



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Erstellung einer Übungseinheit zur Anwendung von HEC-RAS 2D

Creation of a training unit for the application
of HEC-RAS 2D

Masterarbeit von Johanna Wartusch

Studiengang: M. Sc. Umweltingenieurwissenschaften

SoSe 2022 und WiSe 2022/23 | Tag der Einreichung: 13.01.2023

Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik
Fachbereich 13: Bau- und
Umweltingenieurwissenschaften
Technische Universität Darmstadt

Betreuung durch
Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann

In Kooperation mit
SYDRO Consult GmbH

Veröffentlicht unter CC-BY 4.0 International
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



Master-Arbeit für Frau Johanna WARTUSCH (Matr.-Nr. 2391856)

Erstellung einer Übungseinheit zur Anwendung von HEC-RAS 2D

Creation of a training unit for the application of HEC-RAS 2D

Veranlassung und Thema

Informationen zur abflussabhängigen Wasserstands-, Strömungs- und Überflutungsentwicklung sind für viele wasserwirtschaftliche Fragestellungen die notwendige Bedingung zur Konzeption, Planung und Bemessung wasserbaulicher Anlagen und Maßnahmen (Abb. 1). Hier kommen aktuell hydrodynamisch-numerische Computermodelle zum Einsatz. Das Softwaresystem HEC-RAS bietet in seiner aktuellen Version Möglichkeiten zur ein- und zweidimensionalen Simulation sowohl für stationäre als auch für instationäre Abflussereignisse.

HEC-RAS umfasst dabei Tools zur Voranalyse und Modellierung sowie zur Ergebnisvisualisierung. Zudem verfügt HEC-RAS über die Möglichkeit, zahlreiche hydraulische Parameter zu berechnen – darunter auch hydromorphologische Parameter zum Feststofftransport.

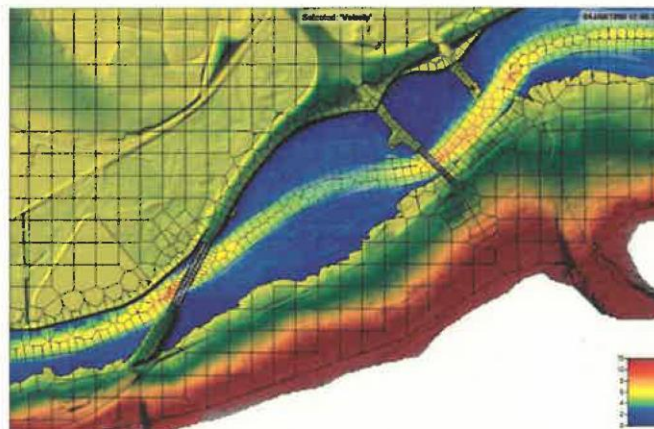


Abbildung 1: HEC-RAS 2D ist eine leistungsfähige Software zur Durchführung wasserbaulicher Untersuchungen mittels hydrodynamisch-numerischer Modellierung

Der Umgang mit der Software ist für die studentische Ausbildung von hohem Wert, da im späteren Berufsleben die ein- und zweidimensionale hydrodynamische Strömungsmodellierung als Ingenieurmethode bei vielen Projekten zum

Einsatz kommt. Die notwendigen hydraulischen, mathematischen und numerischen Grundlagen dazu werden an der TU Darmstadt im Modul „Numerische Modellierungen im Wasserbau“ vermittelt.

Aufgabenstellung

Im Rahmen der Masterarbeit soll Frau Wartusch für einen Satz realer Daten ein 2D-HN-Modell mit HEC-RAS erstellen und zur Berechnung von

- Wasserständen und Überflutungsflächen,
- Strömungsverteilungen sowie
- Feststofftransport

exemplarisch anwenden. Dabei sollen die einzelnen Arbeitsschritte bei der Modellerstellung, der Modellanwendung und der Ergebnisvisualisierung als studentische Übungseinheit in Form eines Screencasts (ggf. mehrteilig) und einer schriftlichen Dokumentation dokumentiert werden. Das Ausformulieren und Darlegen der zugehörigen Grundlagen (bspw. Navier-Stokes-Gleichungen) ist nicht erforderlich – vielmehr soll die tatsächliche Arbeit mit der Software (bspw. Gitternetzgenerierung oder Implementierung/Abbildung von Brücken- oder Wehrbauwerken) als auch die Bedeutung der in der Software einstellbaren ergebnisrelevanten Optionen (bspw. Diffusion-Wave-Gleichung) dargelegt werden.

Modalitäten

Grundsätzlich gelten die Bestimmungen zu Abschlussarbeiten in der Allgemeinen Prüfungsordnung TU Darmstadt und in der Studienordnung des Fachbereiches 13. Diese Bestimmungen beziehen sich u.a. auf die Aspekte

- Betreuung und Bewertung von Abschlussarbeiten und
- besondere Regelungen bei externen Arbeiten.

Der/die Kandidat/in hat dafür selbstständig Sorge zu tragen, dass diese Bestimmungen eingehalten werden.

Darüber hinaus gelten folgende Randbedingungen:

Referent und Ansprechpartner	Prof. Boris Lehmann FG Wasserbau und Hydraulik Lehmann@wb.tu-darmstadt.de	Empfohlene Kenntnisse	- Hydromechanik - Gerinnehydraulik - Numerische Modellierung - HEC-RAS
Bearbeitungszeitraum	Auslösung nach Vereinbarung, Leistungszeitraum 6 Monate	Arbeitsbedingungen	Heimarbeit

Darmstadt, den 01.07.2022



Prof. Boris Lehmann

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt dem Team von SYDRO Consult, das mir die Möglichkeit gab, mein Wissen im Bereich der hydraulischen Modellierung zu erweitern und meine Neugierde an den Tiefen des Programms HEC-RAS weckte. Danke für die schöne Zeit.

Insbesondere richtet sich mein Dank an Alec von SYDRO Consult, der dafür sorgte, dass diese Arbeit durch ein Beispielprojekt mit einer umfangreichen Datengrundlage begleitet werden konnte. Danke auch an das Regierungspräsidium Tübingen für das Bereitstellen der Daten.

Weiterhin will ich mich bei Prof. Dr. Boris Lehmann nicht nur für die Betreuung dieser Arbeit bedanken, sondern auch für die inspirierenden Vorlesungen, ohne die ich vielleicht gar nicht erst den Weg zur hydraulischen Modellierung gefunden hätte.

Besonders möchte ich meinen Eltern danken, ohne die mein gesamtes Studium nicht möglich gewesen wäre. Ebenso gilt mein Dank meinen Freunden, für die umfangreiche Unterstützung und Ablenkung, wenn es mal nötig war. Insbesondere richtet sich mein Dank an Philipp, dafür dass du mich immer unterstützt und wieder aufbaust, wenn alles mal zu viel ist.

Zusammenfassung/Abstract

Diese Arbeit enthält eine Anleitung über die verschiedenen Arbeitsschritte der Erstellung eines 2D-HN-Modells, seiner Anwendung sowie der Ergebnisdarstellung innerhalb des Programms HEC-RAS. Diese Anleitung wird durch ein Beispielprojekt exemplarisch vorgeführt sowie durch eine Screencastreihe begleitet. Es wird zunächst auf die Entwicklungsgeschichte und die innere Struktur des Programms sowie auf vorbereitende Schritte für ein Projekt eingegangen. Es wird die Implementierung eines Geländemodells, von Luftbildern, Landnutzungsinformationen, Rauheitsbeiwerten sowie von Infiltration thematisiert. Anschließend werden die Schritte zur Modifikation eines Geländemodells zur Darstellung eines realistischen Gewässerlaufs sowie weitere Geländeanpassungen erläutert. Es wird auf die Erstellung eines Berechnungsnetzes mit Verfeinerungszonen und Bruchkanten sowie auf das Modellieren von Wasserbauwerken wie Wehre, Durchlässe und Brücken eingegangen. Weiterhin wird das Erstellen von Rand- und Anfangsbedingungen sowie das Durchführen einer hydraulischen Simulation mit den dafür notwendigen Parametern erklärt. Ebenso wird das Durchführen einer hydraulischen Simulation mit Feststofftransport sowie die zugehörigen Parameter erläutert. Zuletzt thematisiert diese Arbeit die Methoden der Ergebnisvisualisierung in HEC-RAS und die Arbeitsschritte der Kalibrierung, Validierung sowie der Sensitivitätsanalyse. Durch die kostenfreie Verfügbarkeit, eine nutzerfreundliche Oberfläche sowie einen großen Funktionsumfang eignet sich HEC-RAS besonders für die Anwendung in Lehre und Studium.

This work provides a tutorial about the different steps of creating a 2D-HN-model, its application as well as the visualization of results within the program HEC-RAS. These instructions are exemplified by a sample project as well as accompanied by a screencast series. First, the programs history and its inner structure as well as preparative steps for a project are demonstrated. The implementation of a terrain model, aerial images, land use information, roughness coefficients and infiltration are discussed. The steps to modify a terrain model to represent a realistic river channel and other terrain manipulations are explained. The creation of a computational mesh with refinement zones and breaklines as well as the modeling of hydraulic structures such as weirs, culverts and bridges are expounded. Furthermore, the creation of boundary and initial conditions as well as the hydraulic simulation itself with its necessary parameters are discussed. Likewise, a hydraulic simulation with sediment transport as well as the corresponding parameters are explained. Finally, the methods for result visualization in HEC-RAS as well as necessary calibration steps, validation and sensitivity analysis are explicated. Due to the free availability, a user-friendly interface and a large range of functions, HEC-RAS is particularly suitable for applications in teaching and studying.

