 und 3 hier deutlich ausgeprägter als bei Variante 1. Außerdem kommt es bei den Varianten 1 und 2 nicht zu einer Erosion bis zur Kanalsohle, wie es im Laborversuch der Fall ist.

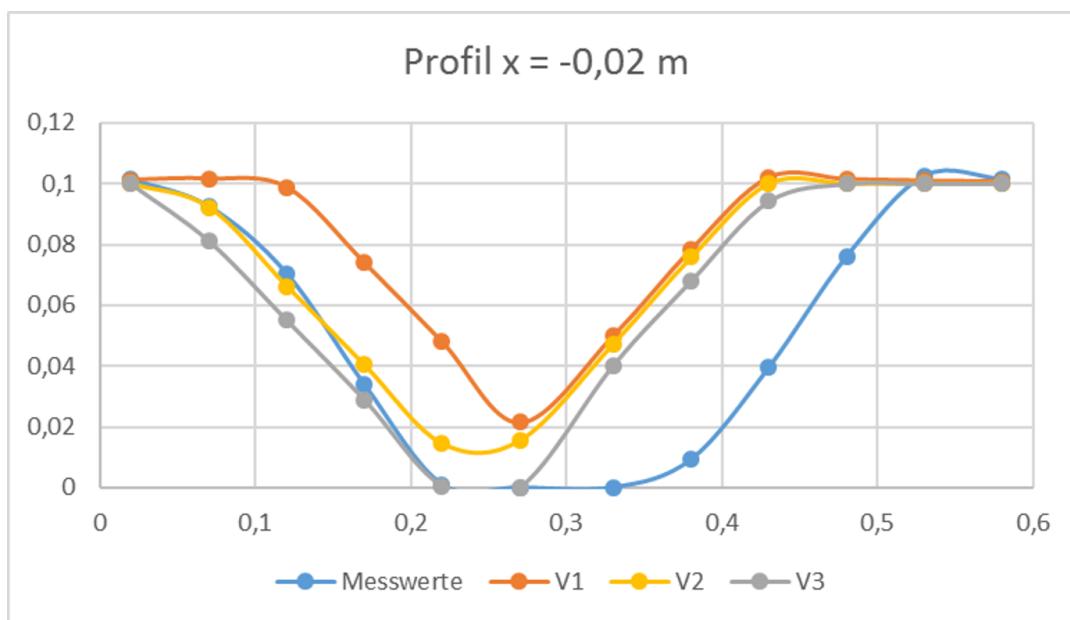
In Abbildung 5.14 ist der Querschnitt an der Stelle  $x=-0,07\text{ m}$  dargestellt. Auch hier kommt es im Laborversuch noch zur Erosion bis zur Kanalsohle. Dies wird jedoch erneut lediglich durch Variante 3 wiedergespiegelt. Der Spülkegel wird durch alle Varianten unterschätzt, jedoch nicht mehr so stark wie im vorherigen Profil. Die Asymmetrie ist bei den Varianten 2 und 3 erneut stärker ausgeprägt als bei Variante 1.

Im Querprofil an der Stelle  $x=-0,12\text{ m}$  (vgl. Abbildung 5.15) kommt es bereits bei allen Simulationen zu einer Überschätzung der Erosion. Die Tiefpunkte der erodierten Sohle liegen in diesem Profil unter dem Tiefpunkt des Spülkegels im Laborversuch. Die Überschätzung der Erosion ist für Variante 2 geringer ausgeprägt, welche damit für dieses Profil die genaueren Ergebnisse liefert. Bezuglich der Asymmetrie ist der Tiefpunkt der Varianten 1 und 2 um ca. 10 cm nach rechts (in Strömungsrichtung) gegenüber dem Tiefpunkt des Laborversuchs verschoben. Bei Variante 3 beträgt die Verschiebung dagegen nur noch ca. 5 cm.

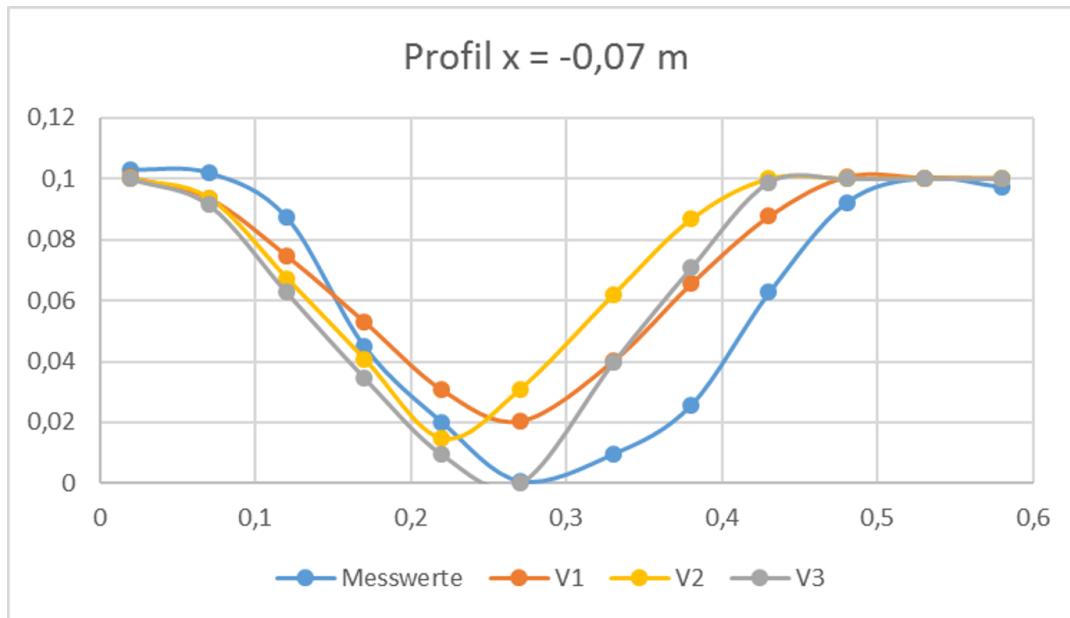
In den Profilen  $x=-0,17\text{ m}$ ,  $x=-0,22\text{ m}$  und  $x=-0,27\text{ m}$  (vgl. Abbildungen 5.16, 5.17 und 5.18) kommt es im Laborversuch kaum noch zu Erosion. Vor allem Variante 1 führt auch in diesen Bereichen noch zu einem deutlich ausgeprägten Spülkegel und damit zu einer starken Überschätzung des Kegels aus dem Laborversuch. Variante 3 führt in den Profilen  $x=-0,17\text{ m}$  und  $x=-0,22\text{ m}$  ebenfalls noch zu Erosionen und zur Überschätzung des Kegels. Variante 2 führt vor allem im Profil  $x=-0,17\text{ m}$  noch zu einer nennenswerten Erosion. In den Profilen  $x=-0,22\text{ m}$  und  $x=-0,27\text{ m}$  ist allerdings

## 5. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 1

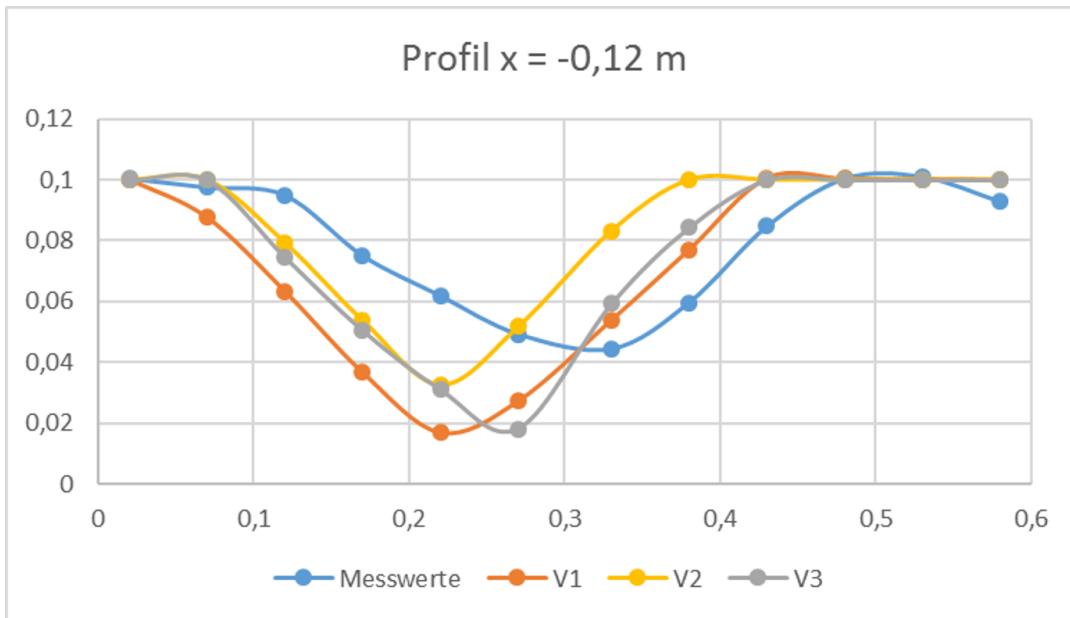
---



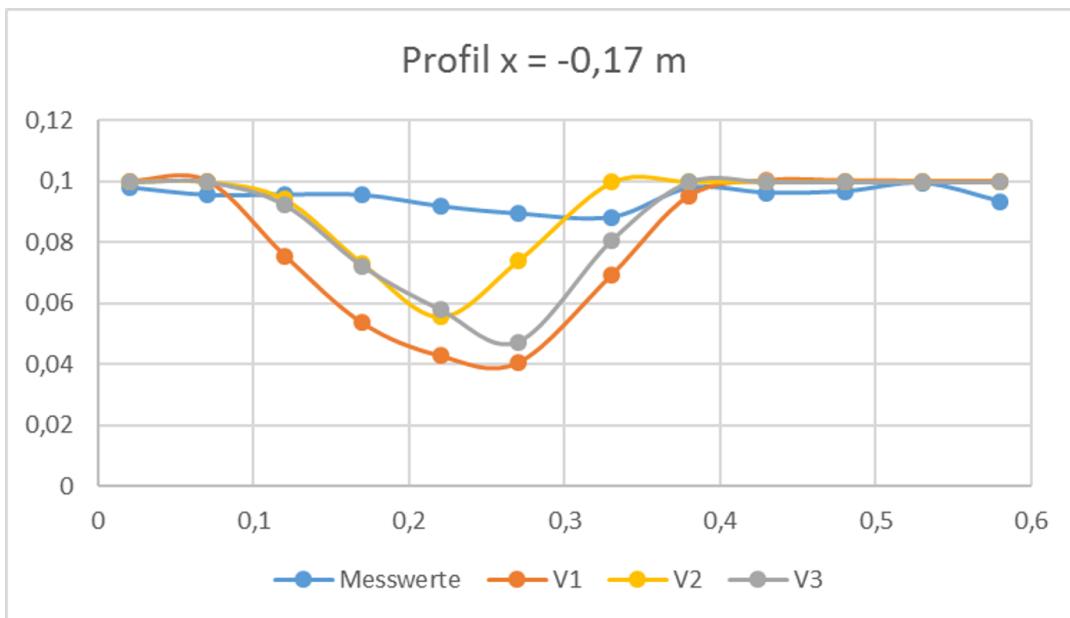
**Abbildung 5.13.:** Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 und des Laborversuchs am Querprofil x=-0,02 m



**Abbildung 5.14.:** Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 und des Laborversuchs am Querprofil x=-0,07 m



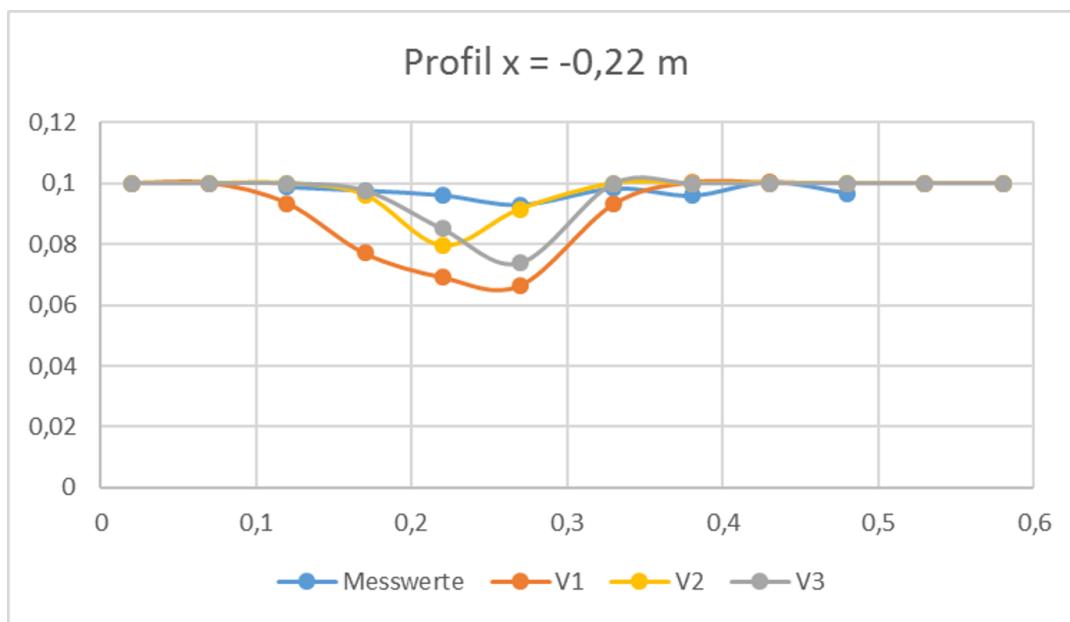
**Abbildung 5.15.:** Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 und des Laborversuchs am Querprofil  $x=-0,12\text{ m}$



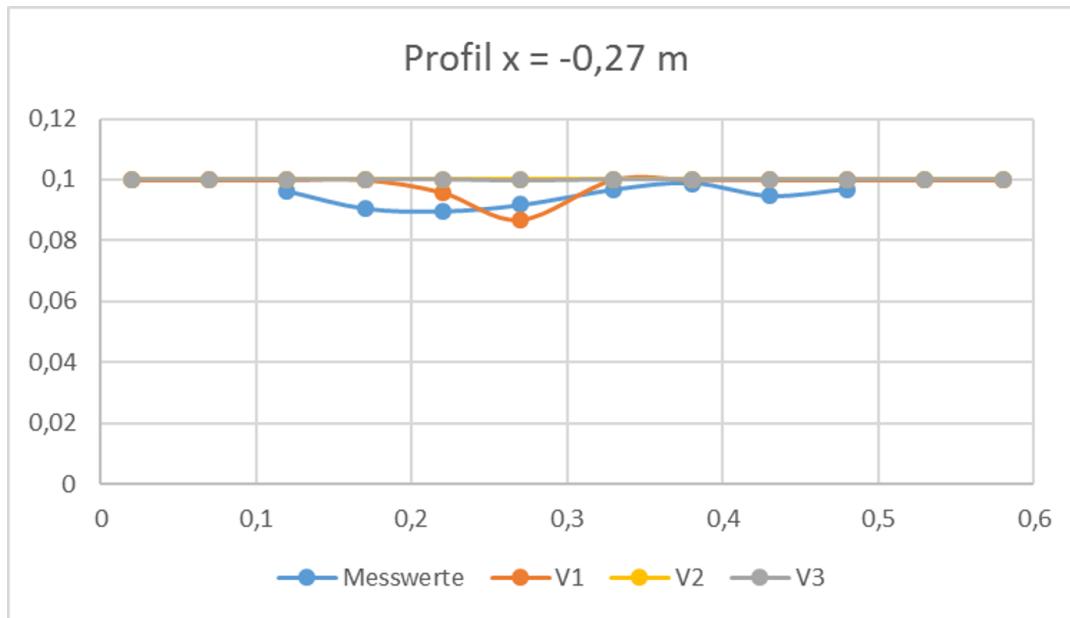
**Abbildung 5.16.:** Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 und des Laborversuchs am Querprofil  $x=-0,17\text{ m}$

## 5. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 1

---



**Abbildung 5.17.:** Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 und des Laborversuchs am Querprofil x=-0,22 m



**Abbildung 5.18.:** Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 und des Laborversuchs am Querprofil x=-0,27 m

wie im Laborversuch kaum bzw. keine Erosion mehr erkennbar. Die Asymmetrie aller Varianten ist auch in diesen Profilen erkennbar.

**Längsschnitte** Weiterhin werden die Längsschnitte an den Stellen  $y=0,17$  m und  $y=0,305$  m (Kanalmitte) betrachtet. Diese sind in den Abbildungen 5.19 und 5.20 zu sehen.

Im Längsschnitt  $y=0,17$  m ist für Variante 1 bis ca. 8 cm vor dem Schütz, für Variante 2 bis ca. 6 cm vor dem Schütz und für Variante 3 bis unmittelbar zum Schütz eine Überschätzung des Spülkegels durch die Simulationen erkennbar. Grund dafür ist die auftretende Asymmetrie, durch die die simulierten Spülkegel in Richtung dieses Längsschnitts verschoben werden. Auffällig bei Variante 1 ist die Tatsache, dass sich der tiefste Punkt der Sohle nicht wie im Laborversuch direkt am Schütz, sondern ca. 12 cm vor dem Schütz befindet. In diesem Längsschnitt ist außerdem die Neigung des Spülkegels gut erkennbar: Aufgrund derselben Vorgaben bezüglich des Reibungswinkels stellt sich bei allen Simulationsvarianten eine ähnliche Neigung ein. Diese ist jedoch geringer als die Sohlneigung des Spülkegels im Laborversuch.