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung	I
Danksagung	III
Zusammenfassung/Abstract	IV
1 Einleitung	1
2 Grundlagen zu HEC-RAS	2
2.1 HEC-RAS und seine Anwendungsbereiche	2
2.2 Entwicklungsgeschichte von HEC-RAS	2
2.3 Zugrundeliegendes Dateimanagement von HEC-RAS	3
3 Erstellung eines HEC-RAS Projektes	5
3.1 Aufbereiten von Daten	5
3.2 Verzeichnisstruktur	5
3.3 Festlegen von Format und Einheit	6
3.4 Erstellen und Öffnen von Projekten	7
4 Geländeerstellung im <i>RAS-Mapper</i>	8
4.1 Projektion festlegen	8
4.2 Geländemodell importieren	9
4.3 Zeichnen im <i>RAS-Mapper</i>	10
5 Rauheitsbeiwerte und Versickerung	12
5.1 Luftbild und Ansicht	12
5.2 Landnutzungskarte	13
5.3 Rauheitsbeiwerte	15
5.4 Versickerung	16
5.4.1 Bodenklassifizierung	16
5.4.2 Berechnungsmethoden der Infiltration	17
5.4.3 Infiltrationslayer	19
6 Gewässerlaufmodellierung im Geländemodell	22
6.1 Geometriedaten bearbeiten	22
6.1.1 Flussverlauf	23
6.1.2 Einmündungen	24
6.1.3 Uferlinien	25
6.1.4 Querprofile	26
6.2 Anpassung des Geländemodells	33
6.2.1 Gewässerlaufeinbindung	33
6.2.2 Räumlich verteilte Infrastrukturelemente einbinden	36
7 Berechnungsnetz	40
7.1 Verknüpfung von Layern und Geometrie	40
7.2 Berechnungsnetz generieren	41
7.2.1 Untersuchungsgebiet	41
7.2.2 Strömungsbeeinflussende Geländebruchkanten	42

	7.2.3 Verfeinerungszonen	44
	7.2.4 Manuelles Nacharbeiten	44
8	Wasserbauwerke	48
	8.1 Wehre	48
	8.1.1 Durchlässe	53
	8.1.2 Weitere Wehröffnungen	56
	8.2 Brücken	57
9	Rand- und Anfangsbedingungen	65
	9.1 Randbedingungslinien	65
	9.2 Randbedingungen in der <i>Unsteady Flow</i> Datei	67
	9.2.1 Innere Randbedingungen	68
	9.2.2 Äußere Randbedingungen	70
	9.2.3 Randbedingungen für bewegliche Wehröffnungen	71
	9.2.4 Niederschlag und Verdunstung als Randbedingung	74
	9.3 Anfangsbedingungen in der <i>Unsteady Flow</i> Datei	76
	9.3.1 Anfangswasserlevel	77
	9.3.2 <i>Restart File</i>	78
	9.3.3 Ergebnisse einer vorherigen Simulation	78
10	2D-Strömungssimulation	79
	10.1 Wahl des Berechnungszeitschrittes anhand der Courant-Bedingung	81
	10.2 Berechnungsparameter	83
	10.2.1 Vorlaufzeit als Anfangsbedingung	85
	10.2.2 Gleichungssätze	86
	10.3 Ausgabeoptionen	90
	10.3.1 Ausgabeprotokoll	90
	10.3.2 <i>Restart File</i> erstellen	91
11	Simulation von Feststofftransport im 2D-Modell	92
	11.1 Zugrundeliegendes Dateimanagement einer Sedimentsimulation	92
	11.2 Sedimentmaterial Layer im <i>RAS-Mapper</i>	92
	11.3 Sediment Datei	94
	11.3.1 Kornverteilungskurven	94
	11.3.2 Gleichungen	96
	11.3.3 Randbedingungen	105
	11.4 <i>Plan</i> Datei	107
	11.4.1 Berechnungsparameter der hydraulischen Simulation	107
	11.4.2 Berechnungsparameter der Sedimentsimulation	108
	11.4.3 Ausgabeoptionen der Sedimentsimulation	110
	11.5 Allgemeine Modellierungshinweise für 2D-Sedimentmodelle	112
12	Ergebnisvisualisierung	114
	12.1 Darstellungen im <i>RAS-Mapper</i>	114
	12.1.1 Verteilungskarten berechneter Parameter	114
	12.1.2 Ausgabemöglichkeiten an Querschnitten und Punkten	121

12.2	3D-Ansicht	123
	12.2.1 Werkzeugleiste	125
	12.2.2 Flugroute zum Überfliegen der 3D-Karte	125
12.3	Ganglinien und Kennlinien an Bauwerken	126
13	Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und Validierung	128
	13.1 Kalibrierung	128
	13.2 Sensitivitätsanalyse	130
	13.3 Validierung	130
14	Ausblick	131
	Literaturverzeichnis	i

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Dateimanagement einer 2D-Simulation in HEC-RAS	4
Abbildung 3-1: Verzeichnisstruktur eines HEC-RAS Projektes	5
Abbildung 3-2: Einstellung des regionalen Formates für Datum und Uhrzeit in den Systemeinstellungen	6
Abbildung 3-3: Hauptfenster von HEC-RAS	7
Abbildung 4-1: <i>RAS-Mapper</i> Schaltfläche im Hauptfenster von HEC-RAS	8
Abbildung 4-2: Koordinatensystem im <i>RAS-Mapper</i> festlegen	8
Abbildung 4-3: Übersicht über den <i>RAS-Mapper</i> sowie Erstellen eines neuen Geländelayers	9
Abbildung 4-4: Bearbeitung von Features im <i>RAS-Mapper</i>	10
Abbildung 5-1: Erstellen einer Ansicht im <i>RAS-Mapper</i>	12
Abbildung 5-2: Importieren von Landnutzungsdaten zur Erstellung eines Landbedeckungslayers	13
Abbildung 5-3: Zuordnung von Polygonen zu Klassen der Landbedeckung	14
Abbildung 5-4: Erstellen eines Infiltrationslayers aus Landbedeckungs- und Bodenlayer	20
Abbildung 5-5: Zuordnung von Infiltrationsparametern zu verschiedenen Flächenkombinationen	20
Abbildung 6-1: Berechnungsnetz zur Interpolation eines Gewässerlaufs	23
Abbildung 6-2: Optionen zur Erstellung einer Einmündung im <i>RAS-Mapper</i> : Links: Automatisch, rechts: Manuell	24
Abbildung 6-3: Erstellte Gewässermittellinien im Beispielprojekt	25
Abbildung 6-4: Methoden des optischen Zeichnens der Uferlinien anhand eines Luftbildes (links) oder des Geländes (rechts)	26
Abbildung 6-5: <i>Geometric Data</i> Fenster Schaltfläche im Hauptfenster von HEC-RAS	27
Abbildung 6-6: <i>Geometric Data</i> Fenster: Manuelles Bearbeiten von <i>Cross Sections</i> (1)	28
Abbildung 6-7: <i>Geometric Data</i> Fenster: Manuelles Bearbeiten von <i>Cross Sections</i> (2)	29
Abbildung 6-8: Import von Vermessungsdaten aus einer *.csv-Datei	30
Abbildung 6-9: Anpassen der Querprofilhöhen anhand eines Punktlayers im <i>RAS-Mapper</i>	32
Abbildung 6-10: Kontrolle des Berechnungsnetzes zum Interpolieren eines Gewässerlaufs	34
Abbildung 6-11: Erstellen eines neuen Geländelayers aus mehreren *.tif-Dateien	35
Abbildung 6-12: DGM mit eingebettetem Gewässerlauf: Links: Guter Übergang, rechts: Überarbeitungsbedarf	35
Abbildung 6-13: Einstellungen der Geländemodifikation mittels Polygone	37
Abbildung 6-14: Einstellungen der Geländemodifikation mittels Linien	39
Abbildung 7-1: Verknüpfung von Geometrie mit anderen Layern	40
Abbildung 7-2: Eigenschaftfenster des Berechnungsnetzes	42
Abbildung 7-3: Berechnungsnetz an einem Deich ohne Bruchkante (links) und mit Bruchkante (rechts)	43
Abbildung 7-4: Eigenschaftfenster der Geländebruchkanten	44
Abbildung 7-5: Error wegen zu hoher Seitenzahl der Zellen im Eigenschaftfenster des Berechnungsnetzes	45
Abbildung 7-6: Links: Zelle mit Error aufgrund zu vieler Kanten, rechts: Zelle mit behobenem Error	45
Abbildung 7-7: Links: Verfeinerungszone mit fehlerhafter Bruchkante, rechts: Korrigierte Bruchkante	46
Abbildung 7-8: Ausschnitt des im Beispielprojekt erzeugten Berechnungsnetzes	47
Abbildung 8-1: Bearbeitungsfenster zur Erstellung einer Wehrmittellinie im <i>RAS-Mapper</i> . Links: Angaben zum Wehr, rechts: Angaben zur Bruchkante	49
Abbildung 8-2: Bearbeitungsfenster zur Erstellung eines Wehres im <i>Geometric Data</i> Fenster	50
Abbildung 8-3: Fenster zur Bearbeitung der Geometrie eines Wehres	51
Abbildung 8-4: Links: Bearbeitungsfenster zur Erstellung eines Durchlasses, rechts: Bearbeitungsfenster zur Erstellung eines Wehres	53
Abbildung 8-5: Durchlass mit unterschiedlicher <i>Upstream Station</i> und <i>Downstream Station</i>	55
Abbildung 8-6: Links: Bearbeitungsfenster zur Erstellung eines Wehres, rechts: Bearbeitungsfenster zur Erstellung einer Wehröffnung	57

Abbildung 8-7: Bearbeitungsfenster zur Erstellung einer Brücke im <i>Geometric Data</i> Fenster	58
Abbildung 8-8: Definition des Übergangs einer Brücke	59
Abbildung 8-9: Erstellen von Brückenpfeilern (links) sowie seitlichen Widerlagern (rechts)	60
Abbildung 8-10: Festlegen von Rauheitsbeiwerten für eine Brücke	61
Abbildung 8-11: Formelauswahl zur Brückenberechnung (links) sowie Parameter zur Wasserstand-Durchfluss-Kurvenschar (rechts)	62
Abbildung 8-12: <i>Hydraulic Table</i> Schaltfläche im Hauptfenster von HEC-RAS	62
Abbildung 9-1: Beispielhafte Randbedingungslinien: <i>Internal</i> (links), <i>External</i> (rechts)	66
Abbildung 9-2: Randbedingungslinien im Beispielprojekt	67
Abbildung 9-3: <i>Unsteady Flow Data</i> Schaltfläche im Hauptfenster von HEC-RAS	67
Abbildung 9-4: <i>Unsteady Flow Data</i> Fenster	68
Abbildung 9-5: Bearbeitungsfenster der Randbedingung <i>Flow Hydrograph</i>	69
Abbildung 9-6: Bearbeitungsfenster der Randbedingungen <i>Stage Hydrograph</i> (links) und <i>Rating Curve</i> (rechts)	70
Abbildung 9-7: Bearbeitungsfenster der Randbedingungen <i>Normal Depth</i>	71
Abbildung 9-8: Randbedingungen für Wehröffnungen: <i>T.S. Gate Openings</i> (links), <i>Elev Controlled Gates</i> (rechts)	72
Abbildung 9-9: Randbedingung <i>Rules</i> für Wehröffnungen	73
Abbildung 9-10: Hinzufügen eines 2D-Untersuchungsgebietes als Randbedingung	74
Abbildung 9-11: Randbedingung <i>Precipitation</i> für <i>2D Flow Area</i>	75
Abbildung 9-12: Eingabe meteorologischer Daten	75
Abbildung 9-13: Eingabe von Anfangsbedingungen im <i>Unsteady Flow Data</i> Fenster	77
Abbildung 10-1: <i>Unsteady Flow Analysis</i> Schaltfläche im Hauptfenster von HEC-RAS	79
Abbildung 10-2: <i>Unsteady Flow Analysis</i> Fenster	79
Abbildung 10-3: Optionen zur automatischen Anpassung des Zeitschrittes	82
Abbildung 10-4: Berechnungsoptionen für eine 2D-Strömungssimulation	85
Abbildung 10-5: Durchflussganglinie mit Vor- und Anlaufzeit	85
Abbildung 10-6: Aktivierung eines Ausgabeprotokolls	91
Abbildung 10-7: Generieren eines <i>Restart Files</i>	91
Abbildung 11-1: Dateimanagement einer 2D-Sedimentsimulation in HEC-RAS	92
Abbildung 11-2: Zuordnung von Polygonen zur Klassifikationen eines Sediments	93
Abbildung 11-3: Verknüpfung von Geometrie mit <i>Sediment Bed Material Layer</i>	93
Abbildung 11-4: <i>Sediment Data</i> Schaltfläche im Hauptfenster von HEC-RAS	94
Abbildung 11-5: Sediment Bearbeitungsfenster: Erstellen von Kornverteilungskurven und Sedimentschichten	95
Abbildung 11-6: Erstellen einer Kornverteilungskurve (links) und einer Sedimentschichtung (rechts)	95
Abbildung 11-7: Sediment Bearbeitungsfenster: Verknüpfen von Körnungslinie mit Sedimentmaterial Layer	96
Abbildung 11-8: Darstellung des <i>Hiding and Exposure</i> Effektes	97
Abbildung 11-9: Beispiele für den funktionalen Zusammenhang des kritischen Shields-Wertes	98
Abbildung 11-10: Sediment Bearbeitungsfenster: Erstellen von Transportfunktion, Sortierungsmethode und Methode zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit	99
Abbildung 11-11: Einstellungsoptionen für die Sortierungsmethode sowie den Formfaktor	99
Abbildung 11-12: Einstellungen für kohäsive Sedimente	101
Abbildung 11-13: Korrekturfaktoren in der 2D-Feststofftransportmodellierung	102
Abbildung 11-14: 2D-Sediment Optionen	105
Abbildung 11-15: Randbedingungen im <i>Sediment Data</i> Fenster	106
Abbildung 11-16: Bearbeitungsfenster der Randbedingungen <i>Rating Curve</i> (links) und <i>Sediment Load Series</i> (rechts)	106
Abbildung 11-17: Berechnungsparameter der Sedimentsimulation	109
Abbildung 11-18: Ausgabeoptionen der Sedimentsimulation	111
Abbildung 11-19: Berechnungsnetz des Untersuchungsgebietes der Sedimentsimulation im Beispielprojekt	112

Abbildung 12-1: Verteilungskarten der Simulationsergebnisse im <i>RAS-Mapper</i>	114
Abbildung 12-2: Visualisierungsoptionen von Layern: Links: Allgemeine Optionen, rechts: Farbgebung der Legende	115
Abbildung 12-3: Dynamische Darstellung der Verteilungskarten im <i>RAS-Mapper</i>	116
Abbildung 12-4: Verteilungskarte mit Geschwindigkeitspfeilen und Bahnlinien im <i>RAS-Mapper</i>	117
Abbildung 12-5: Optionen zum Hinzufügen neuer Ergebniskarten im <i>RAS-Mapper</i>	118
Abbildung 12-6: Eingabefenster zur Berechnung neuer Ergebniskarten im <i>RAS-Mapper</i>	120
Abbildung 12-7: Einblenden mehrerer Werte verschiedener Simulationsergebnisse in <i>RAS-Mapper</i>	121
Abbildung 12-8: Tabellenwerte an beliebigen Kartenpunkten im <i>RAS-Mapper</i> abrufen	122
Abbildung 12-9: Darstellungsmöglichkeiten entlang <i>Profile Lines</i> im <i>RAS-Mapper</i>	122
Abbildung 12-10: Mögliche Diagramm- und Tabellenausgaben an <i>Profile Lines</i> im <i>RAS-Mapper</i>	123
Abbildung 12-11: <i>3D Viewer</i> Schaltfläche im Hauptfenster von HEC-RAS	124
Abbildung 12-12: Ausschnitt des <i>3D Viewers</i>	124
Abbildung 12-13: Optionen zum Überfliegen der Karte im <i>3D Viewer</i>	126
Abbildung 12-14: <i>Stage and Flow Hydrograph</i> Schaltfläche im Hauptfenster von HEC-RAS	126
Abbildung 12-15: Ganglinien an 1D-Elementen als Ergebnisausgabe	127
Abbildung 13-1: Kalibrierungsregionen des n-Wertes nach Manning im <i>RAS-Mapper</i>	128
Abbildung 13-2: Eingabemöglichkeiten von Messwerten zum Vergleich mit Simulationsergebnissen	129

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Einige Verbesserungen und Erweiterungen der verschiedenen HEC-RAS Versionen	3
Tabelle 5-1: Klassifikationen der Landbedeckung im Beispielprojekt mit Rauheitsbeiwerten	15
Tabelle 5-2: Klassifikationen der Infiltrationsflächen im Beispielprojekt mit zugewiesenen Parametern	21
Tabelle 7-1: Im Beispielprojekt verwendete Parameter für Bruchkanten	47
Tabelle 8-1: Typische Abflusskoeffizienten und Überfallbeiwerte für unterschiedliche Wehrformen	52
Tabelle 8-2: Parameter zur Spezifizierung von Durchlässen	54
Tabelle 8-3: Im Beispielprojekt modellierte Durchlässe im Vergleich zu Bildern der Bauwerke	55
Tabelle 8-4: Möglichkeiten zur Modellierung beweglicher Wehröffnungen	56
Tabelle 8-5: Im Beispielprojekt modellierte Brücken im Vergleich zu Bildern der Bauwerke	63
Tabelle 9-1: Arten von Randbedingungen, je nach Lage der Randbedingungslinie	65
Tabelle 10-1: Maximale Courant-Zahlen je nach verwendetem Gleichungssatz	81
Tabelle 10-2: Zugrundeliegende Annahmen für die zur Verfügung stehenden Gleichungssätze	89
Tabelle 11-1: Besonderheiten und Eignungsbereiche der 2D-Feststofftransportformeln	97
Tabelle 11-2: Zur Verfügung stehende Methoden zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit von Partikeln und ihre Eigenschaften	100