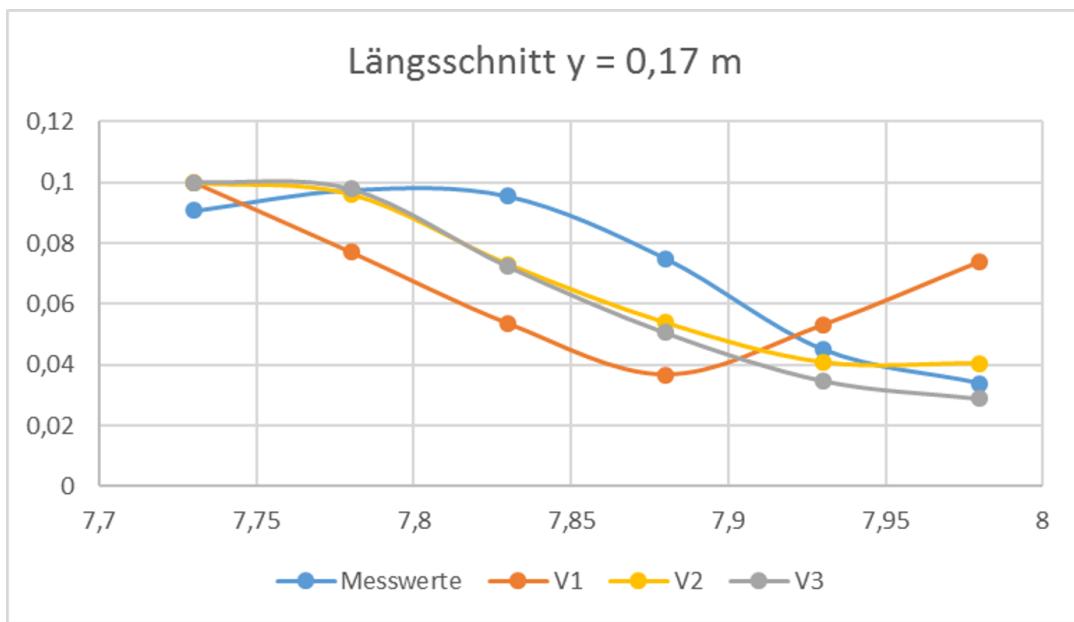
Der Längsschnitt bei  $y=0,305$  m stellt den Längsschnitt in Kanalmitte dar. Hier wird erneut die Unterschätzung der Sohlneigung des Kegels bei allen Simulationsvarianten deutlich. Die Varianten 1 und 3 überschätzen den Kegel ab ca. 11 cm Entfernung vom Schütz, unterschätzen ihn jedoch nahe des Schützes. Sowohl die Unter- als auch die Überschätzung ist bei Variante 3 schwächer ausgeprägt. Sie liefert damit die genauesten Ergebnisse. Erneut ist der tiefste Punkt bei Variante 1 nicht unmittelbar am Schütz zu finden, sondern rund 7 cm vor dem Schütz. Variante 2 zeigt hier eine Unterschätzung des Spülkegels bis zu einer Entfernung von ca. 17 cm vom Schütz.

Der Längsschnitt bei  $y=0,43$  m wird hier nicht betrachtet. Dort treten bei allen Simulationsvarianten aufgrund der Asymmetrie keine Erosionen auf.

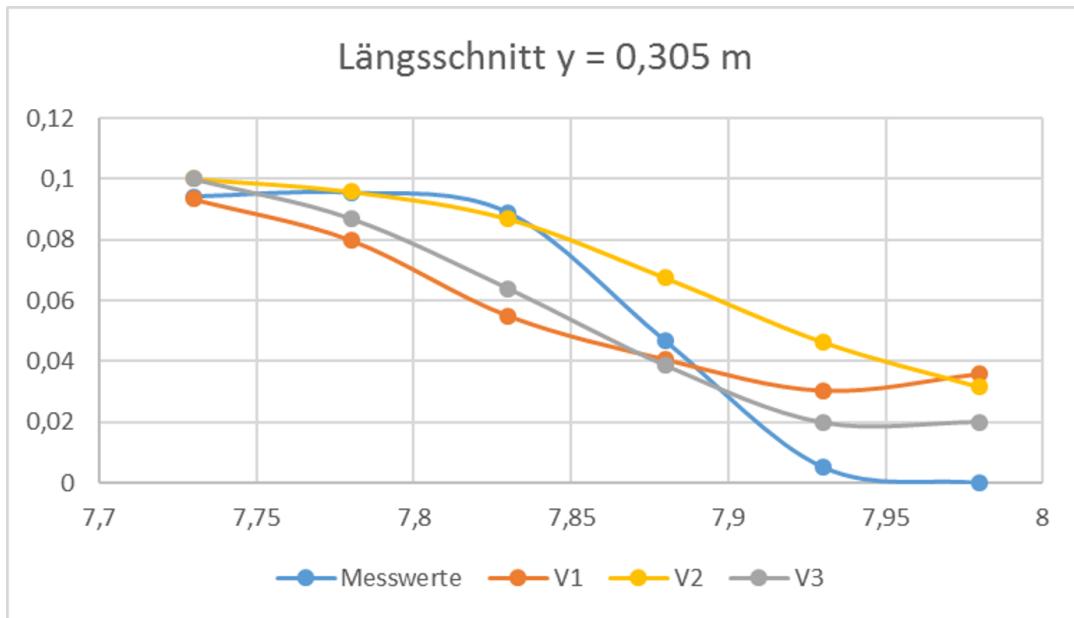
**Zusammenfassung** Insgesamt lässt sich sagen, dass der Kegel aus dem Laborversuch durch alle Simulationsvarianten nahe des Schützes unterschätzt und weiter entfernt vom Schütz überschätzt wird. Sowohl die Unterschätzung als auch die Überschätzung sind bei Variante 1 jeweils am stärksten und bei Variante 3 am schwächsten ausgeprägt. Somit hat Variante 1 den größten RMSE und ist als die

## 5. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 1

---



**Abbildung 5.19.:** Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 und des Laborversuchs am Längsschnitt  $y=0,17 \text{ m}$



**Abbildung 5.20.:** Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 1 und des Laborversuchs am Längsschnitt  $y=0,305 \text{ m}$

ungenauste der drei Simulationen anzusehen. Variante 2 ist damit die genauere der beiden vereinfachten Simulationsvarianten aus Kapitel 5.1.5.

Durch die deutlichen Überschätzungen des Kegels in den Profilen zwischen  $x=-0,12$  m und  $x=-0,27$  m kann Variante 1 die Unterschätzungen nahe des Schützes kompensieren, sodass das erodierte Gesamtvolumen beinahe dem des Laborversuchs entspricht. Folglich kann das erodierte Gesamtvolumen hier nicht als Qualitätskriterium für die Genauigkeit der Simulation herangezogen werden.

Variante 3 führt zum geringsten RMSE und ist damit als die beste Simulationsvariante anzusehen. Jedoch treten auch bei Aufteilung der Simulation in mehrere Einzelsimulationen die gleichen Phänomene wie bei den beiden vereinfachten Simulationsvarianten auf, allerdings in abgeschwächter Form. Prinzipiell ist es daher sinnvoll, die Gesamtsimulation in noch mehr Einzelsimulationen aufzuteilen und zu untersuchen, ob die Genauigkeit dadurch weiter erhöht werden kann.

Aus den Längsschnitten wird außerdem deutlich, dass die Sohlneigung der simulierten Spülkegel im Vergleich zum Laborversuch zu gering ist. Zudem ist die Ausbildung der Asymmetrie des Spülkegels bei allen Simulationsvarianten signifikant.

## **5.4. Softwaretest zur Kombination der Simulationsvarianten 1 und 2**

In dieser Simulation wird untersucht, wie sich das Programm SSIIM 1 bei einer Kombination aus konstantem Wasserspiegel (vgl. Variante 2) und der Tatsache, dass der Zufluss viel kleiner als der Abfluss definiert wird (vgl. Variante 1), verhält. Ist der Zufluss viel kleiner als der Abfluss, kommt es in der Realität zu einem absinkenden Wasserspiegel. Somit ist die vorliegende Simulation physikalisch nicht korrekt. Die vorgegebenen Zuflüsse, Abflüsse und Wasserstände sind in Tabelle 5.5 dargestellt.

Es wird erwartet, dass die Simulation aufgrund des Fehlers in der Kontinuität zu einem Abbruch des Programms führt. Jedoch führt das Programm die Simulation durch. Die Kontinuitäts-Residuen, die sich dabei im ersten und letzten Zeitschritt der Simulation ergeben, sind in Tabelle 5.6 zu sehen.

Dabei ist auffällig, dass das Residuum zu Beginn der Simulation mit einem Wert von 1,55 zwar höher ist als in den beiden ursprünglichen Simulationsvarianten. Jedoch

## 5. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 1

---

**Tabelle 5.5.:** Zufluss, Abfluss und Wasserstand in der timei-Datei des Softwaretests

Zeitpunkt	Zufluss	Abfluss	Wasserstand
$t = 0 \text{ s}$	0,50 l/s	3,91 l/s	20,5 cm
$t = 130 \text{ s}$	0,50 l/s	3,11 l/s	20,5 cm

**Tabelle 5.6.:** Kontinuitäts-Residuum beim Softwaretest im Vergleich zu den Varianten 1 und 2

Kontinuitäts-Residuum	V1	V2	Test
$t = 1 \text{ s}$	1,27	0,69	1,55
$t = 130 \text{ s}$	0,32	0,46	0,47

ist es weit entfernt vom Wert von  $10^{10}$ , der zum Abbruch der Simulation führt. Mit zunehmender Simulationsdauer sinkt das Kontinuitäts-Residuum dann auf einen Wert von 0,47 ab und liegt damit im Bereich des Residuums der Variante 1 von 0,46. Dies entspricht nicht den Erwartungen. Es besteht also theoretisch auch die Möglichkeit, diese unphysikalische Variante durchzuführen.

Tabelle 5.7 zeigt die Ergebnisse dieser Simulation für das erodierte Gesamtvolumen und den RMSE. Hierbei wird deutlich, dass die unphysikalische Simulation auch unrealistische Ergebnisse liefert. Es kommt nur zu einem erodierten Gesamtvolumen von  $937,04 \text{ cm}^3$  und damit zu einer Unterschätzung des Spülkegels aus dem Labor um fast 73 %. Der Spülkegel des Softwaretests weist außerdem mit 2,72 cm den

**Tabelle 5.7.:** Vergleich des erodierten Gesamtvolumens und des RMSE des Softwaretests mit den ursprünglichen Simulationsvarianten und dem Laborversuch

Variante	Labor	V1	V2	Test
<b>erodierte Vol. [cm<sup>3</sup>]</b>	3468,62	3148,95	2462,90	937,04
<b>Abweichung</b>	0,00%	-9,22%	-29,00%	-72,99%
<b>RMSE [cm]</b>	0,00	2,38	2,11	2,72

größten RMSE aller drei Simulationen auf. Eine weitere Betrachtung der Ergebnisse wird daher nicht durchgeführt und die Variante wird nicht weiter verfolgt.

## 5.5. Untersuchung zur Asymmetrie des Spülkegels

In allen mit SSIIM 1 durchgeführten Simulationen tritt eine zunächst nicht erklärbare Asymmetrie des Spülkegels auf. Dabei kommt es auf der rechten Seite des Kanals (in Fließrichtung gesehen) zu mehr Erosion als auf der linken Seite. Der Spülkegel ist damit nach rechts verschoben.

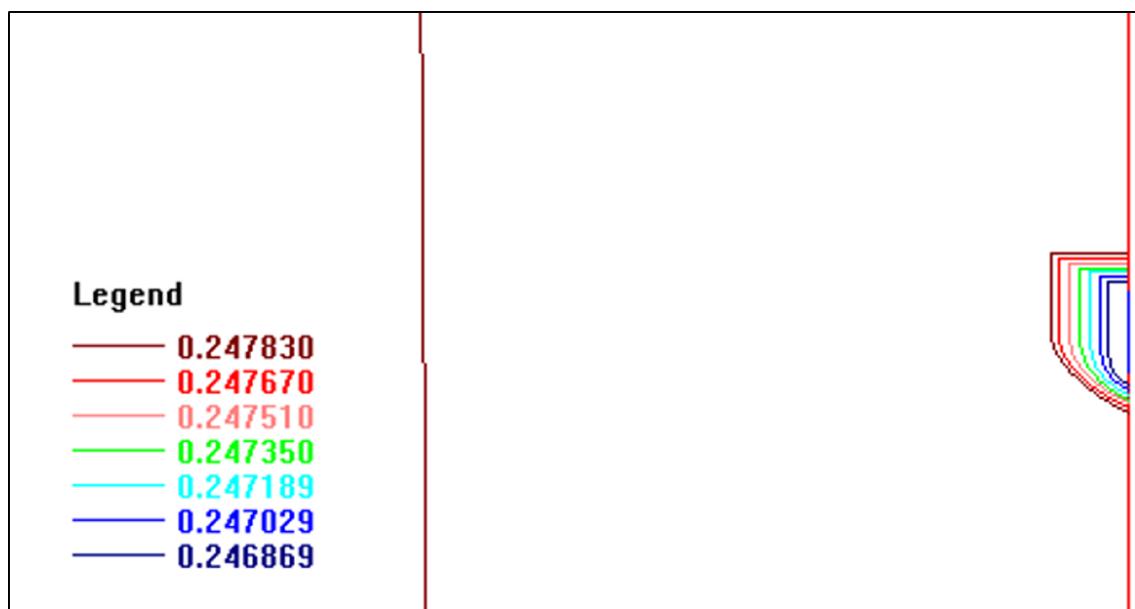
Zunächst werden alle Eingabedateien betrachtet, um sicherzugehen, dass die Asymmetrie nicht durch einen Eingabefehler entsteht. Kritische Punkte sind dabei die Generierung und Nummerierung des Gitters, die Festlegung des abflusswirksamen Querschnitts (des Schützes), der Einbau des Startkegels sowie die Festlegung der Rauheit an der Sohle und den Wänden. Nach mehrmaliger Durchsicht aller Eingabedateien bezüglich der kritischen Parameter wird festgestellt, dass der Aufbau der Simulation ideal symmetrisch ist und sich die Asymmetrie des Spülkegels nicht durch einen Eingabefehler einstellen kann.

Eine mögliche Ursache für die Asymmetrie tritt bei der Betrachtung der Simulation des absinkenden Wasserspiegels zutage. In dieser Simulation wird keine Sedimentschicht eingebaut, somit wird auch kein Startkegel verwendet. Die Rauheit hat denselben Wert für die Sohle und die Wände und der Aufbau der Simulation inklusive des Schützes ist ideal symmetrisch. Dennoch kommt es während des Absinkens des Wasserspiegels zu einem Interpolationsfehler im Programm. Dieser ist in Abbildung 5.21 zu sehen. Dort wird die Wasserspiegellage in [m] zum Zeitpunkt  $t=4$  s dargestellt. Trotz des symmetrischen Aufbaus der Simulation ergibt sich ein asymmetrischer Verlauf des Wasserspiegels. Aufgrund des geringfügig niedrigeren Wasserstandes auf der rechten Seite kann es dort zu höheren Fließgeschwindigkeiten in der Simulation und damit zu einer verstärkten Erosion in diesem Bereich kommen. Jedoch ist hierbei nicht klar, ob es sich tatsächlich um einen Interpolationsfehler im Programm oder lediglich um einen Fehler in der grafischen Darstellung handelt.

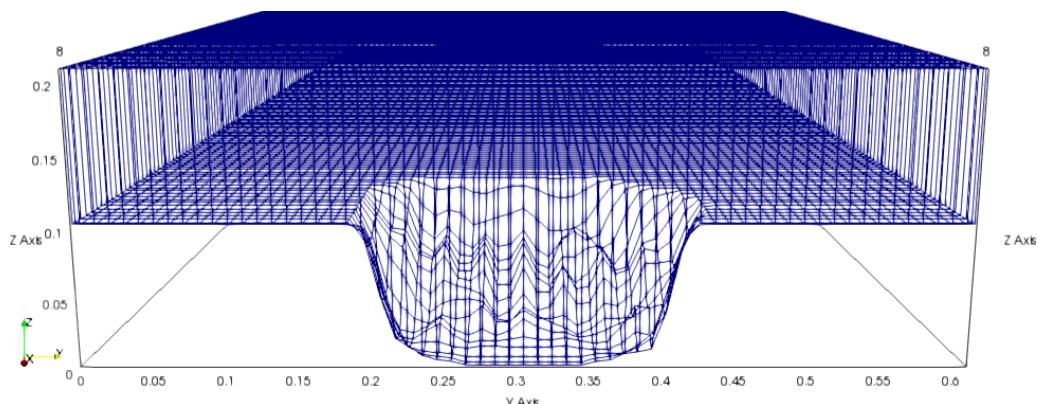
Eine weitere mögliche Ursache ist der Sand-Slide-Algorithmus. Dieser ist in allen in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen mit SSIIM 1 implementiert. Bei der

## 5. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 1

---



**Abbildung 5.21.:** Interpolationsfehler von SSIIM 1 bei der Berechnung des Wasserspiegels



**Abbildung 5.22.:** Dreidimensionale Darstellung des Spülkegels von Variante 2 ohne den Sand-Slide-Algorithmus

Durchführung einer Simulation ohne den Algorithmus verschwindet die Asymmetrie. Dies ist in Abbildung 5.22 für die Simulationsvariante 2 zu sehen. Daher ist zu vermuten, dass die Asymmetrie in den Spülkegeln aus einem Fehler im Sand-Slide-Algorithmus resultiert.

# **6. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM**

## **2**

Dieses Kapitel beinhaltet die Simulation des in Kapitel 3 beschriebenen Laborversuchs zur Bestimmung des Spülkegels bei Stauraumspülungen in SSIIM 2. Zunächst wird das Vorgehen bei der Simulation erläutert. Dabei werden zwei Varianten zur Modellierung der Schützöffnung entwickelt. Anschließend werden die Ergebnisse präsentiert und interpretiert.

### **6.1. Vorgehen**

Bei der Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 2 wird derselbe Bereich modelliert wie mit SSIIM 1 (vgl. Kapitel 5.1.1). Das bedeutet, dass der Auslaufbereich hinter dem Schütz erneut nicht Teil der Simulation ist. Darüber hinaus erfolgen die Festlegung der Rauheit (vgl. Kapitel 5.2.2) und der Einbau der Sedimentschicht (vgl. Kapitel 5.2.1) inklusive des Startkegels (vgl. Kapitel 5.2.6) ebenfalls analog zu SSIIM 1. Es wird versucht, die in den folgenden Kapiteln genannten Parameter entsprechend der Simulation in SSIIM 1 zu definieren. Dieses Vorgehen dient der Vergleichbarkeit der Ergebnisse von SSIIM 1 und SSIIM 2.

#### **6.1.1. Gittergenerierung**

Für SSIIM 2 muss zunächst das zweidimensionale, tiefengemittelte strukturierte Gitter vorgegeben werden, um daraus anschließend das dreidimensionale unstrukturierte Gitter erzeugen zu können (vgl. Kapitel 4.5.3). Das zweidimensionale Gitter kann über eine koosurf-Datei eingelesen werden. Hierzu wird die koordina-Datei aus SSIIM 1 verwendet und umbenannt. Sie enthält die Lage der Sohle und den Startkegel. SSIIM 2 fordert jedoch zusätzlich eine Angabe des initialen Wasserstands, sodass eine

## 6. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 2

---

weitere Spalte hinzugefügt werden muss, die den Wasserstand von 25 cm enthält. Die Erstellung des Gitters erfolgt in SSIIM 2 generell über die grafische Benutzeroberfläche und den „Grid Editor“. Über die Option „Block from koosurf“ wird der Block aus der koosurf-Datei eingelesen. Die Punkte des linken und rechten Randes werden nun in der control-Datei als „No Move Points“ definiert und somit in ihrer Lage fixiert. Anschließend kann über die GUI von SSIIM 2 aus dem zweidimensionalen Block ein dreidimensionales Gitter erstellt werden. Dieses wird anschließend in der unstruc-Datei gespeichert.