Abkürzungsverzeichnis

AD	<i>Advection Diffusion</i>
ALS	<i>Airborne Laserscanning</i>
BC	<i>Boundary Condition</i>
CN	<i>Curve Number</i>
Coeff	<i>Coefficient</i>
Conn	<i>Connection</i>
Contr	<i>Contraction</i>
CSV	<i>Comma Seperated Value</i>
Del	<i>Delete</i>
DGM	<i>Digitales Geländemodelle</i>
DHDN	<i>Deutsches Hauptdreiecksnetz</i>
DS	<i>Downstream</i>
DSS	<i>Data Storage System</i>
DW	<i>Diffusion wave equations</i>
El	<i>Elevation</i>
Elev	<i>Elevation</i>
ELM	<i>Eulerian-Lagrangian Method</i>
EM	<i>Eulerian Method</i>
EPSG	<i>European Petroleum Survey Group Geodesy</i>
Expan	<i>Expansion</i>
GDAL	<i>Geospatial Data Abstraction Library</i>
GIS	<i>Geoinformationssystem</i>
HDF	<i>Hierarchical Data Format</i>
HEC	<i>Hydrologic Engineering Center</i>
HN	<i>Hydraulisch-numerisch</i>
HTab	<i>Hydraulic (Property) Table</i>
HW	<i>Headwater</i>
IC	<i>Initial Condition</i>
Ins	<i>Insert</i>
LIA	<i>Local Inertial Approximation</i>
Max	<i>Maximum</i>
Min	<i>Minimum</i>
No	<i>Number</i>
Param	<i>Parameter</i>
PRJ	<i>Project File oder Projection File</i>
Pt	<i>Point</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RANS	<i>Reynold's-Averaged-Navier-Stokes</i>
RAS	<i>River Analysis System</i>
RC	<i>Rating Curves</i>
RS	<i>River Station</i>
RST	<i>Restart File</i>
SA	<i>Storage Area</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SDF	<i>Survey Data Format</i>
Sed	<i>Sediment</i>
SHP	<i>Shape File</i>
SI	<i>Système international d'unités</i>
Sta	<i>Station</i>
STRG	<i>Steuerung</i>

SS	<i>Side Slope</i>
SWE	<i>Shallow water equations</i>
TIF	<i>Tagged Image File</i>
Tol	<i>Tolerance</i>
TS	<i>Time Series</i>
TW	<i>Tailwater</i>
US	<i>Upstream</i>
WS	<i>Water surface</i>
WSE	<i>Water surface elevation</i>
XS	<i>Cross Section</i>
ü. NN.	<i>über Normalnull</i>

Symbolverzeichnis

a	[mm]	Größte Achsenlänge eines Partikels
b	[mm]	Mittlere Achsenlänge eines Partikels
C	[m ^{1/2} /s]	Wehrkoeffizient
C_d	[-]	<i>Discharge coefficient</i> , gleich dem Überfallbeiwert μ
CN	[-]	<i>Curve Number</i>
Cr	[-]	Courant-Zahl
c	[mm]	Kleinste Achsenlänge eines Partikels
D	[mm]	Feuchtigkeitsdefizit des Bodens
d^*	[-]	Sedimentologischer Durchmesser
d_m	[mm]	Repräsentativer Korndurchmesser
E_v	[mm/hr]	Evapotranspirationsrate
F	[mm]	Akkumulierte Infiltration
Fr^*	[-]	Sedimentologische Froude-Zahl
f	[mm/hr]	Infiltrationsrate
f_*	[mm/hr]	Potenzielle Infiltration
f_c	[1/s]	Coriolis-Parameter
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
H	[m]	Energiehöhe über der Wehroberkante im Oberstrom
h	[m]	Wassertiefe
I_a	[mm]	Anfangsentnahmerate, englisch: <i>initial abstraction</i>
Kd	[N/(m ² ·hr)/Pa]	Erosionsrate in der Phase der Partikel Erosion, englisch: <i>Slope of the particle erosion rate curve</i>
Kd_{mw}	[N/(m ² ·hr)/Pa]	Erosionsrate in der Phase der Massenerosion, englisch: <i>Slope of the mass wasting erosion rate curve</i>
K_S	[mm/hr]	Hydraulische Leitfähigkeit
k_{St}	[m ^{1/3} /s]	Strickler-Beiwert
L	[m]	Länge der Überfallkrone eines Wehres
M	[N/(m ² ·hr)]	Erosionsrate in der Phase der Partikel Erosion
M_{mw}	[N/(m ² ·hr)]	Erosionsrate in der Phase der Massenerosion
N	[mm]	Gesamtniederschlag
N_A	[mm]	Abflussanteil
N_{Anf}	[mm]	Anfangsverlust
N_V	[mm]	Versickerungsanteil
n	[s/ m ^{1/3}]	Rauheitsbeiwert nach Manning
P	[mm]	Gesamtniederschlagshöhe, englisch: <i>precipitation</i>
P_e	[mm]	Niederschlagsüberschuss, englisch: <i>precipitation excess</i>
p	[N/m ²]	Druck
Q	[m ³ /s]	Durchfluss bzw. Wehrüberfall
q	[m/s]	Quelle/Senke
R	[mm/hr]	Niederschlagsintensität
r	[-]	Anfängliche Entnahmerate, englisch: <i>initial abstraction ratio</i>
r_{hy}	[m]	Hydraulischer Radius
S	[mm]	Bodenrückhalt, englisch: <i>soil retention</i>
S_F	[-]	Formfaktor nach Corey, englisch: <i>shape factor</i>

$Station$	[m]	Position entlang eines Querprofils
s_p	[mm/hr]	Versickerungsrate
t	[s], [min], [hr], [d]	Zeit
u	[m/s]	Fließgeschwindigkeitskomponente in x-Richtung
v	[m/s]	Fließgeschwindigkeit, bzw. Fließgeschwindigkeitskomponente in y-Richtung
w	[m/s]	Fließgeschwindigkeitskomponente in z-Richtung
z_s	[m ü. NN.]	Wasserspiegelhöhe
ΔX	[m]	Differenz zweier X-Koordinatenpunkte
ΔY	[m]	Differenz zweier Y-Koordinatenpunkte
Δt	[s]	Berechnungszeitschritt
Δx	[m]	Zellgröße des Berechnungsnetzes
γ	[kg/(m ² ·s ²)]	Spezifisches Gewicht, Wichte
θ	[-]	Shields-Wert
θ_{cr}	[-]	Kritischer Shields-Wert
θ_d	[-]	Bodenfeuchtedefizit
μ	[-]	Überfallbeiwert, gleich dem <i>discharge coefficient</i> C_d
ν	[m ² /s]	Kinematische Viskosität von Wasser
$\nu_{t,x}$	[m ² /s ²]	Horizontale Wirbelviskosität in x-Richtung
$\nu_{t,y}$	[m ² /s ²]	Horizontale Wirbelviskosität in y-Richtung
ρ	[kg/m ³]	Dichte von Wasser
ρ'	[-]	Relative Dichte
$\rho_{Sediment}$	[kg/m ³]	Dichte eines Sediments
τ	[N/m ²]	Schubspannung
$\tau_{b,x}$	[N/m ²]	Sohlschubspannung in x-Richtung
$\tau_{b,y}$	[N/m ²]	Sohlschubspannung in y-Richtung
τ_c	[N/m ²]	Sohlschubspannung ab welcher Partikelerosion stattfindet, englisch: <i>particle erosion threshold</i>
τ_{mw}	[N/m ²]	Sohlschubspannung ab welcher Massenerosion stattfindet, englisch: <i>mass wasting erosion threshold</i>
$\tau_{s,x}$	[N/m ²]	Oberflächenschubspannung durch Wind in x -Richtung
$\tau_{s,y}$	[N/m ²]	Oberflächenschubspannung durch Wind in y-Richtung
Ψ	[mm]	Gemittelte Saugwirkung an einer Benetzungsfront
∇	Vektor	Nabla-Operator

1 Einleitung

Eine zentrale Frage unserer Zeit ist der Umgang mit den Folgen des Klimawandels. In den vergangenen Jahren hat in diesem Zusammenhang die Häufigkeit von Extremwetterereignissen und Überflutungen bereits zugenommen (KLIWA, 2019). Auch in Zukunft ist mit einer Zunahme solcher vor allem regional drastischer Ereignisse zu rechnen (KLIWA, 2019), (IPCC, 2022). Aufgrund der Abhängigkeit von Gewässern zur Wasserbereitstellung und zu Transportzwecken sowie die historisch bedingte Ansiedlung der Menschheit an Gewässern ist eine Prognose von Überflutungsflächen bzw. von Wasserverfügbarkeit mittlerweile unerlässlich geworden. Die Prognosen müssen erstellt sowie stetig angepasst und ausgewertet werden, um für Extremwetterereignisse wie das des Starkregens im Juli 2021 vorbereitet zu sein. Durch den extremen Niederschlag kam es zu mehreren Überflutungen in Belgien, den Niederlanden und unter anderem dem Ahrtal in Deutschland (WWA, 2021). Ein wichtiges Werkzeug solcher Prognosen sind hydrologische und hydraulische Modelle. Ein Beispiel für ein hydraulisches Simulationsprogramm ist HEC-RAS. Ein großer Vorteil dieser Software ist, dass sie frei verfügbar ist. Jedoch ist weiterhin ein gewisses Knowhow zur Durchführung einer hydraulisch-numerischen (HN) Simulation notwendig, um realistische und verwertbare Ergebnisse zu produzieren.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Dokumentation anhand eines beispielhaften 2D-HN-Modelles in HEC-RAS zu erstellen. Die Dokumentation soll als Orientierungshilfe bei der Erstellung eigener Projekte dienen. Es sollen die Arbeitsschritte ersichtlich werden, welche zur Erstellung und Anwendung eines Modells sowie zur Darstellung der Simulationsergebnisse notwendig sind. Zusätzlich zu dieser schriftlichen Dokumentation wird eine Videoreihe erstellt, die als studentische Übungseinheit genutzt werden kann. Für das Beispielprojekt wurde ein umfangreiches Datenpaket durch das Ingenieurbüro SYDRO Consult GmbH zur Verfügung gestellt. Ursprünglich stammen die Daten aus einem Projekt zur Erstellung von Hochwassergefahrenkarten durch das Regierungspräsidium Tübingen. Die Daten beziehen sich auf das Einzugsgebiet des in Baden-Württemberg gelegenen Flusses Eyach, aus dem ein kleineres Gebiet in und um die Ortschaft Erzingen als Beispielprojekt gewählt wurde. Durch Erzingen fließt der Fluss Steinach, welcher wenige Kilometer später in Balingen in die Eyach mündet. Dieser wird mit den dortigen drei Zuflüssen aus Riedbach, Bontalbach und Haugenbach modelliert.