In der control-Datei werden weitere Angaben zum Gitter gemacht: Im G1-Datensatz wird die maximale Anzahl der Zellen des dreidimensionalen Gitters auf 300 mal 300 mal 12 Zellen in x-, y- und z-Richtung festgelegt. Der F87-Datensatz legt den Exponenten  $p$  der Formel 4.22 zur Berechnung der Anzahl vertikaler Zellen auf 0,6 fest. Damit ergeben sich zu Beginn der Simulation 10 Zellen in vertikaler Richtung im Bereich des Schützes. Über den F99-Datensatz wird festgelegt, dass das dreidimensionale Gitter nach jedem Zeitschritt regeneriert wird. Zur Erstellung der Gitterlinien wird der F64 2-Algorithmus verwendet (vgl. Kapitel 4.5.3).

### 6.1.2. Einbau des Schützes - Standardvariante

Der Einbau des Schützes erfolgt in SSIIM 2 über die Festlegung der abflusswirksamen Zellen im unterstromigen Querschnitt über den „Discharge Editor“ in der grafischen Benutzeroberfläche. Hierzu werden zunächst in einer Draufsicht die fünf mittleren Zellen im Querschnitt ausgewählt. Sie sind jeweils 1 cm breit. In einem Fenster müssen anschließend die abflusswirksamen Zellen in vertikaler Richtung sowie der Abfluss festgelegt werden. Als Abfluss wird der Wert zum Zeitpunkt  $t=0$  s von 3,91 l/s angegeben (vgl. Kapitel 6.1.4). Die maximale Anzahl an Zellen in vertikaler Richtung beträgt 12. Jedoch werden im ersten Zeitschritt nur 10 Zellen in vertikaler Richtung am Schütz generiert. Somit entfallen die Zellen Nummer 1 und 2. Es sollen die untersten drei Zellen als abflusswirksam festgelegt werden. Die Zellnummerierung beginnt jedoch aufgrund des Wegfalls zweier Zellen hier an der Sohle mit der Nummer 3. Somit werden die Zellen 1 bis 5 als abflusswirksam festgelegt.

Bei der Festlegung der abflusswirksamen Zellen in vertikaler Richtung kommt es zu einem Fehler im Programm SSIIM 2: Die über den Discharge Editor festgelegten

Zu- und Abflüsse können wie das Gitter in der unstruc-Datei gespeichert werden. Wird die unstruc-Datei anschließend erneut eingelesen, geht jedoch die Information der abflusswirksamen Zellen in vertikaler Richtung verloren. Anstelle der vorher festgelegten Zellen 1 bis 5 werden die Zellen 1 bis 11 als abflusswirksam betrachtet. Dieser Fehler kann umgangen werden, indem die Simulation nach Festlegung des abflusswirksamen Querschnitts ohne Speichern der unstruc-Datei händisch über die grafische Benutzeroberfläche gestartet wird. Die Festlegung des Abflusses muss somit bei jeder Simulation erneut erfolgen und kann nicht in der unstruc-Datei gespeichert werden. Ein automatischer Start der Simulation über den F2-Datensatz in der control-Datei ist ebenfalls nicht möglich.

Im Verlauf der Simulation sinkt der Wasserspiegel, sodass im Zeitschritt bei  $t=56$  s eine Zelle in vertikaler Richtung wegfällt. Der Abfluss erfolgt dann bis zum Zeitschritt bei  $t=110$  s über zwei Zellen in vertikaler Richtung. Dann entfällt eine weitere Zelle und der Abfluss erfolgt bis zum Ende der Simulation bei  $t=130$  s nur noch über eine Zelle. Tabelle 6.1 zeigt den Wegfall der vertikalen Zellen zu den genannten Zeitpunkten, die dazugehörigen Wasserstände und Zellhöhen. Der Abfluss erfolgt in den ersten 55 s der Simulation über drei Zellen (Nummer 3 bis 5) mit einer zeitlich gemittelten Zellhöhe von jeweils 2,31 cm. In den zweiten 55 s erfolgt der Abfluss nur über 2 Zellen (Nummer 4 und 5). Diese sind im Mittel 2,15 cm hoch. In den letzten

**Tabelle 6.1.:** Abflusswirksame Zellen für die Modellierung der Schützöffnung in SSIIM 2

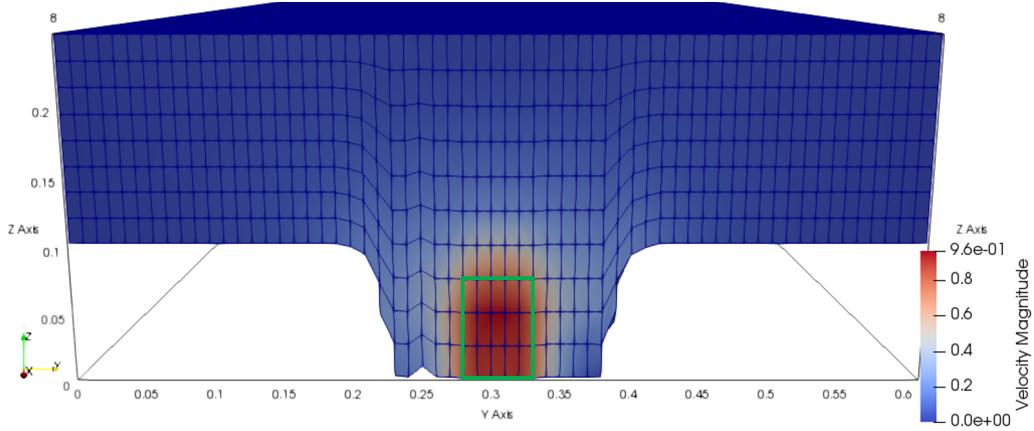
Zeitschritt	Zellen in z-Richtung	Wasserstand	Zellhöhe	Zellen Schütz	Zellhöhe mittel	Dauer
1	10	25,02 cm	2,50 cm	3	2,31 cm	55 s
55		21,22 cm	2,12 cm			
56	9	21,15 cm	2,35 cm	2	2,15 cm	55 s
110		17,42 cm	1,94 cm			
111	8	17,35 cm	2,17 cm	1	2,09 cm	20 s
130		16,04 cm	2,01 cm			

## 6. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 2

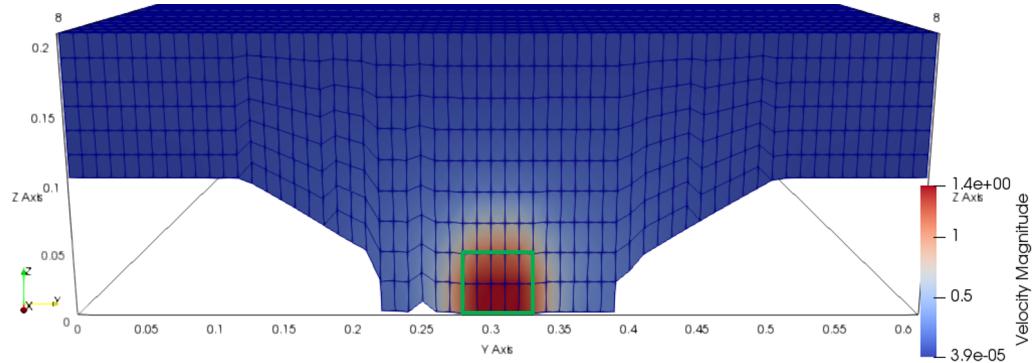
---

20 s der Simulation fließt das Wasser nur über eine Zelle (Nummer 5) in vertikaler Richtung ab. Diese ist im Mittel 2,09 cm hoch. Daraus ergibt sich ein über die Zeit gewichteter Mittelwert von 5,07 cm für die Abflusshöhe während der Simulation. Die Öffnung des Schützes sinkt während der Simulation von anfänglich 7,5 cm bis auf 2,01 cm zum Ende ab. Im Laborversuch dagegen beträgt die Schützöffnung konstant 5,0 cm.

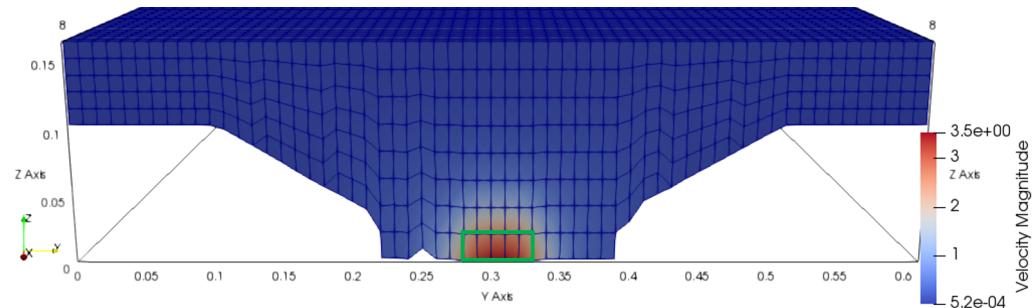
Der Wegfall der Zellen am Schütz wird bei Betrachtung der Abbildungen 6.1, 6.2 und 6.3 deutlich. Abbildung 6.1 zeigt die Fließgeschwindigkeiten und den abflusswirksamen Querschnitt zum Zeitpunkt  $t=0$  s am Schütz, betrachtet von unterstrom. Die Zellen, durch die der Abfluss erfolgt, sind durch das grüne Rechteck markiert. Der Wasserstand beträgt 25 cm. Von den zehn Zellen in vertikaler Richtung am Schütz erfolgt der Abfluss über drei Zellen. Die maximale Geschwindigkeit beträgt dabei 0,96 m/s. In Abbildung 6.2 sind die Fließgeschwindigkeiten und abflusswirksamen Zellen zum Zeitpunkt  $t=65$  s zu sehen. Der Wasserspiegel ist auf 20,5 cm gesunken. Es bildet sich ein Spülkegel aus. Am Schütz besteht das Gitter aus neun Zellen in vertikaler Richtung, da am unteren Rand eine Zelle entfallen ist. Der Abfluss erfolgt über die untersten beiden Zellen. Dabei beträgt die maximale Fließgeschwindigkeit 1,4 m/s. Sie ist aufgrund des kleineren Abflussquerschnitts erwartungsgemäß größer als die maximale Fließgeschwindigkeit zum Zeitpunkt  $t=0$  s. Abbildung 6.3 zeigt die Fließgeschwindigkeiten und den abflusswirksamen Querschnitt zum Zeitpunkt  $t=130$  s am Ende der Simulation. Der Wasserspiegel ist auf 16,0 cm abgesunken. Die Ausbildung des Spülkegels ist weiter fortgeschritten. Das Gitter besteht am Schütz nur noch aus acht Zellen in vertikaler Richtung, da eine weitere Zelle am unteren Rand entfallen ist. Somit erfolgt der Abfluss nur noch über eine Zelle in vertikaler Richtung. Aufgrund dessen ist die maximale Fließgeschwindigkeit von 3,5 m/s höher als in den beiden vorher betrachteten Zeitschritten. Während des Verlaufs der Simulation ändert sich das Gitter in horizontaler Richtung nicht, sodass der Abfluss immer über eine Breite von 5 cm erfolgt. Dies entspricht fünf Zellen in horizontaler Richtung.



**Abbildung 6.1.:** Fließgeschwindigkeiten und abflusswirksamer Querschnitt zum Zeitpunkt  $t=0$  s in SSIIM 2



**Abbildung 6.2.:** Fließgeschwindigkeiten und abflusswirksamer Querschnitt zum Zeitpunkt  $t=65$  s in SSIIM 2



**Abbildung 6.3.:** Fließgeschwindigkeiten und abflusswirksamer Querschnitt zum Zeitpunkt  $t=130$  s in SSIIM 2

### **6.1.3. Einbau des Schützes - Manuelle Anpassung der Schützöffnung**

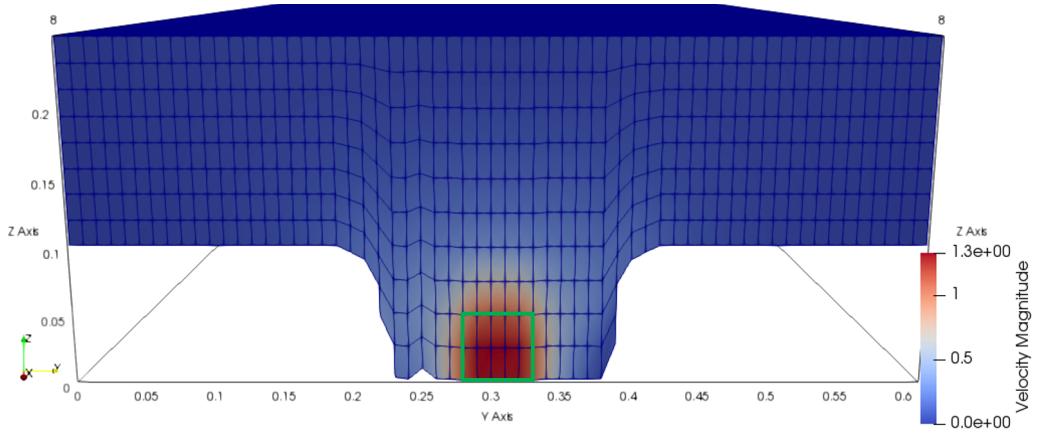
In Kapitel 6.1.2 werden für das Schütz in vertikaler Richtung drei abflusswirksame Zellen im unterstromigen Querschnitt festgelegt, sodass bei Wegfall zweier Zellen während der Simulation immer noch eine abflusswirksame Zelle in den letzten Zeitschritten der Simulation existiert. Die Höhe des Schützes sinkt dabei in der Simulation von 7,50 cm auf 2,01 cm ab.

Eine Anpassung der Anzahl abflusswirksamer Zellen im Verlauf der Simulation über eine Angabe in einer Eingabedatei ist in SSIIM 2 nicht möglich. Jedoch kann eine solche Anpassung manuell in der grafischen Benutzeroberfläche während der Simulation durchgeführt werden. Der Abfluss soll dabei immer über zwei Zellen in vertikaler Richtung erfolgen. Zu Beginn der Simulation werden somit die Zellen 1 bis 4 in z-Richtung als abflusswirksam festgelegt. Die Zellen 1 und 2 existieren nicht, da nur zehn Zellen generiert werden. Die maximale Anzahl an Zellen beträgt 12. Die Höhe des Schützes entspricht damit den Zellen 3 und 4 und beträgt zu Beginn der Simulation 5,00 cm. Dies entspricht der Höhe im Laborversuch.

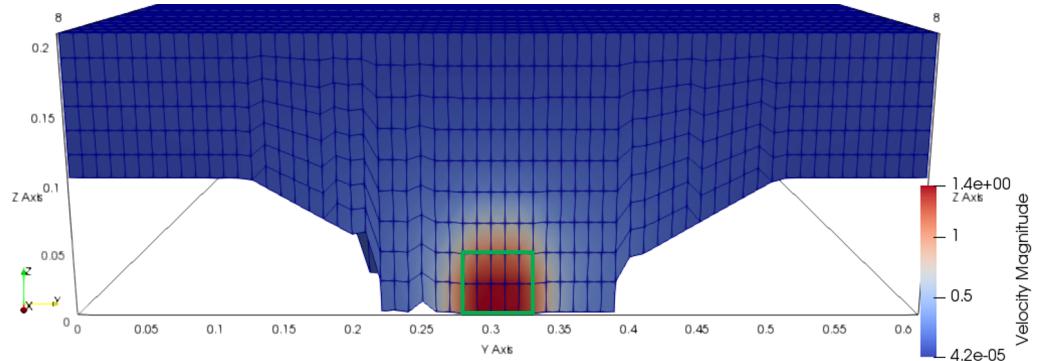
Zur Anpassung der abflusswirksamen Zellen muss die Anzahl der Zellen in vertikaler Richtung während der Simulation vom Benutzer beobachtet werden. Es besteht die Möglichkeit, die Simulation in jedem Zeitschritt jeweils nach der Regenerierung des Gitters zu unterbrechen. Nach dem 61. Zeitschritt entfällt eine Zelle (Zelle Nr. 3). Das Gitter besteht nun nur noch aus neun Zellen in vertikaler Richtung am Schütz. Vor der Berechnung des 62. Zeitschritts wird Zelle Nr. 5 im Discharge Editor ebenfalls als abflusswirksam festgelegt. Der Abfluss erfolgt nun über die Zellen Nr. 4 und 5. Nach dem 115. Zeitschritt entfällt Zelle Nr. 4, woraufhin Zelle Nr. 6 manuell im Discharge Editor aktiviert wird. Bis zum Ende der Simulation erfolgt der Abfluss dann über die Zellen Nr. 5 und 6.

Tabelle 6.2 zeigt die abflusswirksamen Zellen für die Modellierung mit manueller Anpassung der Schützöffnung. Die Höhe des abflusswirksamen Querschnitts sinkt während der Simulation von 5,00 cm auf 4,02 cm ab. Damit wird eine möglichst realitätsnahe Modellierung des Schützes gewährleistet. Aus der Tabelle ergibt sich ein über die Zeit gewichteter Mittelwert der Schützöffnung von 4,37 cm.