In dieser Dokumentation werden zunächst einige grundlegenden Informationen über HEC-RAS gegeben und anschließend die Erstellung eines neuen Projektes bzw. die dafür notwendigen, vorbereitenden Schritte erläutert. Darauf aufbauend werden die Arbeitsschritte der Implementierung von Rauheitsbeiwerten, der Gewässerlaufmodellierung in einem 3D-Geländemodell sowie das Einpflegen verschiedener Bauwerke dargestellt. In den nächsten Kapiteln wird die Generierung eines Berechnungsnetzes sowie das Aufstellen von Randbedingungen behandelt. Anschließend werden die Schritte für die Durchführung einer 2D-Simulation und für die Simulation von Sedimentbewegung erläutert. Zuletzt werden die Möglichkeiten der Ergebnisvisualisierung sowie die Schritte der Kalibrierung, Validierung und Sensitivitätsanalyse aufgeführt.

Für ein optimales Verständnis der vorliegenden Arbeit wird dringend empfohlen, parallel zu dieser Arbeit ab Kapitel 3 ein eigenes Projekt in der Software HEC-RAS zu erstellen. Weiterhin wird diese Anleitung durch ein sich kapitelweise durchziehendes Beispiel flankiert und verdeutlicht. Die spezifischen Schritte des Beispielprojektes werden durch **blaue Kästen** gekennzeichnet. Da es meist mehrere Herangehensweisen gibt und einige Abschnitte im Beispielprojekt aufgrund nicht vorhandener Daten nicht umgesetzt werden, ist nicht in allen Abschnitten eine Beispielanwendung vorhanden.

2 Grundlagen zu HEC-RAS

Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über das Programm HEC-RAS und seine Anwendungsbereiche gegeben und anschließend auf das zugrundeliegende Dateimanagement eingegangen.

2.1 HEC-RAS und seine Anwendungsbereiche

Der Programmname HEC-RAS steht für „Hydrologic Engineering Center – River Analysis System“. Er verweist somit im ersten Teil auf die Entwickler des Programms: Das *Hydrologic Engineering Center* (HEC) der *US Army Corps of Engineers*. Durch HEC wird eine Vielzahl weiterer kostenfreier Programme in den Bereichen Wassermanagement, Hydraulik und Hydrologie zur Verfügung gestellt. Der zweite Teil des Programmnamens verweist auf seinen Anwendungsbereich: *River Analysis System*. Folgende Anwendungsoptionen sind möglich: (HEC, 2022b)

- 1D-Berechnung von Wasseroberflächen in Querschnitten für stationäres Fließverhalten
 - 1D-, 2D- sowie kombinierte 1D/2D-Berechnung von instationärem Fließverhalten in Gewässern und Gebieten unter Berücksichtigung verschiedenster wasserbaulicher Komponenten
 - 1D-, sowie 2D-Sedimenttransportsimulation zur langfristigen Abschätzung von Kolk und Ablagerungen
 - 1D-Modellierung der Wasserqualität (gelöster Stickstoff, gelöster Phosphor, Algen, gelöster Sauerstoff sowie kohlenstoffhaltiger biologischer Sauerstoffbedarf) in Flüssen
- (HEC, 2022b)

In dieser Arbeit werden jedoch nur die 2D-Modellierung von instationärem Fließverhalten sowie wasserbaulicher Komponenten und die 2D-Sedimenttransportsimulation behandelt. Detailliertere Anleitungen zu allen Themenbereichen bietet HEC auf seiner Internetseite „HEC-RAS Documentation“ an (HEC, 2022c). Ergänzend zu empfehlen sind die offiziellen YouTube Kanäle von HEC: „Hydrologic Engineering Center“ und „HEC RAS“ sowie der Kanal „The RAS Solution“, eine Kollaboration von „Kleinschmidt Associates“ und „Surface Water Solutions“ (YouTube, 2022).

2.2 Entwicklungsgeschichte von HEC-RAS

Das *Hydrologic Engineering Center* ist eine Abteilung des *Institute for Water Resources* innerhalb der *US Army Corps of Engineers* (HEC, 2022g). HEC wurde 1964 gegründet, um das Wissen zu bewahren, welches durch Ingenieure der *Corps of Engineers* während und nach dem zweiten Weltkrieg zusammengetragen wurde. Von Beginn an war die Softwareentwicklung ein Aufgabengebiet des HEC ebenso wie das Angebot von Schulungen. Einer der Vorläufer von HEC-RAS war HEC-2, welches bereits 1968 zur hydraulischen Modellierung von Flüssen verwendet wurde (Maeder, 2015). Weitere frühere Softwarepakete waren HEC-1 zur Berechnung der Hydrologie von Einzugsgebieten, HEC-3 zur Analyse von Stauseen und HEC-4 zur stochastischen Generierung von Abflüssen. Innerhalb der ersten Dekade des HEC wuchs dessen Mitarbeiterstab und sein Aufgabengebiet wurde auf die Planungsanalyse für Wasserbaufragen erweitert. Heute hat HEC ca. 35 Mitarbeiter und die Tätigkeiten sind mit Lehrgängen, Softwareentwicklung und Planungsanalyse trotz einiger struktureller Änderungen unverändert geblieben. (HEC, 2022a)

Die erste Version von HEC-RAS wurde im Juli 1995 veröffentlicht (HEC, 2022g). Hier waren zunächst nur stationäre Simulationen zwischen Querprofilen möglich. Seitdem wurden weitere 5 Versionen mit nahezu identischer Benutzeroberfläche und mit folgenden Verbesserungen und Erweiterungen herausgebracht: (Science & Engineering, 2016)

Tabelle 2-1: Einige Verbesserungen und Erweiterungen der verschiedenen HEC-RAS Versionen (Science & Engineering, 2016)

HEC-RAS Version	Erscheinungsjahr	Implementierte Verbesserungen und Erweiterungen
Version 2	1997	– Korrektur der Berechnung von Druckströmungen an Brücken und Durchlässen
Version 3	2001	– Möglichkeit der instationären Strömung – Darstellungsmöglichkeit als Überflutungskarte – Schnittstelle mit GIS-Programmen über die Erweiterung HEC-GeoRAS
Version 4	2008	– Modellierung von Sedimenttransport und Wasserqualität – Quasi-instationäre Strömung
Version 5	2016	– Detaillierte 2D-Hochwassersimulation – Dammbrechsimulation
Version 6	2021	– Sedimenttransportmodellierung im 2D-Fall – 3D-Ergebnisvisualisierung – Simulation Nicht-Newtonscher Fluide – 1D-Lösung mit Finite-Volumen-Methode

2.3 Zugrundeliegendes Dateimanagement von HEC-RAS

Um den vollen Funktionsumfang des Programms HEC-RAS effektiv nutzen zu können, ist es wichtig, das zugrundeliegende Dateimanagement und damit die innere Logik des Programms zu verstehen. Diese ist in Abbildung 2-1 für eine 2D-Strömungssimulation dargestellt und wird nun von oben nach unten erläutert. Das Dateimanagement für eine 2D-Sedimentsimulation wird in Abschnitt 11.1 dargestellt.

Wird ein neues HEC-RAS Projekt eröffnet, erstellt der Nutzer eine *.prj-Datei (1. Ebene). Diese Datei verknüpft alle Dateien der Ebenen darunter und enthält Grundeinstellungen sowie eine Projektbeschreibung. Öffnet der Nutzer im Anschluss das in HEC-RAS enthaltene Tool *RAS-Mapper* (deutsch: RAS-Kartograph), wird automatisch die *.rasmap-Datei erstellt (1. Ebene). Diese definiert die geographische Projektion und ermöglicht das Betrachten sowie Bearbeiten verschiedener Kartenlayer und die Visualisierung der Simulationsergebnisse. (Price, 2022)

Möchte der Nutzer nun eine Simulation starten, muss eine *Unsteady Plan* Datei (2. Ebene) erstellt werden. Hier werden sämtliche Simulationseinstellungen getroffen. Die *Unsteady Plan* Datei greift auf zwei weitere Dateien der darunterliegenden 3. Ebene zu: Die *Unsteady Flow* Datei (deutsch: Instationäre Strömungsdatei) sowie die *Geometry* Datei (deutsch: Geometriedatei). (Price, 2022)

Die *Unsteady Flow* Datei beinhaltet die zu simulierende Ganglinie sowie Niederschlagsraten und definiert die Art der Randbedingungen. Die *Geometry* Datei enthält Informationen zum Mesh (deutsch:

Berechnungsnetz) sowie zur Lage der Randbedingungen. *Geometry* sowie *Unsteady Flow* Dateien können mehrfach genutzt werden. Es können also beispielsweise wie in Abbildung 2-1 dargestellt mehrere *Unsteady Plan* Dateien auf dieselbe *Geometry* Datei zugreifen. (Price, 2022)

Letztlich greift die *Geometry* Datei zusätzlich auf weitere Dateien der Ebene 4 zu, die im *RAS-Mapper* in verschiedenen Layern erstellt werden. Der einzige hiervon für eine 2D-Simulation zwingend notwendige ist der *Terrain* Layer (deutsch: Geländelayer), eine Rasterdatei mit Höheninformationen zum Untersuchungsgebiet. Weitere vier Layer sind optional zu ergänzen: *Manning's n*, *Infiltration*, *% Impervious*, *Sediment Bed Material*. Hier exemplarisch aufgeführt sind *Manning's n*, welcher Rasterinformationen zur Geländerauheit beinhalten, und *Infiltration*, welcher Informationen zur Berechnung der Infiltration enthält. Auch hier können mehrere *Geometry* Dateien auf dieselben untergeordneten Layer zugreifen. (HEC, 2022e)

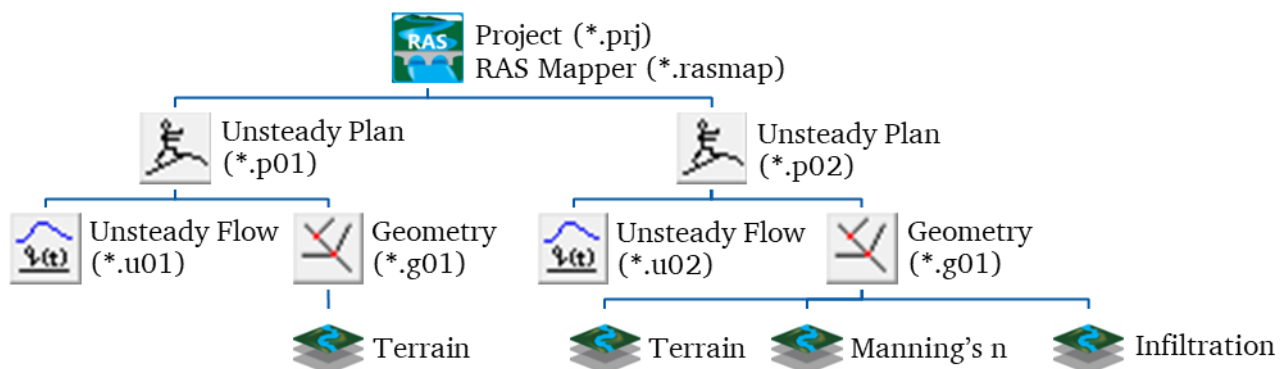


Abbildung 2-1: Dateimanagement einer 2D-Simulation in HEC-RAS (Price, 2022)

Dieser Aufbau ermöglicht es beispielsweise, ein Modell des Ist-Zustandes über verschiedene *Unsteady Plan* Dateien mit unterschiedlichen Flutereignissen zu simulieren und dieselben Flutereignisse auch für einen modifizierten Zustand zu berechnen. Ebenso wird durch diese Struktur der Aufwand für eine Kalibrierung verringert.

3 Erstellung eines HEC-RAS Projektes

Bevor es mit der eigentlichen Arbeit im Programm losgehen kann, sollten einige vorbereitende Schritte befolgt werden, die im Folgenden kurz erläutert werden. Anzumerken ist, dass für diese Ausarbeitung die Version 6.2 von HEC-RAS verwendet wurde, welche zum Beginn der Erstellung dieser Arbeit die Neuste war. Für die Videoreihe wird die Version 6.3.1 verwendet, welche im Laufe der Erstellung dieser Arbeit veröffentlicht wurde, um wesentliche Erweiterungen zu erfassen. Normalerweise sollte jedoch innerhalb eines Projektes aufgrund von Kompatibilitätsproblemen nur eine Version von HEC-RAS verwendet werden. Die Software kann auf der Internetseite des *Hydrologic Engineering Center* der *US Army Corps of Engineers* unter *Software – HEC-RAS – Downloads* heruntergeladen werden (HEC, 2022b).

3.1 Aufbereiten von Daten

Mindestens notwendig für das Erstellen eines 2D-HN-Modells mit HEC-RAS ist ein 3D-Geländemodell. Solche digitalen Geländemodelle (DGM) können nach aktuellem Stand (Januar 2023) mit einer Rasterweite von 1 m für das Bundesland Hessen auf der Internetseite der Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation im Downloadcenter kostenfrei heruntergeladen werden. Hier können auch weitere nützliche Daten, wie zum Beispiel Luftbilder abgerufen werden (HVBG, 2022). Es ist sinnvoll, das verwendete DGM vor dem Import in HEC-RAS zu einer einzelnen Datei zusammenzufügen bzw. auf die Größe des gewünschten Untersuchungsgebietes zuzuschneiden. Auch weitere großflächige Daten wie beispielsweise Landnutzungsdaten sollten, falls verfügbar, zuvor zurechtgeschnitten werden, um unnötig große Datenmengen zu vermeiden. Dies kann mittels einer GIS-Software umgesetzt werden. Beispielhaft hierfür zu nennen ist QGIS, eine ebenso wie HEC-RAS kostenfrei verfügbare Software (QGIS, 2022). Hier können auch weitere Dateien vorbereitet werden, wie zum Beispiel *.shp-Dateien für die Mittellinie sowie die Uferlinien des zu modellierenden Gewässers, Mittellinien für Bauwerke wie Durchlässe, Brücken und Wehre oder Umrisse von Gebäuden. Vermessungsdaten für Querprofile sollten vorab in ein Format konvertiert werden, welches von HEC-RAS importiert werden kann (s. Abschnitt 6.1.4). Auch Abflussganglinien und Wasserstände an Pegeln sowie Werte für Hoch- oder Niedrigwasser, können vorab beschafft werden. Für Hessen ist dies auf der Internetseite des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie möglich (HLNUG, 2022). Wird eine Sedimentsimulation angestrebt, sollten auch Informationen über die Sedimentzusammensetzung vorliegen oder ggf. durch eine Ortsbegehung mit Probenahmen erfasst werden.

3.2 Verzeichnisstruktur

Zur Übersicht und Ordnung der Daten ist es sinnvoll, eine Ordnerstruktur zu erstellen, wie sie in Abbildung 3-1 zu sehen ist (Price, 2022). Die von HEC-RAS erstellte *.prj-Datei, die alles verknüpft, wird auf derselben Ebene wie die abgebildeten Ordner gespeichert.

01_Projection 02_Terrain 03_Aerial Photos 04_Shapefiles 05_Land Use 06_Hydrology 07_Results

Abbildung 3-1: Verzeichnisstruktur eines HEC-RAS Projektes (Price, 2022)

- In „01_Projection“ wird nur die im Projekt verwendete Projektion gespeichert (s. Abschnitt 4.1). Da diese dieselbe Endung wie die Projektdatei besitzt, sollte sie, um Verwechslungen vorzubeugen, in einem eigenen Unterordner gespeichert werden.
 - In „02_Terrain“ werden die Eingangsdaten zum Geländemodell und selbst erstellte Geländemodifizierungen abgelegt (s. Abschnitte 4.2 und 6.2).
 - „03_Aerial Photos“ beinhaltet Luftbildaufnahmen oder Ausschnitte von Online-Kartendiensten (s. Abschnitt 5.1).
 - In „04_Shapefiles“ werden verschiedenste *.shp-Dateien gespeichert, die im Verlauf des Projektes benötigt werden.
 - In „05_Land Use“ werden Eingangsdaten zur Landnutzung sowie Tabellen zur Zuweisung von Landnutzung und Rauheitsbeiwerten abgelegt, sowie Landnutzungslayer gespeichert (s. Kapitel 5).
 - Der Ordner „06_Hydrology“ enthält Eingangsdaten zu Ganglinien sowie die von HEC-RAS erstellten *Unsteady Flow* Datei (s. Abschnitt 9.2).
 - Im Ordner „07_Results“ können die von HEC-RAS erstellten Ergebnisdateien gespeichert sowie selbst erstellte Ergebnisdarstellungen abgelegt werden (s. Kapitel 10 und 12).
- (Price, 2022), (The RAS Solution, 2019)

Weiterhin ist es ratsam, in den Ordnern „02_Terrain“ sowie „04_Shapefiles“ Unterordner für mögliche Versionen zu erstellen, falls verschiedene Modifikationen eines Projektes modelliert werden sollen.

3.3 Festlegen von Format und Einheit

Da es sich bei HEC-RAS um ein amerikanisches Programm handelt, muss auch das amerikanische Format für Datum und Uhrzeit verwendet werden. Das bedeutet für den konkreten Anwendungsfall, dass das in den Systemeinstellungen hinterlegte regionale Format zu „Englisch (Vereinigte Staaten)“ geändert werden muss (s. Abbildung 3-2). Beim Belassen des deutschen Formats ist es möglich, dass bei einer instationären Simulation eine Fehlermeldung auftritt. Ebenso kann es beim Import verschiedener Daten zu Fehlermeldungen kommen. Daher wird das Umstellen des Datumsformates während der gesamten Arbeitszeit mit HEC-RAS empfohlen. Weiterhin muss für alle Dezimalkommazahlen innerhalb von HEC-RAS ein Punkt statt eines Kommas als Trennzeichen verwendet werden.