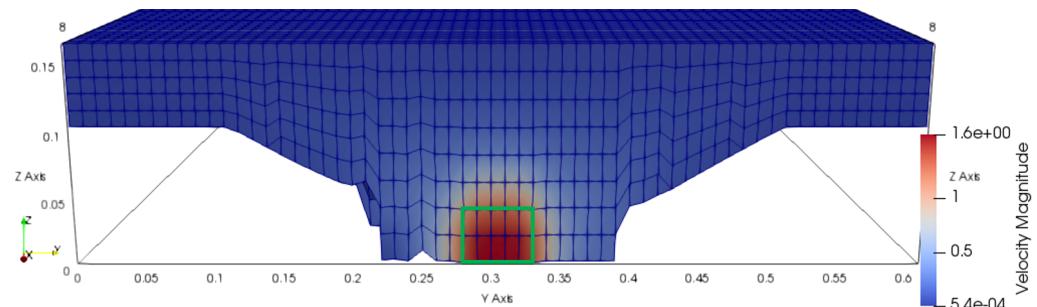
Zur Verifizierung der abflusswirksamen Querschnitte werden die Abbildungen



**Abbildung 6.4.:** Fließgeschwindigkeiten und abflusswirksamer Querschnitt zum Zeitpunkt  $t=0$  s mit manueller Anpassung der Schützöffnung



**Abbildung 6.5.:** Fließgeschwindigkeiten und abflusswirksamer Querschnitt zum Zeitpunkt  $t=65$  s mit manueller Anpassung der Schützöffnung



**Abbildung 6.6.:** Fließgeschwindigkeiten und abflusswirksamer Querschnitt zum Zeitpunkt  $t=130$  s mit manueller Anpassung der Schützöffnung

## 6. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 2

---

**Tabelle 6.2.:** Abflusswirksame Zellen für die Modellierung mit manueller Anpassung der Schützöffnung in SSIIM 2

Zeitschritt	Zellen in z-Richtung	Wasserstand	Zellhöhe	Zellen Schütz	Zellhöhe mittel	Dauer
1	10	25,02 cm	2,50 cm	2	2,29 cm	61 s
61		20,81 cm	2,08 cm			
62	9	20,74 cm	2,30 cm	2	2,10 cm	54 s
115		17,08 cm	1,90 cm			
116	8	17,01 cm	2,13 cm	2	2,07 cm	15 s
130		16,04 cm	2,01 cm			

6.4, 6.5 und 6.6 betrachtet. Sie zeigen die Fließgeschwindigkeiten und den abflusswirksamen Querschnitt zu den Zeitpunkten  $t=0$  s,  $t=65$  s und  $t=130$  s am Schütz, betrachtet von unterstrom. Die Zellen, durch die der Abfluss erfolgt, sind durch das grüne Rechteck markiert. In allen drei Abbildungen ist zu erkennen, dass der Abfluss jeweils über zwei Zellen in vertikaler Richtung erfolgt, während der Wasserstand von 25 cm auf 16 cm und die Gesamtanzahl der Zellen in vertikaler Richtung von 10 auf 8 absinkt. Die maximalen Fließgeschwindigkeiten im Abflussquerschnitt steigen von 1,3 m/s zu Beginn der Simulation auf 1,6 m/s am Ende der Simulation. Grund dafür ist die geringfügige Verkleinerung des Schützquerschnitts.

### 6.1.4. Parameter der hydrodynamischen Modellierung

Die Tabelle 6.3 zeigt die in der timei-Datei festgelegten zeitabhängigen Randbedingungen für den Zufluss, den Abfluss und den Wasserstand.

Der Wasserstand sinkt entsprechend dem Laborversuch im Verlauf der Simulation von 25 cm auf 16 cm ab. Während der Wasserstand in SSIIM 1 nur als unterstromige Randbedingung vorgegeben wird, erfolgt die Vorgabe in SSIIM 2 für ober- und unterstrom. Dies liegt an der Berechnung des initialen Wasserspiegels: In SSIIM 1 wird dieser mittels einer Backwater-Calculation von unterstrom nach oberstrom ermittelt. In SSIIM 2 dagegen wird ein horizontaler, zeitlich veränderlicher Was-

**Tabelle 6.3.:** Zufluss, Abfluss und Wasserstand in der timei-Datei der Simulation mit SSIIM 2

Zeitpunkt	Zufluss	Abfluss	Wasserstand
$t = 0 \text{ s}$	$1 * 10^{-6} \text{ l/s}$	3,91 l/s	25,0 cm
$t = 130 \text{ s}$	$1 * 10^{-6} \text{ l/s}$	3,11 l/s	16,0 cm

serspiegel entsprechend den Vorgaben in der timei-Datei verwendet (vgl. Kapitel 4.2.4). Die Aktualisierung des Wasserstands erfolgt nach jedem Zeitschritt. Der initiale Wasserspiegel wird aus der koordina-Datei ausgelesen. Der Abfluss entspricht dem zugehörigen Wert aus der Wasserstands-Abfluss-Beziehung des Schützes (vgl. Abbildung 3.4). Auch SSIIM 2 fordert die Eingabe eines Zuflusses. Diese erfolgt im Discharge Editor. Zunächst wird hierfür der komplette oberstromige Querschnitt in der Draufsicht als Zuflussquerschnitt definiert. Für den Zufluss wird der kleinste mögliche Wert von  $10^{-6} \text{ l/s}$  angegeben. Der Impuls des zuströmenden Wassers wird auf null gesetzt. Mittels des F85-Datensatz kann in SSIIM 2 festgelegt werden, dass ein Fehler in der Kontinuität durch Überschreiten des maximalen Wertes für das Residuum ignoriert wird. Dieser Datensatz wird hier angewendet. Somit kann der Zufluss sehr gering und damit möglichst ähnlich zu den Bedingungen des Laborversuchs (kein Zufluss) gehalten werden, ohne dass es zu einem Abbruch der Simulation kommt.

Der Zeitschritt der Simulation beträgt 1 s. Insgesamt enthält die Simulation 130 Zeitschritte. Pro Zeitschritt werden 100 innere Iterationen durchgeführt. Das Konvergenzkriterium der hydrodynamischen Modellierung beträgt 0,01 für alle sechs Residuen. Wandgesetze werden an der Sohle und den Wänden implementiert. An der Wasseroberfläche wird ein Null-Gradient festgelegt. Die Relaxationskoeffizienten betragen 0,4 für die Geschwindigkeiten in x-, y- und z-Richtung, 0,05 für die Korrektur des Druckterms und 0,2 für die turbulenten Terme  $\kappa$  und  $\epsilon$ . Diese Parameter entsprechen denen der Simulation mit SSIIM 1.

In SSIIM 2 wird im Gegensatz zu SSIIM 1 keine Blockkorrektur zur Beschleunigung des Lösungsverfahrens verwendet. Bei Anwendung der Blockkorrektur kommt es zu Instabilitäten in der Simulation und Erosionen der Sohle oberstrom des Spülkegels.

Zur Reduktion von Instabilitäten in Dreieckszellen wird ein Algorithmus implementiert, der eine zusätzliche Relaxation der Fließgeschwindigkeiten in diesen Zellen bewirkt. Der entsprechende Relaxationskoeffizient beträgt 0,5. Darüber hinaus wird der Grenzwert der Residuen, bei dem es zum Abbruch der Simulation kommt, von  $10^{10}$  auf  $10^{20}$  angehoben. Ansonsten kommt es aufgrund des zu hohen  $\epsilon$ -Residuums im ersten Zeitschritt zu einem Abbruch der Simulation.

### **6.1.5. Parameter der morphodynamischen Modellierung**

Die in diesem Kapitel verwendeten Parameter sind in Kapitel 4.3 näher erläutert. Die Parameter Dichte, Korndurchmesser, Reibungswinkel und Sinkgeschwindigkeit werden entsprechend Tabelle 3.1 implementiert. Zur Berechnung des Sedimenttransports werden die Formeln für den Schwebstofftransport und den Geschiebetransport jeweils nach van Rijn verwendet.

Der Shields-Koeffizient wird mit 0,03 angesetzt. Für den Wasseranteil in der Sedimentschicht wird der in SSIIM 2 standardmäßig implementierte Wert von 50 % gewählt. Die kritischen Schubspannungen auf geneigter Sohle werden entsprechend dem F7 B-Algorithmus reduziert. Außerdem wird der Sand-Slide-Algorithmus angewandt. Diese Parameter entsprechen denen der Simulation mit SSIIM 1.

Für die Berechnung des Sedimenttransports werden 100 innere Iterationen bei einem Konvergenzkriterium von 0,01 in der Simulation implementiert. Der Relaxationskoeffizient beträgt dabei 0,4. Diese Werte entsprechen ebenfalls der Simulation mit SSIIM 1 nach Anpassung aufgrund des Einbaus des Startkegels (vgl. Kapitel 5.2.6).

## **6.2. Ergebnisse und Interpretation**

### **6.2.1. Methoden zur Auswertung der Ergebnisse**

Für die Auswertung der mit SSIIM 2 durchgeführten Simulationen stehen dieselben Methoden wie bei SSIIM 1 zu Verfügung (vgl. Kapitel 5.3.1). Jedoch hat SSIIM 2 gegenüber SSIIM 1 einige Vorteile bei der Ergebnisauswertung:

Zum einen können in SSIIM 2 die interres-, 2-D-Paraview- und 3-D-Paraview-Dateien in einem Simulationsdurchlauf erzeugt werden. Es sind keine drei Durchläufe wie in SSIIM 1 mehr nötig. Das Intervall zur Ausgabe der Paraview-Dateien gilt hier nun auch für die interres-Dateien. Somit werden auch die interres-Dateien im Intervall von 5 s ausgegeben, sodass pro Simulation 27 interres-Dateien vorliegen.

Zum Erhalt des erodierten Gesamtvolumens ist in SSIIM 2 keine näherungsweise Berechnung über die Sohlhöhen an den 64 Messpunkten nötig. Das erodierte Gesamtvolumen wird in SSIIM 2 direkt in der result-Datei angegeben und kann von dort ausgelesen werden. Da die Berechnung in SSIIM im Bereich des Spülkegels mit einer Gitterauflösung von 1,0 mal 1,0 cm erfolgt, handelt es sich um einen genaueren Wert des erodierten Volumens.

### **6.2.2. Dreidimensionale Darstellung der Simulationsergebnisse**

Die Abbildungen 6.7 und 6.8 zeigen dreidimensionale Darstellungen der Spülkegel, die sich aus den Simulationen mit SSIIM 2 ergeben. Abbildung 6.7 zeigt den Kegel der Standardvariante und Abbildung 6.8 den Kegel der Variante mit manueller Anpassung der Schützöffnung. Der Blick richtet sich von unterstrom auf den Kegel. Der Abfluss erfolgt aus der Bildebene heraus. Die Visualisierung wird mit der Software Paraview erzeugt. Die Abbildungen zeigen die Spülkegel zum Zeitpunkt  $t=130$  s am Ende des Spülvorgangs.

Bei der Betrachtung der Kegel fällt auf, dass diese entgegen der Spülkegel aus den Simulationen mit SSIIM 1 symmetrisch bezüglich der x-Achse sind. Im Bereich nahe des Schützes erfolgt die Erosion bis zur Sohle des Glaskanals bei  $z=0$  m. Auch dies ist bei den Simulationen mit SSIIM 1 nur für Variante 3 und in geringerem Ausmaß der Fall (vgl. Kapitel 5.3.2).

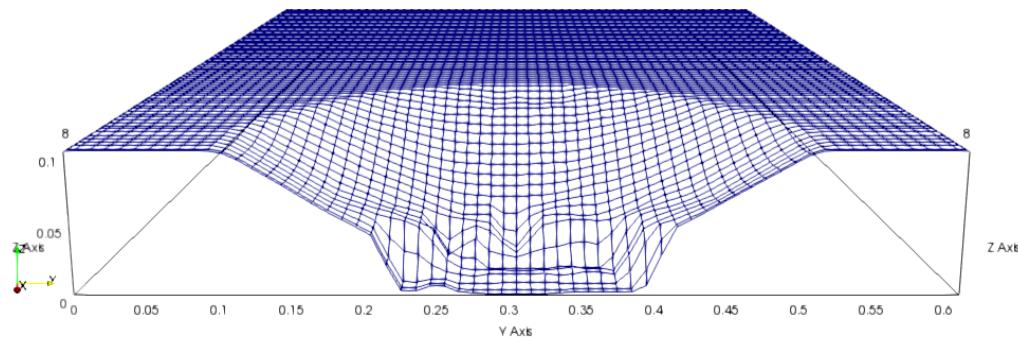
Zwischen den beiden Kegeln sind kaum Unterschiede zu erkennen. Der Kegel aus der Simulation mit manueller Anpassung der Schützöffnung weist geringfügig stärkere Erosionen in der Mitte des Kanals, ca. 5 bis 10 cm vor dem Schütz, auf.

Im oberen Bereich beider Kegel, ca. von  $z=5$  cm bis  $z=10$  cm, stellt sich eine regelmäßige Sohle ein. Die Neigung der Sohle ist hier maßgeblich durch den Reibungswinkel und den Sand-Slide-Algorithmus beeinflusst.

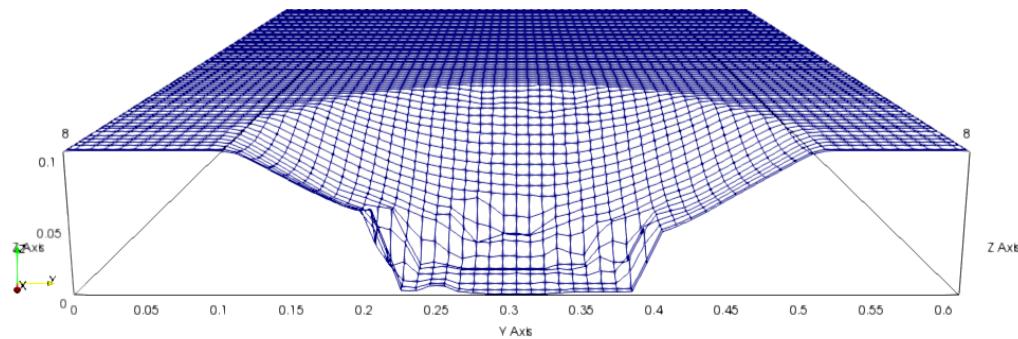
Im unteren Bereich der Kegel nahe des Schützes, ca. von  $z=0$  cm bis  $z=5$  cm,

## 6. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 2

---



**Abbildung 6.7.:** Spülkegel der Simulation mit SSIIM 2 (Standardvariante)



**Abbildung 6.8.:** Spülkegel der Simulation mit SSIIM 2 (Manuelle Anpassung der Schützöffnung)

kommt es zu Unregelmäßigkeiten in der Sohle. Der Bereich entspricht in etwa der mittleren Schützöffnung von 5 cm. Die Unregelmäßigkeiten können durch den hohen Grad an Turbulenz in diesem Bereich erklärt werden. Die Neigung der Sohle ist hier steiler als im oberen Bereich. Grund dafür ist der Einfluss des Startkegels, der ebenfalls steilere Neigungen an den Flanken hat.

### 6.2.3. Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen aus dem Laborversuch

**Erodiertes Gesamtvolumen und Root Mean Square Error** Tabelle 6.4 zeigt einen Vergleich der erodierten Gesamtvolumina aus den Simulationen mit SSIIM 2 mit dem erodierten Gesamtvolumen des physikalischen Modellversuchs. Weiterhin enthält die Tabelle die Root Mean Square Errors der Simulationen.

**Tabelle 6.4.:** Vergleich des erodierten Gesamtvolumens und des RMSE der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 mit dem Laborversuch

Variante	Labor	Standard	Schützöffnung manuell
<b>erodiertes Vol. [cm<sup>3</sup>]</b>	3468,62	2875,45	2929,56
<b>Abweichung</b>	0,00%	-17,10%	-15,54%
<b>RMSE [cm]</b>	0,00	0,89	0,84

Bei der Betrachtung der erodierten Gesamtvolumina fällt auf, dass beide Simulationen das Volumen des Spülkegels unterschätzen. Die Abweichung vom Spülkegel des Laborversuchs beträgt bei der Standardvariante 17,10 % und bei der Variante mit manueller Anpassung der Schützöffnung 15,54 %. Diese liefert damit ein geringfügig besseres Ergebnis bezüglich des erodierten Volumens. Dies gilt auch bei Betrachtung des RMSE. Die Simulation mit manueller Anpassung der Schützöffnung führt zu einem RMSE von 0,84 cm. Der Root Mean Square Error der Standardsimulation beträgt 0,89 cm und ist damit geringfügig schlechter. Insgesamt deuten die kleinen Werte der RMSEs auf eine hohe Genauigkeit der Simulationen hin.

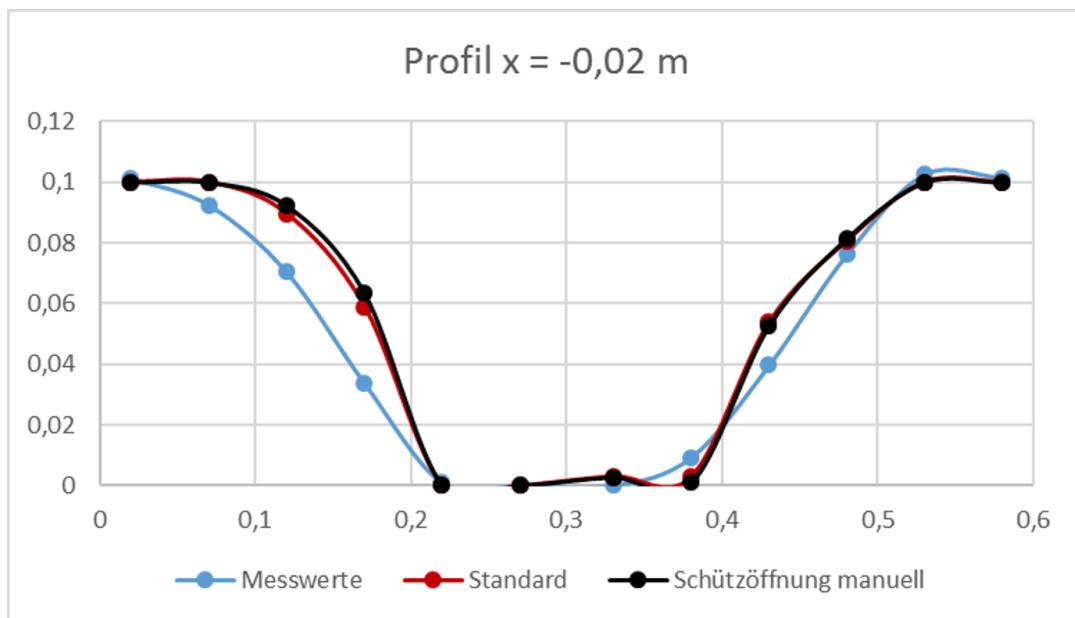
**Querschnitte** Die Querschnitte sind in den Abbildungen 6.9, 6.10, 6.11, 6.12, 6.13 und 6.14 dargestellt. Dabei werden jeweils die Messwerte aus dem Laborversuch (blau) mit den Simulationsergebnissen der Sohlhöhen für die Standardvariante (rot) und die Variante mit manueller Anpassung der Schützöffnung (schwarz) verglichen.

Abbildung 6.9 zeigt den Querschnitt an der Stelle x=-0,02 m unmittelbar vor dem Schütz. Es treten dabei nur vernachlässigbar kleine Unterschiede zwischen den Spülkegeln der beiden Simulationen auf. Insgesamt werden gute Ergebnisse erzielt. Es kommt zur Erosion bis zur Kanalsohle auf einer Breite von ca. 16 cm, ähnlich wie beim Spülkegel des Laborversuchs. Die Simulationen unterschätzen den Kegel des Laborversuchs leicht.

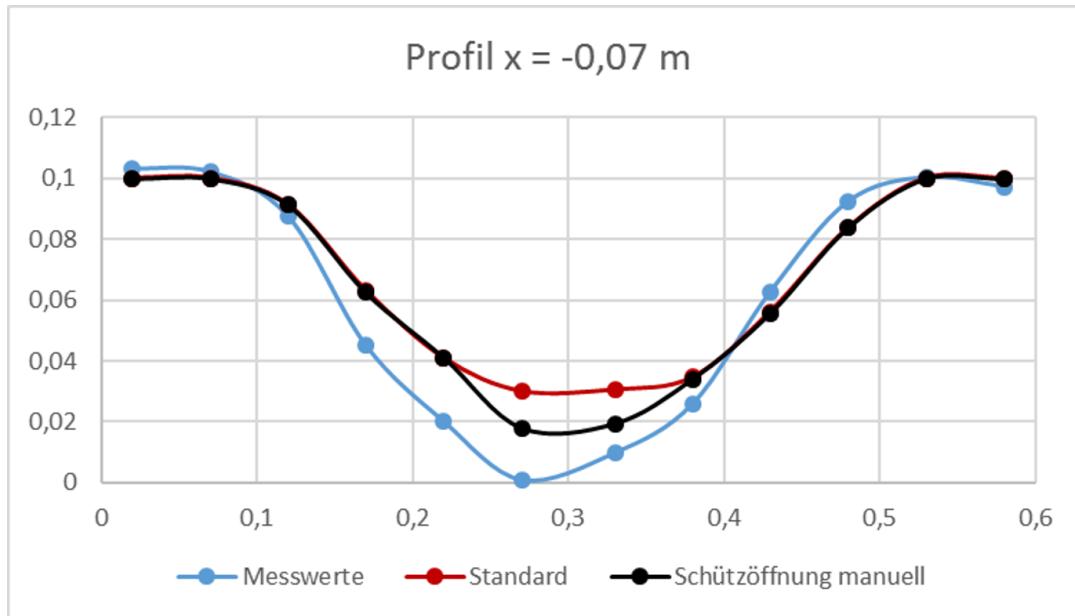
Zu einer Unterschätzung des Kegels kommt es auch im Profil an der Stelle x=-0,07 m (vgl. Abbildung 6.10). In beiden Simulationen kommt es hier nicht zur Erosion bis zur Kanalsohle, wie dies im Laborversuch der Fall ist. Dies ist das einzige Profil, in dem signifikante Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Simula-

## 6. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 2

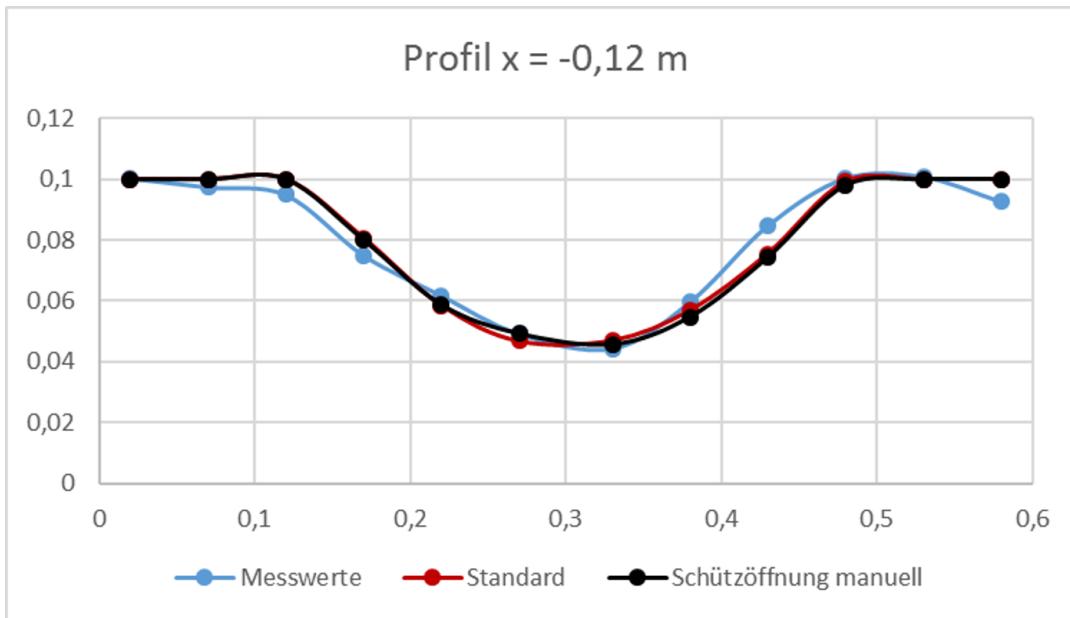
---



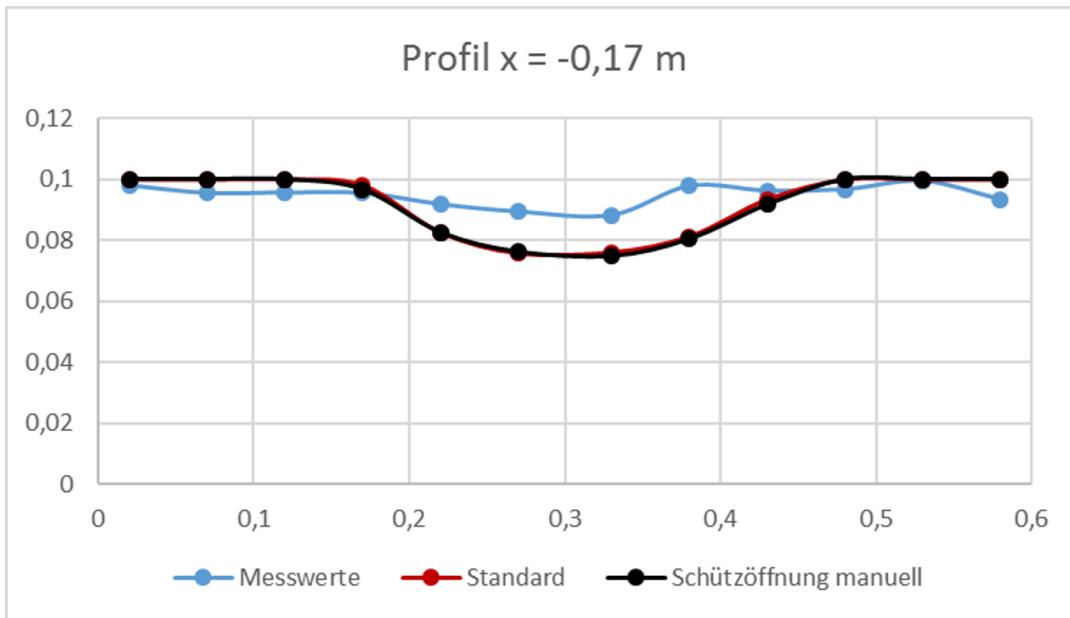
**Abbildung 6.9.:** Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 und des Laborver-  
suchs am Querprofil x=-0,02 m



**Abbildung 6.10.:** Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 und des Labor-  
versuchs am Querprofil x=-0,07 m



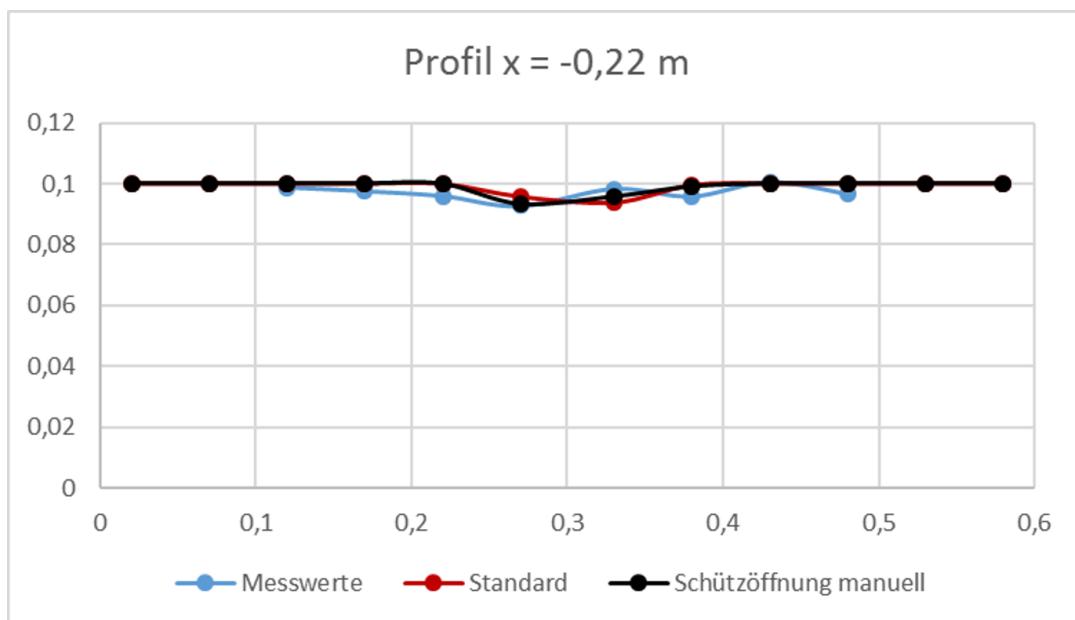
**Abbildung 6.11.:** Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 und des Laborversuchs am Querprofil  $x=-0,12\text{ m}$



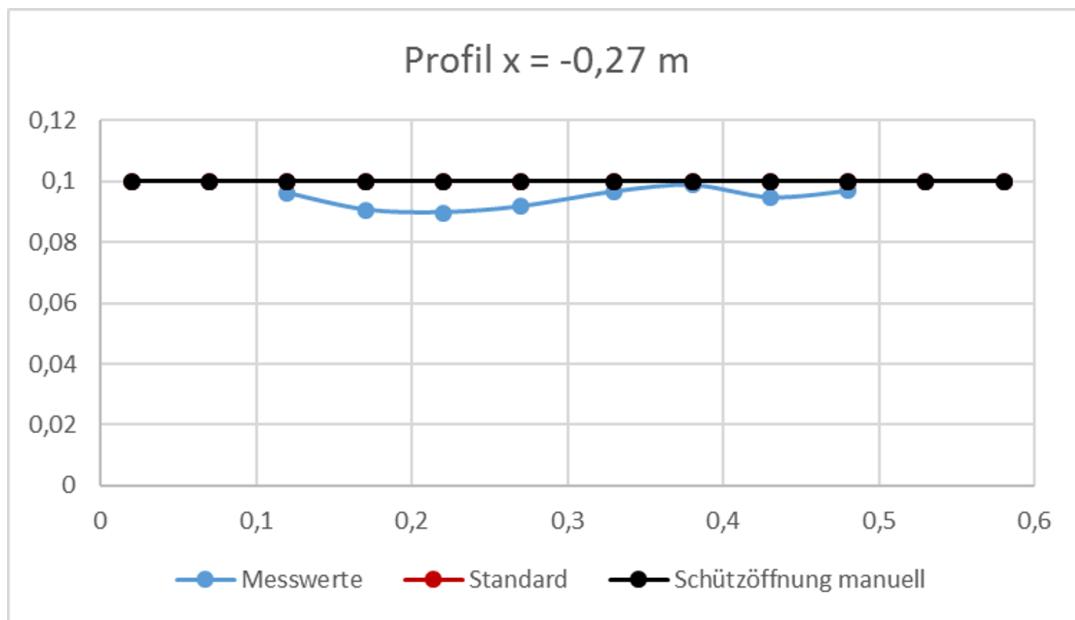
**Abbildung 6.12.:** Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 und des Laborversuchs am Querprofil  $x=-0,17\text{ m}$

## 6. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 2

---



**Abbildung 6.13.:** Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 und des Laborversuchs am Querprofil x=-0,22 m



**Abbildung 6.14.:** Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 und des Laborversuchs am Querprofil x=-0,27 m

tionen erkennbar sind. Die Simulation mit manueller Anpassung der Schützöffnung liefert in der Kanalmitte hier die besseren Ergebnisse, da es zu stärkerer Erosion als bei der Standardvariante kommt. Die beiden Messpunkte in der Kanalmitte dieses Profils sind maßgeblich für das größere erodierte Gesamtvolumen und den besseren RMSE der Variante mit manueller Anpassung der Schützöffnung.

An der Stelle  $x=-0,12$  m (vgl. Abbildung 6.11) spiegeln die Simulationen nahezu exakt den Kegel des Laborversuchs wieder. Die minimalen Abweichungen zum Laborversuch können hier vernachlässigt werden. Im Profil  $x=-0,17$  m (vgl. Abbildung 6.12) kommt es zu einer leichten Überschätzung des Spülkegels durch die Simulationen.

In den Profilen bei  $x=-0,22$  m und  $x=-0,27$  m (vgl. Abbildungen 6.13 und 6.14) kommt es weder im Laborversuch noch in der Simulation zu nennenswerten Erosionen. Damit führen die Simulationen in diesem Bereich zu guten Ergebnissen.

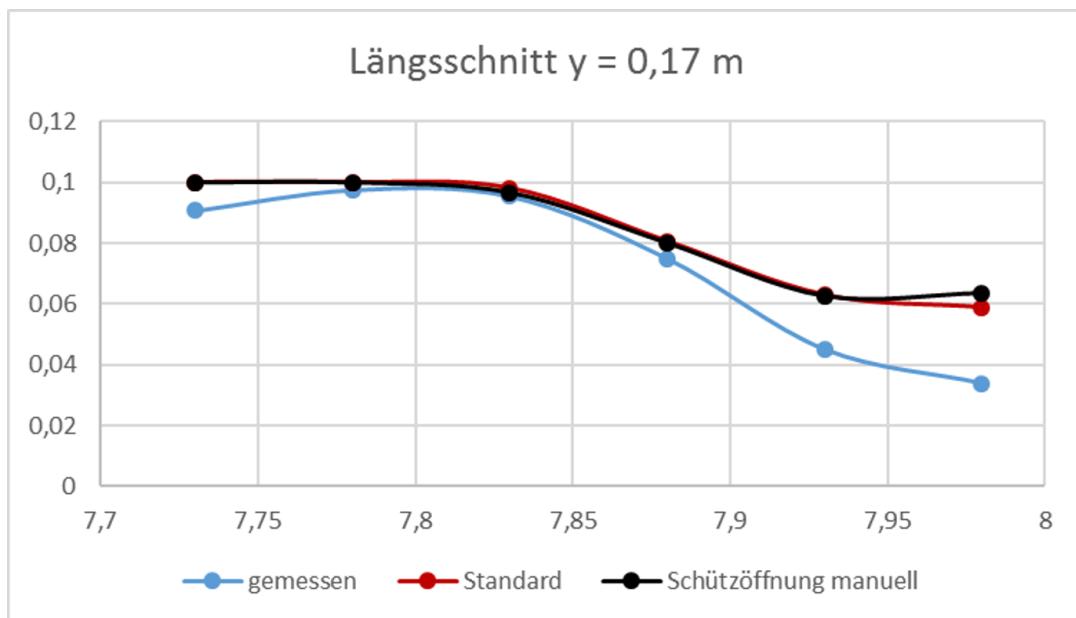
**Längsschnitte** Zusätzlich zu den Querschnitten werden die beiden Längsschnitte an den Stellen  $y=0,17$  m und  $y=0,305$  m (Kanalmitte) betrachtet (vgl. Abbildungen 6.15 und 6.16).

Der Längsschnitt an der Stelle  $y=0,17$  m (vgl. Abbildung 6.15) zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Simulationsvarianten. Es kommt hier zur Unterschätzung des Spülkegels aus dem Laborversuch. Die Unterschätzung nimmt mit sinkendem Abstand zum Schütz zu und beträgt dort ca. 3,5 cm.

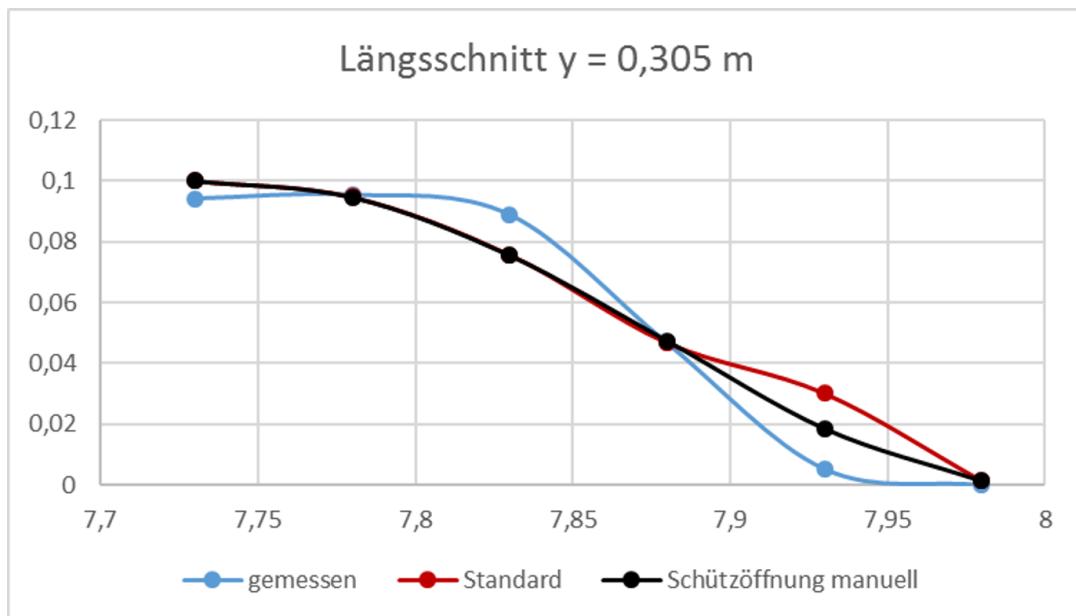
Im Längsschnitt in Kanalmitte (vgl. Abbildung 6.16) zeigen die Messwerte des Laborversuchs eine ebene Sohle des Kegels bis ca. 6 cm vor dem Schütz, da dort bis zum Boden des Glaskanals erodiert wird. Dahinter bildet sich eine steile Sohlneigung aus, die ab ca. 17 cm vor dem Schütz wieder abflacht. Die Simulationen hingegen führen zu einer quasi konstanten, flacheren Sohlneigung von ca. 22 cm bis 2 cm vor dem Schütz. Aufgrund dessen wird der Spülkegel nahe des Schützes unterschätzt und weiter entfernt vom Schütz überschätzt. Die Grenze zwischen Über- und Unterschätzung liegt 12 cm vor dem Schütz. Hier ist außerdem erneut die stärkere Erosion der Variante mit manueller Anpassung der Schützöffnung ca. 7 cm vor dem Schütz zu erkennen.