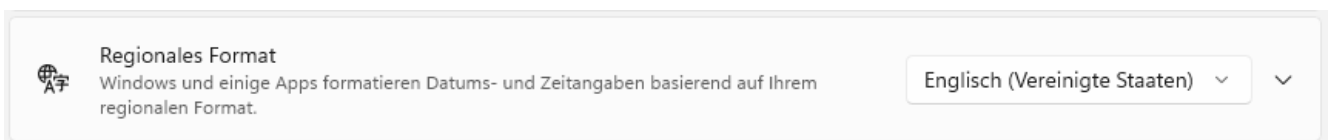


Abbildung 3-2: Einstellung des regionalen Formates für Datum und Uhrzeit in den Systemeinstellungen

Zuletzt sollte vor dem Erstellen eines Projektes im Hauptfenster von HEC-RAS (s. Abbildung 4-1) unter dem Reiter *Options – Unit system* das metrische System ausgewählt (Auswahl: *System International (Metric System)*) und als Standard festgelegt werden (Haken bei: *Set as default for new projects*).

3.4 Erstellen und Öffnen von Projekten

Ein neues HEC-RAS Projekt wird im Hauptfenster (s. Abbildung 3-3) über den Reiter *File – New Project* erstellt. Eine eindeutige Benennung des Projektes, welche den Gewässernamen sowie einen Hinweis auf den betrachteten Abschnitt beinhaltet, wird empfohlen. Die so erstellte *.prj-Datei verknüpft alle anderen benötigten Dateien (s. Abbildung 2-1) und kann über den Reiter *File – Open Project* wieder geöffnet werden. Um sich im weiteren Verlauf das Öffnen des Projektes zu vereinfachen, kann im Hauptfenster unter *Options – Program Setup – Default Project Folder* der Ordner des aktuellen Projektes als Standardordner hinterlegt werden. Zusätzlich ist es bei der Erstellung eines neuen Projektes hilfreich, in der letzten Zeile des Hauptfensters unter *Description* eine kurze Beschreibung des Projektes zu verfassen (s. Abbildung 3-3). (HEC, 2022d)

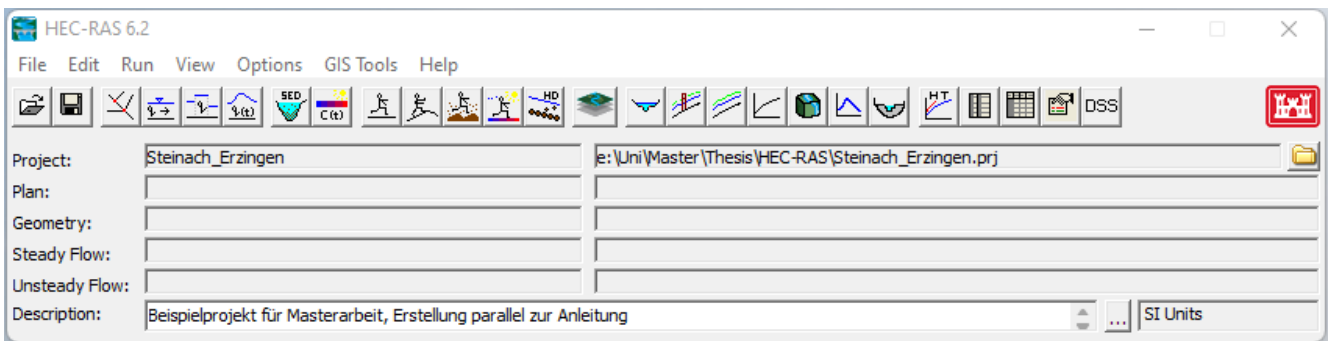


Abbildung 3-3: Hauptfenster von HEC-RAS

In dem hier verwendeten Beispiel wird ein Abschnitt der Steinach durch die Ortschaft Erzingen modelliert. Als Projektname wird demnach „Steinach_Erzingen“ gewählt. Es wird zudem eine Beschreibung des Projektes hinzugefügt (s. Abbildung 3-3).

4 Geländeerstellung im *RAS-Mapper*

Die ersten Schritte für die Projekterstellung sind das Festlegen einer Projektionsart sowie das Importieren des digitalen Geländemodells.

4.1 Projektion festlegen

Zur Erstellung eines 2D-Modells in HEC-RAS sind initiale Schritte im Tool *RAS-Mapper* notwendig. Dieses lässt sich über die in Abbildung 4-1 markierte Schaltfläche im Hauptfenster öffnen.

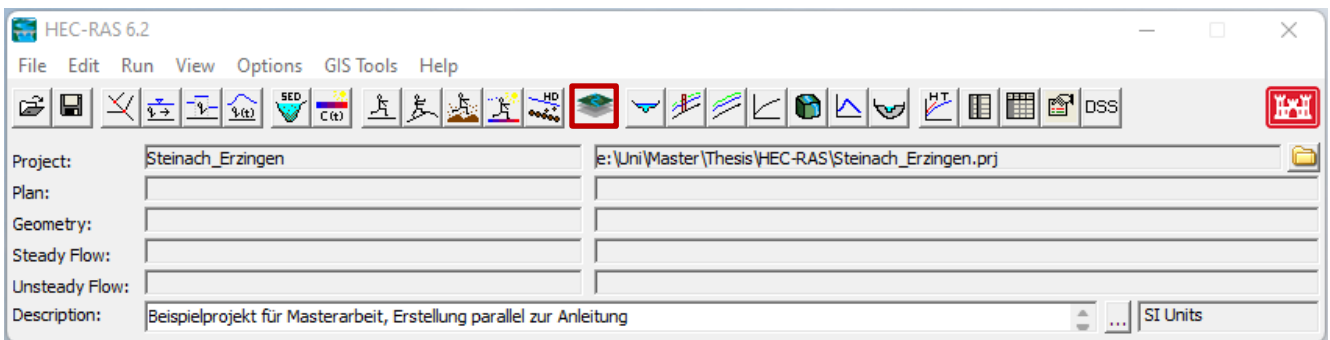


Abbildung 4-1: *RAS-Mapper* Schaltfläche im Hauptfenster von HEC-RAS

Im *RAS-Mapper* wird zunächst unter dem Reiter *Project – Set Projection* dasselbe Koordinatensystem gewählt, welches dem DGM zugrunde liegt. Dazu wird eine *.prj-Dateien benötigt, die bspw. auf der Internetseite <https://spatialreference.org/> heruntergeladen werden kann (Butler, et al., 2013), (Price, 2022). Da diese Datei leicht mit der Projektdatei verwechselt werden kann, wird die Projektionsdatei unter „01_Projection“ gespeichert. Diese Datei sollte sinnvoll umbenannt werden, sodass die Projektionsart ersichtlich wird. Diese Projektionsdatei wird, wie in Abbildung 4-2 gezeigt, über die markierte Schaltfläche abgerufen und mit *OK* bestätigt. (The RAS Solution, 2019)

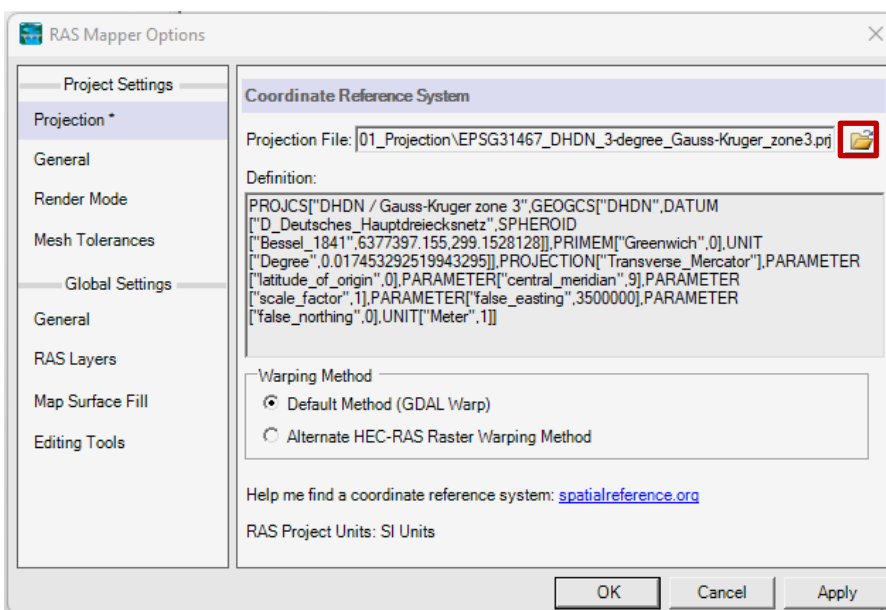



Abbildung 4-2: Koordinatensystem im *RAS-Mapper* festlegen

Im Beispielprojekt wird die Projektionsdatei „EPSG31467_DHDN_3-degree_Gauss-Kruger_zone3“ genannt. Verwendet wird das Gauß-Krüger-Koordinatensystem der Zone 3. Das Gauß-Krüger-System wird ausschließlich in Deutschland für Vermessungszwecke genutzt und ist somit Teil des Deutschen Hauptdreiecksnetzes (DHDN). EPSG 31467 ist der Code der *European Petroleum Survey Group Geodesy* (EPSG), welcher auf dieses spezifische Koordinatensystem verweist. (de Lange, 2013)

4.2 Geländemodell importieren

In Abbildung 4-3 ist das Fenster des *RAS-Mappers* dargestellt. In dem markierten Bereich am linken Rand werden die Layer aufgelistet, ähnlich wie bei GIS-Programmen. Diese können (de-)aktiviert werden, sodass sie im Kartenbereich in der Mitte dargestellt werden. Ebenso können Unterlayer ein- bzw. ausgeblendet werden. Zu Beginn sind sämtliche Layer leer. Mithilfe der markierten Toolbox oben in der Mitte kann die Zoomstufe des dargestellten Kartenausschnittes verändert sowie zur vorherigen Ansicht geblättert werden. Zudem wird ein Werkzeug zum Vermessen bereitgestellt ().