Aus den Graphen beider Längsschnitte ist abzulesen, dass die Unterschätzung betragsmäßig größer ist als die Überschätzung. Dies führt insgesamt zur Unterschätzung des erodierten Gesamtvolumens.

## 6. Simulation des Laborversuchs mit SSIIM 2



**Abbildung 6.15.:** Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 und des Laborversuchs am Längsschnitt  $y=0,17 \text{ m}$



**Abbildung 6.16.:** Sohlhöhen der Simulationsergebnisse in SSIIM 2 und des Laborversuchs am Längsschnitt  $y=0,305 \text{ m}$

**Zusammenfassung und Vergleich mit den Ergebnissen aus SSIIM 1** Die Simulationen in SSIIM 2 sind mit RMSEs von 0,89 cm und 0,84 cm als sehr genau zu betrachten. Die Simulation mit manueller Anpassung der Schützöffnung liefert sowohl bezüglich des RMSE als auch bezüglich des erodierten Volumens geringfügig bessere Ergebnisse.

Die RMSEs der Simulationen mit SSIIM 1 betragen im Vergleich dazu 2,38 cm für Variante 1, 2,11 cm für Variante 2 und 1,89 cm für Variante 3 (vgl. Kapitel 5.3.3). Damit sind die Abweichungen von den 64 Messpunkten bei den Simulationen mit SSIIM 2 im Mittel über 50 % kleiner als die Abweichungen der Simulationen mit SSIIM 1. Bei der Betrachtung der Ergebnisse von SSIIM 2 ist außerdem keine Asymmetrie zu erkennen. In SSIIM 2 wird dieselbe Geometrie wie in SSIIM 1 verwendet. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass ein Fehler im Programm der Grund für die Asymmetrie in SSIIM 1 ist.

Der Spülkegel wird in SSIIM 2 nahe des Schützes unterschätzt und weiter entfernt vom Schütz überschätzt. Die Sohlneigung ist damit flacher als im Laborversuch. Dieses Phänomen tritt auch bei den Simulationen mit SSIIM 1 auf. Allerdings sind die Abweichungen von den Messwerten dort größer, was sich in den größeren RMSEs äußert.



# **7. Parameterstudien**

Dieses Kapitel beinhaltet die Sensitivitätsanalysen der in den Kapiteln 5 und 6 durchgeführten Simulationen. Für die Simulationen in SSIIM 1 und SSIIM 2 werden verschiedene Parameter verändert, um deren Auswirkung auf das Simulationsergebnis zu untersuchen und kritische Parameter zu ermitteln.

## **7.1. Übersicht**

In SSIIM 1 werden die Parameterstudien für die Simulationsvarianten 1 und 2 durchgeführt. In SSIIM 2 werden die Parameter bezüglich der Standardsimulation verändert. Die Variante 3 aus SSIIM 1 (Aufteilung der Simulation in mehrere Einzelsimulationen) und die Variante mit manueller Anpassung der Schützöffnung aus SSIIM 2 werden hier vernachlässigt, da sie einen nicht vertretbaren Aufwand darstellen.

Die Parameter, deren Variationen und die Ergebnisse der Studien sind für SSIIM 1 in den Tabellen 7.1 (Variante 1) und 7.2 (Variante 2) dargestellt. Tabelle 7.3 zeigt eine Übersicht der Parameterstudien in SSIIM 2.

Die Auswertung der Studien erfolgt über die Abweichung des erodierten Volumens gegenüber der Standardsimulationen sowie über den Root Mean Square Error. Dieser bezieht sich auf die Abweichung der Parameterstudie vom Laborversuch. Zum Vergleich sind daher die Ergebnisse des Laborversuchs und der Standardsimulationen in den ersten beiden Zellen der Tabellen dargestellt. Damit kann zum einen der Einfluss des Parameters auf das erodierte Gesamtvolume betrachtet werden. Zum anderen kann anhand des RMSE beobachtet werden, wie sich die Genauigkeit der Simulation hinsichtlich des Laborversuchs verhält.

## 7. Parameterstudien

---

**Tabelle 7.1.:** Parameterstudien und deren Ergebnisse für die Simulationsvariante 1 in SSIIM 1

Parameter	Einheit	Standard-Wert	Variation	erodiertes Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Abweichung von der Standardsim.	RMSE [cm]
<i>Laborversuch</i>	-	-	-	3468,62	-	-
<i>Standardsim. (V1)</i>	-	-	-	3148,95	-	2,38
innere Iterationen	-	100	200	1194,07	-62,08%	2,36
			800	870,21	-72,37%	2,73
Anzahl Zellen in z-Richtung	-	10	25	980,90	-68,85%	2,63
			50	655,67	-79,18%	2,91
Transportformel	-	BL & SL (van Rijn)	SL (van Rijn)	1169,23	-62,87%	2,49
			BL (van Rijn)	1880,13	-40,29%	2,16
			Wu-Formel	860,82	-72,66%	2,74
Sedimentdichte	[t/m <sup>3</sup> ]	1,18	1,30	1307,59	-58,48%	2,41
Shields-Parameter	-	0,03	0,035	2065,78	-34,40%	2,14
Reibungswinkel	[°]	30,1	27,9	3276,37	4,05%	2,48
			31,8	3320,95	5,46%	2,34
			34,6	2862,43	-9,10%	2,15
Sinkgeschwindigk.	[m/s]	5,65*10 <sup>-4</sup>	6,22 *10 <sup>-4</sup>	3083,95	-2,06%	2,37

**Tabelle 7.2.:** Parameterstudien und deren Ergebnisse für die Simulationsvariante 2 in SSIIM 1

Parameter	Einheit	Standard-Wert	Variation	erodiertes Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Abweichung von der Standardsim.	RMSE [cm]
<i>Laborversuch</i>	-	-	-	3468,62	-	-
<i>Standardsim. (V2)</i>	-	-	-	2462,90	-	2,11
innere Iterationen	-	100	200	2372,20	-3,68%	1,93
Anzahl Zellen in z-Richtung	-	10	25	2639,19	7,16%	1,92
Transportformel	-	BL & SL (van Rijn)	SL (van Rijn)	2097,59	-14,83%	2,11
			BL (van Rijn)	2525,24	2,53%	2,26
			Wu-Formel	2089,17	-15,17%	2,24
Sedimentdichte	[t/m <sup>3</sup> ]	1,18	1,30	2042,60	-17,07%	2,14
Shields-Parameter	-	0,03	0,035	2039,40	-17,20%	2,14
Reibungswinkel	[°]	30,1	27,9	2456,15	-0,27%	2,12
			31,8	2263,51	-8,10%	2,03
			34,6	1963,92	-20,26%	2,00
Sinkgeschwindigk.	[m/s]	5,65*10 <sup>-4</sup>	6,22 *10 <sup>-4</sup>	2471,20	0,34%	2,15

## 7. Parameterstudien

---

**Tabelle 7.3.:** Parameterstudien und deren Ergebnisse für die Simulation in SSIIM 2

Parameter	Einheit	Standard-Wert	Variation	erodiertes Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Abweichung von der Standardsim.	RMSE [cm]
Laborversuch	-	-	-	3468,62	-	-
Standardsim.	-	-	-	2875,45	-	0,89
innere Iterationen	-	100	200	2875,24	-0,01%	1,08
			400	2658,77	-7,54%	1,21
Anzahl Zellen in z-Richtung	-	10	20	3874,64	34,75%	1,18
Transportformel	-	BL & SL (van Rijn)	SL (van Rijn)	2044,46	-28,90%	1,36
			BL (van Rijn)	2603,96	-9,44%	1,12
			Wu-Formel	1922,03	-33,16%	1,66
			MPM-Formel	2202,20	-23,41%	1,32
Sedimentdichte	[t/m <sup>3</sup> ]	1,18	1,30	2123,90	-26,14%	1,32
Shields-Parameter	-	0,03	0,035	2913,36	1,32%	0,82
			0,04	2892,74	0,60%	0,88
			0,047	2821,13	-1,89%	0,85
Reibungswinkel	[°]	30,1	27,9	2582,75	-10,18%	1,02
			31,8	2925,05	1,72%	0,90
			34,6	3214,09	11,78%	0,88
Sinkgeschwindigk.	[m/s]	5,65*10 <sup>-4</sup>	6,22 *10 <sup>-4</sup>	2879,82	0,15%	0,85
Algorithmus zur Berechnung des WSP	-	horiz. WSP	Press. Bern.	2862,71	-0,44%	0,89
			IPDA	3291,45	14,47%	1,21
			IDWA	2705,54	-5,91%	0,94
Algorithmus zur Gittergenerierung	-	F64 2	F64 11	2400,70	-16,51%	1,18
			F64 1	2921,77	1,61%	1,01
			F64 13	2423,84	-15,71%	1,18
Relaxationskoeff.	-	*	Halbierung	2818,07	-2,00%	1,02

## 7.2. Innere Iterationen

Die Standardsimulationen werden mit 100 inneren Iterationen durchgeführt. Zur Untersuchung des Einflusses der Anzahl innerer Iterationen werden diese auf 200 erhöht. Für die Simulation in SSIIM 2 erfolgt zusätzlich eine Erhöhung auf 400 innere Iterationen. Für Variante 1 (SSIIM 1) erfolgt außerdem zusätzlich eine Simulation mit 800 inneren Iterationen.

In Tabelle 7.1 ist zu sehen, dass sich die Erhöhung der inneren Iterationen bei Variante 1 (SSIIM 1) erheblich auf das erodierte Volumen auswirkt. Die Erhöhung auf 200 innere Iterationen führt zu einer Reduktion des erodierten Volumens um 62,08 % bezüglich der Standardsimulation. Die Erhöhung auf 800 innere Iterationen führt zu einer Reduktion um 72,37 %. Ziel bei einer jeden Simulation ist deren Unabhängigkeit von der Anzahl innerer Iterationen. Für Variante 1 ist daher festzustellen, dass diese Unabhängigkeit nicht gegeben ist. Jedoch führt die Verwendung einer hohen Anzahl innerer Iterationen (800) zu einem geringen Kegelvolumen von nur 870,21 cm<sup>3</sup> und einem hohen RMSE von 2,73 cm. Die Parameterstudie mit 200 inneren Iterationen führt bezüglich des RMSE (2,36 cm) zum besten Ergebnis, liefert jedoch auch ein sehr geringes Volumen (1194,07 cm<sup>3</sup>).

Tabelle 7.2 zeigt eine geringe Reduktion des erodierten Volumens um 3,68 % bei Erhöhung der inneren Iterationen auf 200 für Variante 2 (SSIIM 1). Diese Änderung ist vernachlässigbar klein. Damit kann die o.g. Unabhängigkeit von der Anzahl innerer Iterationen für Variante 2 als gegeben angesehen werden. 100 innere Iterationen sind somit ausreichend. Es ist zu beachten, dass auch hier die Simulation mit 200 inneren Iterationen zum besten RMSE (1,93 cm) führt.

Bei der Simulation in SSIIM 2 (vgl. Tabelle 7.3) führt die Erhöhung auf 200 innere Iterationen zu keiner Veränderung des erodierten Volumens, jedoch zu einem größeren RMSE (1,08 cm). Die weitere Erhöhung auf 400 innere Iterationen führt dann zu einer Reduktion des erodierten Volumens um 7,54 % und zu einer weiteren Verschlechterung des RMSE (1,21 cm). Im Gegensatz zu SSIIM 1 liefert hier also die Standardsimulation mit 100 inneren Iterationen das genaueste Ergebnis. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass dies eine ausreichende Anzahl an inneren Iterationen darstellt.

### 7.3. Verfeinerung des Gitters in vertikaler Richtung

Die Standardsimulationen werden mit 10 Gitterzellen in vertikaler Richtung durchgeführt. Zur Untersuchung des Einflusses der Anzahl vertikaler Zellen werden diese auf 20 (SSIIM 2) bzw. 25 (SSIIM 1) erhöht. Für Variante 1 in SSIIM 1 erfolgt außerdem zusätzlich eine Simulation mit 50 Zellen in vertikaler Richtung.

Ähnlich wie die Erhöhung der inneren Iterationen wirkt sich auch die Erhöhung der Anzahl vertikaler Zellen für Variante 1 in Form einer Reduktion des erodierten Volumens aus. 25 Zellen führen zu einer Reduktion des Volumens um 68,85 %, 50 Zellen zu einer Reduktion um 79,18 % (vgl. Tabelle 7.1). Für Variante 1 ist damit keine Gitterunabhängigkeit gegeben.

Im Gegensatz dazu führt die Erhöhung der Zellanzahl bei Variante 2 zu einer Vergrößerung des erodierten Volumens um 7,16 % (vgl. Tabelle 7.2). Die Abweichung vom Volumen der Standardsimulation ist betragsmäßig betrachtet deutlich geringer als bei Variante 1, was auf eine höhere Stabilität hindeutet. Die Simulation mit 25 Zellen liefert für Variante 2 jedoch sowohl bezüglich des erodierten Volumens ( $2639,19 \text{ cm}^3$ ) als auch bezüglich des RMSE (1,92 cm) bessere Ergebnisse als die Standardsimulation.

Nach Olsen (2018) ist die Höhe der Zelle nahe der Sohle ein entscheidender Parameter für die Simulation des Sedimenttransports. Sie soll variiert und über Vergleiche mit Laborversuchen kalibriert werden. Für Variante 2 liefert die vertikale Aufteilung in 25 Zellen die genauesten Ergebnisse. Dabei beträgt die Höhe der sohnahen Zelle 0,82 cm.

In SSIIM 2 führt die Erhöhung der Anzahl vertikaler Gitterzellen ebenfalls zu einer Vergrößerung des Volumens (vgl. Tabelle 7.3). Die Simulation mit 20 Zellen in vertikaler Richtung führt zu einer Vergrößerung des Kegelvolumens um 34,75 %. Gleichzeitig erhöht sich der RMSE auf 1,18 cm. Die Volumenvergrößerung ist wie bei Variante 2 (SSIIM 1) auf den Einfluss der Höhe der sohnahen Zelle zurückzuführen. Diese ist abhängig vom Wasserstand und der Gesamtzahl an Zellen in vertikaler Richtung. Die Standardsimulation mit 10 Zellen in vertikaler Richtung liefert somit für SSIIM 2 die genauesten Ergebnisse bezüglich des RMSE.

## 7.4. Transportformel

In SSIIM stehen verschiedene Formeln zur Berechnung des Sedimenttransports zur Verfügung (vgl. Kapitel 4.3). Standardmäßig werden die Formeln für den Geschiebe- und den Schwebstofftransport nach van Rijn verwendet. In dieser Parameterstudie werden stattdessen Simulationen nur mit der Schwebstofftransportformel (SL), nur mit der Geschiebetransportformel (BL) und mit der Formel nach Wu durchgeführt. SSIIM 2 verfügt darüber hinaus über die Möglichkeit, die Formel nach Meyer-Peter und Müller zu verwenden.

Für Variante 1 (SSIIM 1) kommt es bei Verwendung aller alternativen Formeln zu einer signifikanten Reduktion des erodierten Volumens. Am größten ist die Reduktion bei Verwendung der Formel nach Wu (72,66 %), gefolgt von der Schwebstofftransportformel (62,87 %) und der Geschiebetransportformel (40,29 %). Mit der Geschiebetransportformel wird jedoch ein besserer RMSE (2,16 cm) als mit der Standardsimulation (2,38 cm) erreicht (vgl. Tabelle 7.1).

Für Variante 2 (SSIIM 1) kommt es bei Verwendung der Formel nach Wu und der Schwebstofftransportformel zu einer Verringerung des erodierten Volumens um jeweils ca. 15 % (vgl. Tabelle 7.2). Die Geschiebetransportformel dagegen führt jedoch hier zu kaum einer Volumenänderung (Vergrößerung um 2,53 %). Keine der drei Formeln führt zu einer Verbesserung des RMSE.

In SSIIM 2 führen erneut alle Transportformeln zu einer Verringerung des erodierten Volumens. Diese ist bei der Verwendung der Formel nach Wu am größten (33,16 %), gefolgt von der Schwebstofftransportformel (28,90 %), der Formel nach Meyer-Peter und Müller (23,41 %) und der Geschiebetransportformel (9,44 %). Erneut führt keine der drei Formeln zu einer Verbesserung des RMSE (vgl. Tabelle 7.3).

Insgesamt ist die Verwendung der Kombination aus Schwebstoff- und Geschiebetransportform nach van Rijn als die beste Option anzusehen.

## 7.5. Sedimentdichte und Shields-Parameter

Die Sedimentdichte beträgt in den Standardsimulationen  $1,18 \text{ t/m}^3$ . Sie wird um 10 % auf  $1,30 \text{ t/m}^3$  erhöht. Der Shields-Parameter wird von standardmäßig 0,03 auf 0,035 erhöht. Dies entspricht einer Erhöhung von 16,67 %. In SSIIM 2 werden

## 7. Parameterstudien

---

zusätzlich Studien mit Shields-Parametern von 0,04 und 0,047 durchgeführt.

Bei Variante 1 (SSIIM 1) führt die Änderung der Sedimentdichte zu einer Reduktion des Volumens um 58,48 %. Die Änderung des Shields-Parameters führt ebenfalls zu einer Reduktion des Volumens, jedoch nur um 34,40 % (vgl. Tabelle 7.1). Bei Variante 2 (SSIIM 1) führen die Änderung der Sedimentdichte und des Shields-Parameters jeweils zu einer Reduktion des Volumens um ca. 17 % (vgl. Tabelle 7.2).

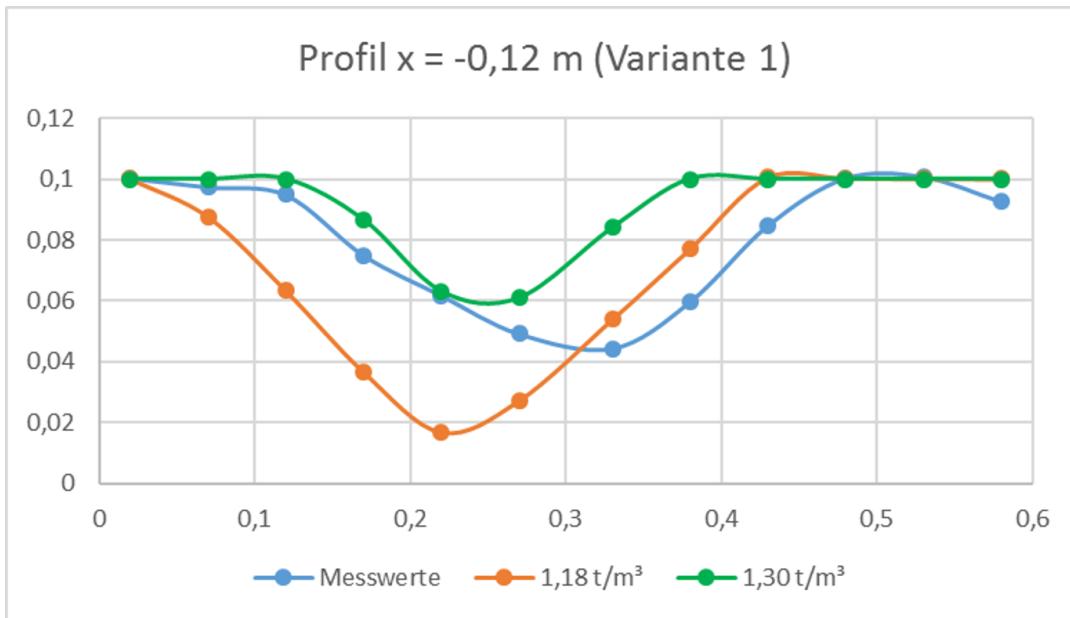
In SSIIM 2 führt die Änderung der Sedimentdichte zu einer Reduktion des Volumens um 26,14 %. Dagegen kommt es durch die Variation des Shields-Parameters zu keiner nennenswerten Veränderung des erodierten Gesamtvolumens (vgl. Tabelle 7.3). Die Änderungen sind betragsmäßig alle kleiner als 2 % und können damit vernachlässigt werden.

Bezüglich des RMSE kommt es sowohl in SSIIM 1 als auch in SSIIM 2 kaum zu einer Änderung bezüglich der Standardsimulationen. Der Shields-Parameter von 0,035 führt bei Variante 1 (SSIIM 1) und in SSIIM 2 jeweils zum geringsten RMSE von 2,14 cm bzw. 0,82 cm. Die in SSIIM 2 durchgeführte Simulation mit dem Shields-Parameter von 0,035 führt von allen Simulationen zum genauesten Ergebnis des Spülkegels hinsichtlich des RMSE.

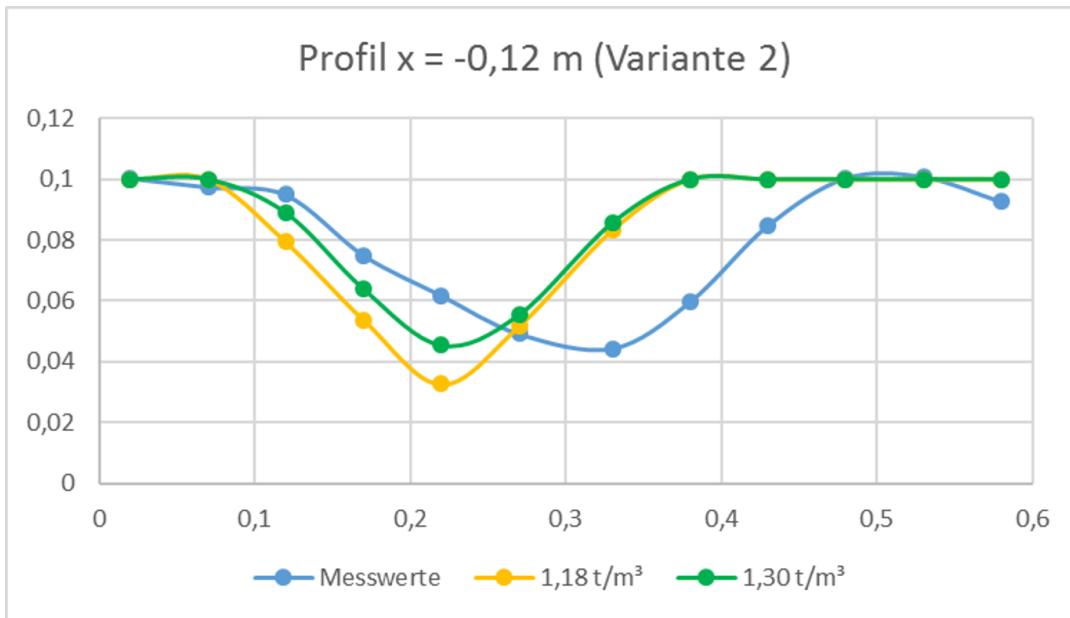
Insgesamt kann also festgestellt werden, dass sich eine Änderung der Sedimentdichte stärker auf das erodierte Volumen auswirkt als eine Änderung des Shields-Parameters. Obwohl eine prozentual stärkere Erhöhung des Shields-Parameters durchgeführt wird, sind die Änderungen am erodierten Volumen geringer bzw. gleich groß als bei Erhöhung der Sedimentdichte. Die geringeren Volumen entsprechen der Erwartung bei Erhöhung der Dichte und des Shields-Parameters.

Die Auswirkungen der Parametervariation sind in Variante 1 (SSIIM 1) erneut größer als in Variante 2 (SSIIM 1) und in SSIIM 2. Grund hierfür sind die geringeren Sohlschubspannungen bei Variante 1 aufgrund der Schützöffnung über die gesamte Tiefe des Wasserspiegels.

Dies wird beispielhaft durch die beiden Abbildungen 7.1 und 7.2 verdeutlicht. Sie zeigen die Parameterstudie zur Sedimentdichte der Varianten 1 und 2 (SSIIM 1) im Profil  $x=-0,12$  m. Dabei ist zu sehen, dass die Erhöhung der Dichte bei Variante 1 zu einer deutlich größeren Abweichung von der ursprünglichen Simulation führt, als dies bei Variante 2 der Fall ist.



**Abbildung 7.1.:** Parameterstudie zur Sedimentdichte am Profil x=-0,12 m für Variante 1



**Abbildung 7.2.:** Parameterstudie zur Sedimentdichte am Profil x=-0,12 m für Variante 2

## 7.6. Reibungswinkel

Der Reibungswinkel ist in SSIIM im Sand-Slide-Algorithmus implementiert. In den Standardsimulationen wird ein Reibungswinkel von  $30,1^\circ$  verwendet. Zur Untersuchung des Einflusses auf die Ergebnisse werden Simulationen mit Reibungswinkeln von  $27,9^\circ$ ,  $31,8^\circ$  und  $34,6^\circ$  durchgeführt.

In Variante 1 (SSIIM 1) kommt es bei Verwendung der Reibungswinkel von  $27,9^\circ$  und  $31,8^\circ$  zu einer geringfügigen Vergrößerung des erodierten Volumens um 4,05 % bzw. 5,46 %. Beim Reibungswinkel von  $34,6^\circ$  hingegen kommt es zu einer Reduktion des Volumens um 9,10 % (vgl. Tabelle 7.2).

In Variante 2 (SSIIM 1) führt der kleinere Reibungswinkel zu keiner nennenswerten Änderung im Volumen (-0,27 %). Die Vergrößerung des Winkels auf  $31,8^\circ$  und  $34,6^\circ$  führt zu geringeren Volumina der Spülkegel und Reduktionen von 8,10 % bzw. 20,26 % (vgl. Tabelle 7.1).

In SSIIM 2 kommt es bei Verwendung des Reibungswinkels von  $27,9^\circ$  zu einer Volumenreduktion von 10,18 %, bei Verwendung des Winkels von  $31,8^\circ$  zu keiner nennenswerten Veränderung des Volumens (1,72 %) und bei Verwendung des Reibungswinkels von  $34,6^\circ$  zu einer Erhöhung des erodierten Volumens um 11,78 % (vgl. Tabelle 7.3).

Damit lässt sich aus den in dieser Arbeit durchgeführten Parameterstudien keine direkte Beziehung zwischen dem Reibungswinkel und dem erodierten Gesamtvolume ableiten. Jedoch ergibt sich eine Beziehung zwischen dem Reibungswinkel und dem RMSE: Mit steigendem Reibungswinkel sinkt der RMSE in allen Varianten in SSIIM 1 und SSIIM 2. Dies entspricht der ursprünglichen Auswertung, in der festgestellt wurde, dass der Spülkegel der Simulationen im Vergleich zum Laborversuch eine zu flache Neigung aufweist. Mit steigendem Reibungswinkel erhöht sich diese Neigung und führt somit zu genaueren Ergebnissen.

## 7.7. Sinkgeschwindigkeit

Die Sinkgeschwindigkeit beträgt in den Standardsimulationen  $5,65 \cdot 10^{-5}$  m/s und wird in den Studien um 10 % auf  $6,22 \cdot 10^{-5}$  m/s erhöht.

Sowohl bei den beiden Varianten in SSIIM 1 als auch bei SSIIM 2 ist jedoch kein

Einfluss der Sinkgeschwindigkeit auf das erodierte Gesamtvolumen zu sehen. Die betragsmäßig größte Volumenabweichung ist eine Reduktion des Volumens in Variante 1 (SSIIM 1) um 2,06 %. Die Änderung des RMSE ist in allen Simulationen kleiner als 0,08 cm und damit vernachlässigbar.

Die Simulationsergebnisse sind somit unabhängig von der Sinkgeschwindigkeit. Dies entspricht den Erwartungen, da es nach einmaliger Erosion der Sedimente nicht zu einer erneuten Ablagerung kommt. Alle Sedimente, die erodiert werden, werden aus dem Stauraum des Laborversuchs herausgespült.

## **7.8. Algorithmus zur Berechnung des Wasserspiegels (SSIIM 2)**

In SSIIM 2 stehen verschiedene Algorithmen zur Berechnung des Wasserspiegels zur Verfügung (vgl. Kapitel 4.2.4). Standardmäßig wird ein horizontaler Wasserspiegel verwendet, der nach den Vorgaben in der timei-Datei abgesenkt wird. Alternativ dazu werden Studien mit dem Pressure-Bernoulli-Algorithmus, dem IPDA-Algorithmus und dem IDWA-Algorithmus durchgeführt.

Die Vorgabe des absinkenden Wasserspiegels erfolgt weiterhin über die Angaben in der timei-Datei. Jedoch wird im Gegensatz zur Standardsimulation nur der Unterwasserstand am Schütz vorgegeben. Der Wasserstand an den übrigen Gitterpunkten wird über den entsprechenden Algorithmus berechnet.

Der Pressure-Bernoulli-Algorithmus führt kaum zu Veränderungen bezüglich der Standardsimulation: Das erodierte Volumen reduziert sich um vernachlässigbare 0,44 %. Der RMSE ist mit 0,89 cm gleich groß wie der RMSE der Standardsimulation (vgl. Tabelle 7.3). Bei Verwendung des IPDA-Algorithmus kommt es zu einer Vergrößerung des Spülkegels um 14,47 % und einem RMSE von 1,21 cm. Der IDWA-Algorithmus führt zu einer Reduktion des Kegelvolumens um 5,91 % und zu einem RMSE von 0,94 cm.

Damit sind sowohl der IPDA-Algorithmus als auch der IDWA-Algorithmus als schlechter geeignet zu betrachten, da sie zu höheren RMSEs und damit zu einem ungenauerem Ergebnis führen. Der Pressure-Bernoulli-Algorithmus hingegen kann anstelle des horizontalen Wasserspiegels verwendet werden. Der Pressure-Bernoulli-

Algorithmus wird auch in SSIIM 1 verwendet.

Weiterhin wird versucht, den CGA-Algorithmus zu verwenden (Continuity and Gravity on an Adaptive Grid). Dabei handelt es sich um eine Abwandlung des Gravity and Control Volume-Algorithmus. Jedoch kommt es bei Verwendung dieses Algorithmus zum Abbruch der Simulation. Er ist damit als ungeeignet für derartige Simulationen zu betrachten.

## 7.9. Algorithmus zur Gittergenerierung (SSIIM 2)

In SSIIM 2 stehen verschiedene Algorithmen zur Gittergenerierung zur Verfügung (vgl. Kapitel 4.5.3). Standardmäßig wird der F64 2-Algorithmus verwendet. Alternativ dazu werden Studien mit dem F64 11-, dem F64 1- und dem F64 13-Algorithmus durchgeführt.

Der F64 11- und der F64 13-Algorithmus sind sich sehr ähnlich, sodass es bei deren Verwendung auch erwartungsgemäß zu ähnlichen Ergebnissen kommt. Bei beiden Algorithmen weist der Spülkegel der Simulationen einen RMSE von 1,18 cm bezüglich des Kegels aus dem Laborversuch auf. Damit ist der RMSE größer als der RMSE der Standardsimulation von 0,89 cm. Der F64 11-Algorithmus führt zu einer Reduktion des Volumens um 16,51 %. Der F64 13-Algorithmus führt zu einer Reduktion des Volumens um 15,71 %.

Beim F64 1-Algorithmus fällt während der Simulation auf, dass sich der Wasserspiegel trotz entsprechender Vorgaben in der timei-Datei nicht absenkt. Der Algorithmus führt ohne die Absenkung des Wasserspiegels zu einer geringen Vergrößerung des Kegelvolumens um 1,61 %. Der RMSE ergibt sich zu 1,01 cm. Er ist damit ebenfalls größer als der RMSE der Standardsimulation mit dem F64 2-Algorithmus. Aufgrund der Inkompatibilität des Algorithmus mit der Absenkung des Wasserspiegels ist dieser Algorithmus jedoch als ungeeignet einzustufen.

Somit erweist sich der standardmäßig verwendete F64 2-Algorithmus als am besten geeignet. Er weist sowohl den geringsten RMSE auf, als auch das Volumen, das dem Spülkegel des Laborversuchs am nächsten kommt.

## 7.10. Relaxationskoeffizienten (SSIIM 2)

In Kapitel 6.1.4 sind die Werte der Relaxationskoeffizienten in der Standardsimulation in SSIIM 2 beschrieben. Zur Untersuchung des Einflusses der Koeffizienten werden diese hier halbiert.

Die Halbierung der Relaxationskoeffizienten führt zu einer Reduktion des erodierten Gesamtvolumens um 2,00 %. Die Ergebnisse der Simulation ergeben einen RMSE von 1,02 cm bezüglich des Spülkegels im Laborversuch. Der RMSE ist damit etwas größer als der RMSE der Standardsimulation von 0,89 cm. Die Verwendung der ursprünglichen Koeffizienten führt also zu einem genaueren Ergebnis.

Insgesamt kann gesagt werden, dass sich eine Reduzierung der Relaxationskoeffizienten positiv auf die Stabilität auswirkt. Dagegen ist die Auswirkung auf das Ergebnis nur gering.

## 7.11. Zusammenfassung

Insgesamt deutet die starke Reduktion des Volumens bei Erhöhung der inneren Iterationen und der vertikalen Gitterauflösung darauf hin, dass die Standardsimulation für Variante 1 (SSIIM 1) keine ausreichende Genauigkeit aufweist. Wird die Genauigkeit durch die genannten Parameter erhöht, kommt es zu einer deutlichen Reduktion des erodierten Volumens. Aufgrund der Tatsache, dass der Abfluss bei Variante 1 über die gesamte Tiefe des Wasserspiegels erfolgt, sind im Vergleich zu Variante 2 geringere Fließgeschwindigkeiten und Schubspannungen an der Sohle zu erwarten. Somit wird erwartet, dass Variante 1 ein geringeres erodiertes Volumen des Spülkegels liefert. Bei der Simulation der Standardvarianten ist jedoch das Gegenteil der Fall. Erst durch eine Erhöhung der inneren Iterationen oder der Gitterauflösung in vertikaler Richtung kommt es wie erwartet zu einem geringeren Volumen des Kegels bei Variante 1.

Die Gitterauflösung in vertikaler Richtung wirkt sich unmittelbar auf die Höhe der Zelle an der Sohle aus. Diese ist ein entscheidender Parameter bei der Berechnung des Sedimenttransports mit SSIIM und soll anhand von Kalibrierungen über Laborversuche festgelegt werden. Für Simulationen mit ähnlichen Dimensionen wie im hier modellierten Laborversuch ist in SSIIM 1 eine Zellhöhe von ca. 1 cm und in

## 7. Parameterstudien

---

SSIIM 2 eine Zellhöhe von ca. 2 cm als geeignet anzusehen.

Bezüglich der Transportformel erweist sich die Kombination aus der Formel für den Schwebstofftransport mit der Formel für den Geschiebetransport (jeweils nach van Rijn) als geeignet. Alle anderen Formeln führen zu noch größeren Unterschätzungen des Spülkegels und ungenauerer Ergebnissen.

Die Sedimentdichte kann als kritischer Parameter bei der Simulation von Stauraumspülungen mit partiellem Abstau in SSIIM betrachtet werden. Ihr Einfluss auf die Simulationsergebnisse ist größer als der des Shields-Parameters.

Zur Anpassung der Neigung des Kegels eignet sich eine Variation des Reibungswinkels. Anhand des vorliegenden Laborversuchs lässt sich sagen, dass sich der Neigungswinkel des Spülkegels steiler ausbildet als er anhand des Reibungswinkels des Materials erwartet wird. Eine Erhöhung des Reibungswinkels um ca. 10 % - 15 % erweist sich für diesen Fall als zielführend.

Die Sinkgeschwindigkeit hat nur einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse.

In SSIIM 2 eignen sich die Vorgabe des horizontalen Wasserspiegels nach der timei-Datei sowie der Pressure-Bernoulli-Algorithmus zur Berechnung des Wasserspiegels. Dieser wird auch in SSIIM 1 verwendet. Bezüglich der Gittergenerierung führt die Verwendung des F64 2-Algorithmus zu den besten Simulationsergebnissen.

Die Veränderung der Relaxationskoeffizienten hat in SSIIM 2 nur geringe Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse.

# **8. Zusammenfassung, Fazit und Ausblick**

## **8.1. Zusammenfassung**

Ziel dieser Arbeit ist die Durchführung von dreidimensionalen numerischen Modellierungen eines physikalischen Modellversuchs zur Bestimmung des Spülkegels bei Stauraumspülungen mit partiellem Abstau. Dazu werden die beiden Softwares SSIIM 1 und SSIIM 2 verwendet. Diese werden anhand des Laborversuchs auf ihre Eignung zur Simulation von Stauraumspülungen geprüft. Dabei werden die Einschränkungen der jeweiligen Software herausgearbeitet. Weiterhin werden Sensitivitätsanalysen zur Ermittlung kritischer Parameter durchgeführt.

Der Stauraum des Laborversuchs besteht aus einem 8 m langen und 60 cm breiten Kanal, an dessen Ende sich ein Schütz mit einer Breite und Höhe von jeweils 5 cm befindet. Im Kanal ist eine Sedimentschicht aus granulatartigem, nicht-kohäsivem Material mit einer Stärke von 10 cm eingebaut, die das Schütz blockiert. Durch Öffnen des Schützes kommt es zur Spülung eines Teils der Sedimente und Ausbildung eines Spülkegels nahe des Schützes. Der Wasserstand sinkt während der Simulation von 25 cm auf 16 cm ab, da oberstrom kein Zufluss erfolgt.

Bei der Umsetzung des Laborversuchs in SSIIM 1 treten verschiedene Einschränkungen auf: Es wird festgestellt, dass der Einbau des Schützes nicht mit der Absenkung des Wasserspiegels kompatibel ist. Außerdem besteht keine Möglichkeit, eine Simulation ohne oberstromigen Zufluss durchzuführen. Um diese Problematik zu umgehen, werden drei Simulationsvarianten entwickelt: Variante 1 beinhaltet den absinkenden Wasserspiegel, jedoch bei einem unterstromigen Abfluss über die gesamte Wassertiefe am Schütz auf einer Breite von 5 cm. Der Zufluss wird dabei so gering wie möglich gehalten. Variante 2 modelliert einen konstanten mittleren Wasserstand. Der Abfluss erfolgt nur über eine Höhe von 5 cm. Der Zufluss wird gleich dem Abfluss gesetzt, um physikalisch korrekte Bedingungen einzuhalten. Variante 3 beinhaltet

## 8. Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

---

die Aufteilung der Simulation in fünf Einzelsimulationen bei jeweils konstanten Wasserständen und unterstromigen Abflüssen über eine Schützhöhe von jeweils ca. 5 cm. Bei der Entwicklung von Variante 3 tritt eine weitere Einschränkung auf: Die Festlegung des unterstromigen Abflussquerschnitts erfolgt über Gitterzellen anstelle von Koordinaten. Somit verändert sich die abflusswirksame Höhe mit absinkendem Wasserspiegel. Die exakte Einhaltung der Schützöffnung von 5 cm ist daher nicht möglich. Darüber hinaus besteht keine Möglichkeit, das blockierte Schütz zu modellieren. Das Berechnungsgitter befindet sich nur im Bereich zwischen der Oberkante der eingebauten Sedimentschicht und dem Wasserspiegel. Somit können keine Sedimente unmittelbar vor dem abflusswirksamen Querschnitt des Schützes eingebaut werden. Zur Lösung dieses Problems wird ein Startkegel im Bereich des Schützes entwickelt und eingebaut.

In SSIIM 2 dagegen besteht die Möglichkeit, den absinkenden Wasserspiegel in Kombination mit dem Einbau eines laborähnlichen Schützquerschnitts durchzuführen. Jedoch kommt es in z-Richtung mit absinkendem Wasserspiegel zum Wegfall von abflusswirksamen Gitterzellen im Bereich des Schützes. Somit können entweder am Anfang mehr Gitterzellen als nötig festgelegt werden, damit zum Simulationsende noch abflusswirksame Zellen existieren. Nach diesem Prinzip wird in der Standard-simulation vorgegangen. Alternativ dazu können die abflusswirksamen Zellen in z-Richtung während der Simulation manuell geändert werden. Eine automatische Anpassung ist nicht möglich. In SSIIM 2 wird daher eine alternative Simulation mit manueller Anpassung der Schützöffnung durchgeführt. SSIIM 2 verfügt ebenfalls nicht über die Möglichkeit, das blockierte Schütz analog zum Laborversuch zu modellieren. Daher wird derselbe Startkegel wie in SSIIM 1 verwendet. Außerdem wird in SSIIM 2 ebenfalls ein Zuflusswert gefordert. Dieser kann allerdings so klein festgelegt werden, dass er nahezu analog zum Null-Zufluss im Laborversuch ist. Hierzu kann ein Algorithmus eingebaut werden, der den Fehler in der Kontinuität ignoriert.

Die Simulationen in beiden Softwares führen zu Spülkegeln, die den Kegel aus dem Laborversuch nahe des Schützes unterschätzen und weiter entfernt vom Schütz überschätzen. Dabei wirkt sich die Unterschätzung stärker aus als die Überschätzung, sodass die Simulationen im Vergleich zum Laborversuch grundsätzlich zu kleine Kegelvolumina produzieren. Zur Quantifizierung der Abweichung vom Kegel des Laborversuchs wird der Root Mean Square Error betrachtet. Sowohl bezüglich des

RMSE als auch bezüglich des erodierten Volumens liefert SSIIM 2 die besseren Ergebnisse. Grund dafür ist die realitätsnähere Modellierung aufgrund der geringeren Zahl an Vereinfachungen bei der Umsetzung des Laborversuchs in der Software. In SSIIM 1 tritt außerdem in allen Simulationen eine Asymmetrie des Spülkegels auf, welche nach ersten Untersuchungen auf einen Fehler im Sand-Slide-Algorithmus zurückzuführen ist.

In den anschließend durchgeführten Parameterstudien wird festgestellt, dass für Variante 1 (SSIIM 1) keine Unabhängigkeit von den inneren Iterationen und der vertikalen Gitterauflösung besteht. Bei Erhöhung dieser Parameter kommt es zu starken Reduzierungen der erodierten Volumina. Bei numerischen Modellierungen von Stauraumspülungen sollte die Anzahl der inneren Iterationen daher jeweils so weit erhöht werden, bis sich im Ergebnis keine signifikanten Veränderungen mehr ergeben. Entscheidenden Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat auch die Höhe der sohnahen Zelle, welche in SSIIM durch die vertikale Gitterauflösung bestimmt wird. Bezuglich der verwendeten Transportformel erweist sich die Kombination aus der Formel für den Schwebstofftransport mit der Formel für den Geschiebetransport als geeignet. Darüber hinaus wird festgestellt, dass die Sedimentdichte einen größeren Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat als der Shields-Parameter. Der Shields-Parameter sollte dennoch nicht vernachlässigt werden. Das beste Simulationsergebnis bezüglich des RMSE ergibt sich in SSIIM 2 bei einem Shields-Parameter von 0,035. Damit ist die Verwendung eines niedrigeren Shields-Parameters im Vergleich zum Standardwert von 0,047 zu empfehlen. Die Neigung des Kegels ist in den Simulationsergebnissen zunächst zu gering. Sie kann durch eine Erhöhung des Reibungswinkels angepasst werden. Die genannten Parameter können als kritisch bezüglich der Modellierung einer Stauraumspülung in SSIIM angesehen werden. Bei deren Ermittlung und Festlegung ist daher große Sorgfalt anzuwenden.

## 8.2. Fazit und Ausblick

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass sich die Software SSIIM 1 nicht zur Modellierung von Stauraumspülungen mit partiellem Abstau oder mit vollständiger Absenkung eignet. Hauptgrund hierfür ist die Tatsache, dass mit Festlegung des

## 8. Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

---

unterstromigen Abflussquerschnitts auf den Bereich des zu öffnenden Grundablasses die Möglichkeit der Modellierung eines über die Zeit absinkenden Wasserspiegels entfällt. Weitere Gründe sind die auftretende Asymmetrie in den Spülkegeln sowie die notwendige Festlegung eines oberstromigen Zuflusses. Dieser kann aufgrund der geforderten Einhaltung der Kontinuität nicht beliebig klein gewählt werden.

Zur Verbesserung des Programms und Verwendung für Spülungen mit absinkendem Wasserspiegel ist daher die Behebung des o.g. Fehlers unerlässlich. Weiterhin wird die Überarbeitung des Sand-Slide-Algorithmus zur Behebung der Asymmetrie empfohlen. Darüber hinaus ist die Entwicklung eines Algorithmus zur Unterdrückung des Kontinuitätsfehlers analog zu SSIIM 2 anzustreben. Werden diese Verbesserungen nicht durchgeführt, kann lediglich die Variante mit Aufteilung der Gesamtsimulation in mehrere Einzelsimulationen weiter verfolgt werden. Anzustreben ist dabei eine weitere Verfeinerung der Zeitschritte und eine Automatisierung des Vorgehens durch Schreiben eines Skripts.

Zur Eignung von SSIIM 1 bezüglich Stauraumspülungen ohne Absenken des Wasserspiegels können weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Hier entfällt die Problematik des absinkenden Wasserspiegels. Das Schütz kann entsprechend der realen Geometrie modelliert werden. Ein Beispiel ist die Durchführung desselben Laborversuchs bei konstantem Wasserspiegel mit oberstromigem Zufluss.

Das Programm SSIIM 2 kann als bedingt geeignet betrachtet werden. In dieser Arbeit wird festgestellt, dass mit SSIIM 2 bei Verwendung der entsprechenden Parameter hinreichend genaue Modellierungen des Spülkegels durchgeführt werden können. Jedoch verfügt das Programm nicht über die Möglichkeit, die Geometrie des Grundablasses exakt zu modellieren. Zur Festlegung des abflusswirksamen Querschnitts werden daher Anpassungen am Programm empfohlen. Dazu gehört die Verhinderung des Wegfalls der Zellen in vertikaler Richtung bei absinkendem Wasserspiegel oder die Programmierung des Wegfalls der Zellen an der Wasseroberfläche anstelle der Sohle. Weiterhin sollte eine Möglichkeit generiert werden, die Höhe und Breite des abflusswirksamen Querschnitts über die Zeit hinweg konstant zu definieren. Dies kann z.B. über einen Algorithmus zur lokalen Fixierung einzelner Gitterzellen geschehen.

Die vorliegende Arbeit gibt außerdem Anlass zu weiteren, vertiefenden Untersuchungen mit der Software SSIIM 2. Dazu gehört die Betrachtung der zeitlichen Entwicklung des Spülkegels. In dieser Arbeit wird nur die Geometrie des Kegels

am Ende der Spülung betrachtet. Die zeitliche Betrachtung fordert Messungen zur Sohlhöhe während der Spülung. Anhand der Zwischenergebnisse können die in dieser Arbeit verwendeten Parameter kalibriert werden. Eine weitere mögliche Untersuchung besteht in der Veränderung der Geometrie des Startkegels. Darüber hinaus verfügt SSIIM 2 über zahlreiche zusätzliche, hier nicht variierte oder verwendete Parameter und Algorithmen, deren Einfluss auf die Entwicklung des Spülkegels ebenfalls untersucht werden kann.



# Literatur

- Annandale, George W. (2006). „Reservoir Sedimentation“. In: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. American Cancer Society. ISBN: 978-0-470-84894-4. DOI: 10.1002/0470848944.hsa086. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0470848944.hsa086> (besucht am 28.08.2019).
- Annandale, George W., Gregory L. Morris und Pravin Karki (2016). *Extending the Life of Reservoirs : Sustainable Sediment Management for Dams and Run-of-River Hydropower*. Washington, DC: World Bank Group. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/25085> (besucht am 28.08.2019).
- Bauformel Verlag GmbH (2019). „Rauheitsbeiwerte nach Strickler“. In: URL: <https://www.bauformeln.de/wasserbau/gerinnehydraulik/räuheitsbeiwerte-nach-strickler/> (besucht am 09.10.2019).
- Brooks, N. H. (1963). „Discussion of "Boundary Shear Stresses in Curved Trapezoidal Channels" by A.T. Ippen and P.A. Drinker“. In: *Journal of the Hydraulics Division* 89, S. 327–345.
- Chanson, Hubert (2004). *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction*. 2. Aufl. Oxford: Elsevier. ISBN: 978-0-7506-5978-9. DOI: 10.1016/B978-0-7506-5978-9.X5000-4. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780750659789X50004> (besucht am 25.10.2019).
- DIN (1987). *DIN 4048-1 Wasserbau Begriffe: Stauanlagen - Teil 1*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN (2004). *DIN 19700-11 Stauanlagen - Teil 11: Talsperren*. Berlin: Beuth Verlag.
- DWA, Hrsg. (2006). *Entlandung von Stauräumen*. DWA-Themen. Hennef: DWA. ISBN: 3-937758-33-X.

- Dargahi, Bijan (2012). „Reservoir Sedimentation“. In: *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*. Hrsg. von Lars Bengtsson, Reginald W. Herschy und Rhodes W. Fairbridge. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 628–649. ISBN: 978-1-4020-4410-6. DOI: 10.1007/978-1-4020-4410-6\_215. URL: [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4410-6\\_215](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4410-6_215) (besucht am 01.09.2019).
- Detering, Michael und Holger Schüttrumpf (2014). „Verlandung und Lebensdauer von Talsperren“. In: *Wasserwirtschaft* 104, S. 30–33. DOI: 10.1365/s35147-014-0878-8.
- Ermilov, Alexander Anatol (2018). *Numerical simulation of sediment flushing in reservoirs*. Trondheim: NTNU, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Ferziger, Joel H. und Milovan Peric (2008). *Numerische Strömungsmechanik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-540-67586-0 978-3-540-68228-8. DOI: 10.1007/978-3-540-68228-8. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-68228-8> (besucht am 01.10.2019).
- Klopries, Elena-Maria et al. (2015). „SonarINN - Entwicklung einer Methode zur Ermittlung wirklichkeitsnaher Schichtenprofile zur Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit von Talsperren“. In: *Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer*, S. 489–498. URL: <http://henry.baw.de/handle/20.500.11970/103407> (besucht am 27.08.2019).
- Kondolf, G. Mathias et al. (2014). „Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents“. In: *Earth's Future* 2.5, S. 256–280. ISSN: 2328-4277. DOI: 10.1002/2013EF000184. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2013EF000184> (besucht am 28.08.2019).
- Lattermann, Eberhard (2017). *Wasserbau-Praxis*. 4. Aufl. Berlin: Bauwerk BBB Beuth.
- Launder, Brian Edward und Dudley Brian Spalding (1972). *Lectures in mathematical models of turbulence*. London: Academic Press.

---

Lecheler, Stefan (2018). *Numerische Strömungsberechnung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-19191-7 978-3-658-19192-4. DOI: 10.1007/978-3-658-19192-4. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-19192-4> (besucht am 01.10.2019).

Mahmood, K. (1987). *Reservoir sedimentation : impact, extent, and mitigation*. The World Bank. URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/888541468762328736/Reservoir-sedimentation-impact-extent-and-mitigation> (besucht am 27.08.2019).

Maniak, Ulrich (2016). *Hydrologie und Wasserwirtschaft: eine Einführung für Ingenieure*. 7., neu bearbeitete Auflage. Lehrbuch. OCLC: 945131861. Berlin: Springer Vieweg. 748 S. ISBN: 978-3-662-49086-0 978-3-662-49087-7.

Meyer-Peter und Müller (1948). *Formulas for bed load transport*. Stockholm: Proceedings of 2nd Congress IAHR.

Morris, Gregory L. und Jiahua Fan (1998). *Reservoir Sedimentation Handbook*. 4. Aufl. New York: McGraw-Hill Book Co.

Mouris, Kilian (2017). *3-D morphodynamische Modellierung der Schwarzenbachtal-sperre - Modellerstellung, Sensitivitätsanalyse und Plausibilisierung*. Stuttgart: Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft.

Olsen, Nils Reidar Boe (1999). *Class Notes: Computational Fluid Dynamics in Hydraulic and Sedimentation Engineering*. 2. Aufl. Trondheim: NTNU, Department of Civil und Environmental Engineering.

Olsen, Nils Reidar Boe (2001). *CFD modelling for hydraulic structures*. 1. Aufl. Trondheim: NTNU, Department of Civil und Environmental Engineering.

Olsen, Nils Reidar Boe (2012). *Numerical Modelling and Hydraulics*. 3. Aufl. Trondheim: NTNU, Department of Civil und Environmental Engineering.

Olsen, Nils Reidar Boe (2015). „Four free surface algorithms for the 3D Navier–Stokes equations“. In: *Journal of Hydroinformatics* 17.6, S. 845–856. ISSN: 1464-7141. DOI: 10.2166/hydro.2015.012. URL: [/jh/article/17/6/845/3350/Four-free-surface-algorithms-for-the-3D-Navier](http://jh/article/17/6/845/3350/Four-free-surface-algorithms-for-the-3D-Navier) (besucht am 27.08.2019).

- Olsen, Nils Reidar Boe (2018). *A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multiblock option: SSIIM User's Manual*. Trondheim: NTNU, Department of Civil und Environmental Engineering.
- Rijn, L.C. van (1987). „Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport“. Diss. Delft: Delft University of Technology.
- Rodi, Wolfgang (1993). *Turbulence models and their application in hydraulics. A state-of-the-art review*. 3. Aufl. Rotterdam: Balkema (IAHR-AIRH monograph series).
- Saam, Leon (2018). *Dreidimensionale numerische Modellierung einer Stauraumspülung*. Stuttgart: Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft.
- Shields, A. (1936). *Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung*. Berlin.
- Statistics How To (2019). „RMSE: Root Mean Square Error“. In: URL: <https://www.statisticshowto.datasciencecentral.com/rmse/> (besucht am 10.10.2019).
- Wen Shen, Hsieh (1999). „Flushing sediment through reservoirs“. In: *Journal of Hydraulic Research* 37.6, S. 743–757. ISSN: 0022-1686. DOI: 10.1080/00221689909498509. URL: <https://doi.org/10.1080/00221689909498509>.
- White, Rodney (2001). *Evacuation of sediments from reservoirs*. Thomas Telford Publishing. ISBN: 978-0-7277-3774-8. DOI: 10.1680/eosfr.29538. URL: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/book/10.1680/eosfr.29538> (besucht am 28.08.2019).
- Wieprecht, Silke, Daniel Stolz und Tobias Gebler (2014). *Vorlesungsskript Talsperren*. Vorlesung: Bauwerke zur Wasser- und Energienutzung. Stuttgart: Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft.
- Wu, Weiming, Sam Wang und Yafei Jia (2000). „Non-Uniform Sediment Transport in Alluvial Rivers“. In: *Journal of Hydraulic Research* 38, S. 427–434. DOI: 10.1080/00221680009498296.

# **A. Anhang**

## **A.1. Simulationsdateien**

Aufgrund der großen Datenmenge können die Dateien aller durchgeföhrten Simulationen nicht auf einer CD oder einem Datenträger zur Verfügung gestellt werden. Dazu gehören die Eingabedateien, die Ausgabedateien inkl. Dateien zur Visualisierung in Paraview sowie die Auswertung in Form von Diagrammen und Excel-Tabellen.

Sie befinden sich daher, geordnet entsprechend den Kapiteln dieser Arbeit, auf dem Server unter dem Pfad:

Y:\Abt1\Bachelor\_Master\_Theses\Kunz\Simulationsdateien