Nun wird das DGM in den *RAS-Mapper* importiert. Dazu wird per Rechtsklick auf den Layer *Terrain – Create a New RAS Terrain* ausgewählt. Im sich nun öffnenden Fenster (s. Abbildung 4-3) wird über + die Raster-Datei des DGM hinzugefügt. Diese sollte zuvor im Ordner „02_Terrain“ abgelegt worden sein. Über die Schaltfläche hinter *Filename* (s. Abbildung 4-3) wird der Name des zu erstellenden Terrains geändert und die Datei ebenfalls unter „02_Terrain“ gespeichert. Anhand des ausgewählten DGM erstellt HEC-RAS nach Klick auf *Create* eine *.hdf-Datei. Diese Datei wird dem Terrain Layer automatisch hinzugefügt, kann in neuen Projekten aber auch über Rechtsklick auf *Terrain – Add Existing RAS Terrain* geöffnet werden. Die Visualisierungsmöglichkeiten des Geländes und anderer Layer sind in Abschnitt 12.1.1 unter „Darstellungsoptionen von Layern“ aufgeführt. (The RAS Solution, 2019)

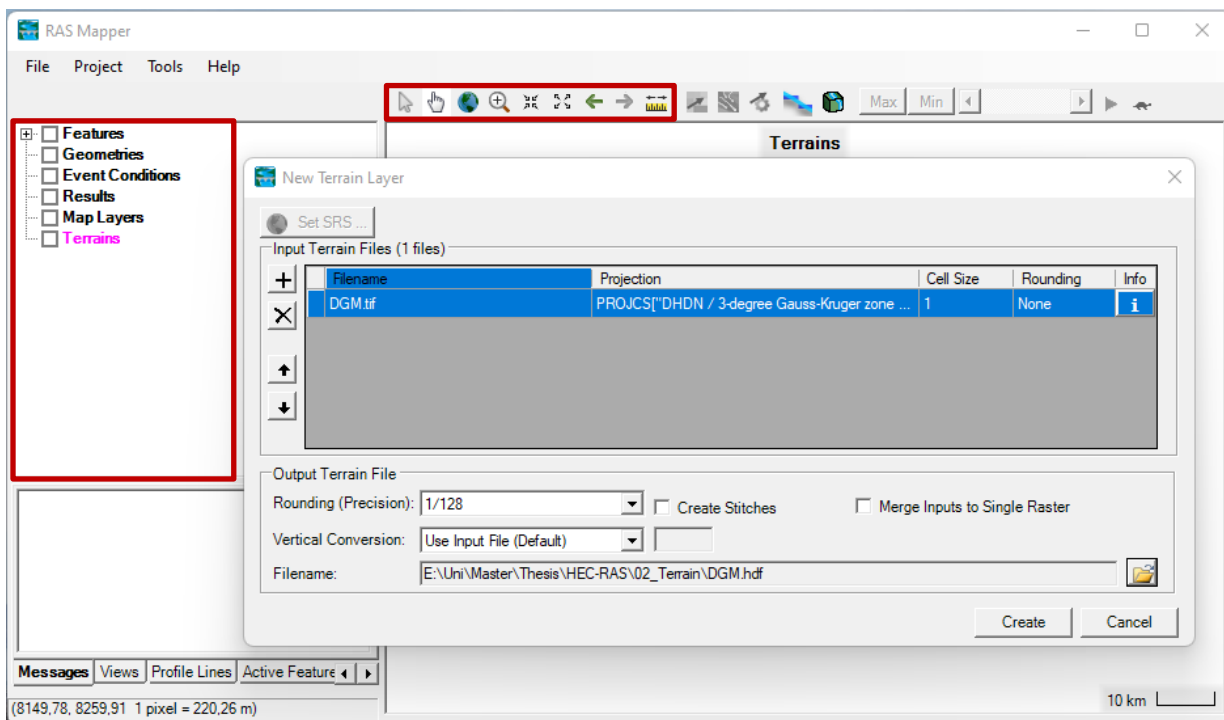


Abbildung 4-3: Übersicht über den *RAS-Mapper* sowie Erstellen eines neuen Geländelayers

In dem verwendeten Beispiel wird das zu erstellende Gelände zusätzlich in einem Unterordner namens „v01_DGMonly“ abgelegt. Der Geländelayer wird „DGM“ genannt.

4.3 Zeichnen im *RAS-Mapper*

Im weiteren Verlauf ist an einigen Stellen das Zeichnen oder Importieren von Punkt-, Linien- oder Polygonfeatures im *.shp-Format notwendig. Die Werkzeuge hierfür sind immer dieselben und werden daher hier als Einschub erläutert. Als Beispiel wird der oberste Layer *Features* verwendet (s. Abbildung 4-4). Dieser wird einerseits zur Ergebnisdarstellung genutzt, andererseits können hier verschiedene Features für andere Layer vorbereitend erstellt und bearbeitet werden, ohne dass der eigentliche Layer davon betroffen ist. Der bereits existierende Unterlayer *Profile Lines* kann genutzt werden, um Linienfeatures zu erstellen. Sind andere Featuretypen gewünscht, kann ein neuer Unterlayer per Rechtsklick auf *Features* – *Create New Layer* und Auswahl des gewünschten Layertyps erstellt werden. Zur Erstellung der Features muss der Bearbeitungsmodus aktiviert sein. Dazu wird der gewünschte Layer ausgewählt und die Bearbeitung über Rechtsklick und Auswahl von *Edit Layer* aktiviert. Alternativ kann über die Schaltfläche hinter *Selected Layer* (oberhalb der Layer Auflistung) die Bearbeitung aktiviert und beendet werden (s. Abbildung 4-4 Markierung). Ist die Bearbeitung aktiviert, wird im oberen Bereich der Karte eine Toolbox eingeblendet (s. Abbildung 4-4 Markierung). (HEC, 2022f)

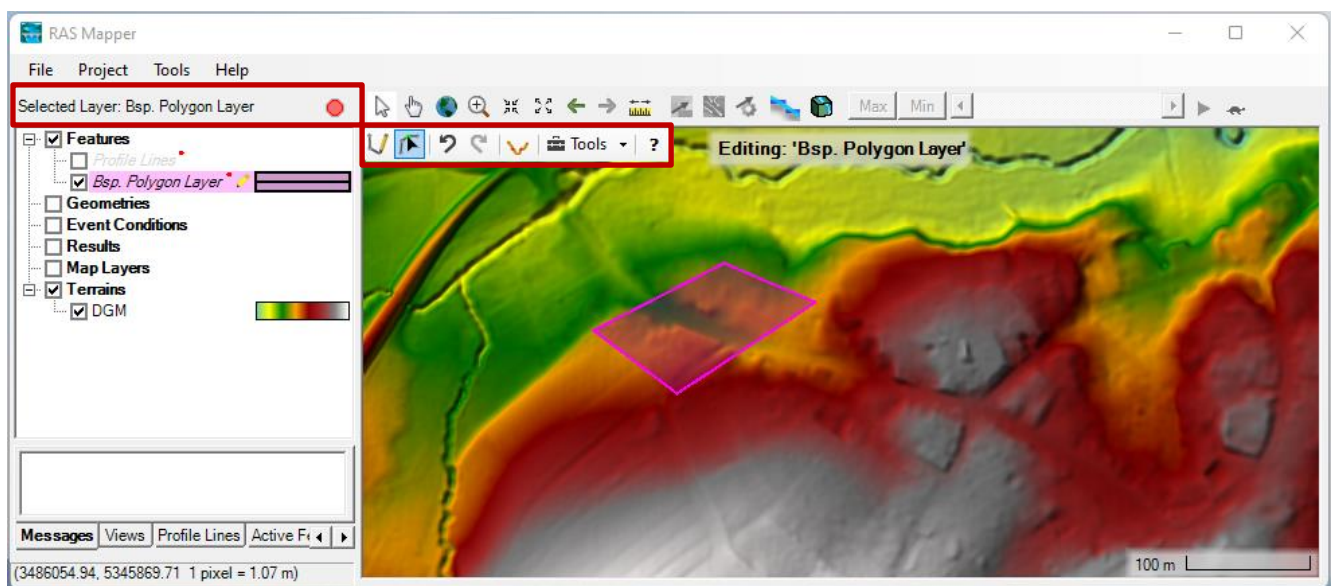








Abbildung 4-4: Bearbeitung von Features im *RAS-Mapper*

-  Ist die erste Schaltfläche der Toolbox ausgewählt, wird ein neues Feature erstellt. Mit jedem Klick wird ein neuer Punkt hinzugefügt, mit einem Doppelklick wird die Erstellung des Features beendet. Features, die gerade erstellt werden, sind grün eingefärbt.
-  Ist die zweite Schaltfläche ausgewählt, können bestehende Features ausgewählt und bearbeitet werden. Ausgewählte Features färben sich pink.
-  Über die dritte und vierte Schaltfläche können Schritte in der Featurebearbeitung rückgängig gemacht bzw. wiederholt werden.

-
-  Über die fünfte Schaltfläche wird das Gelände entlang der Linie eines ausgewählten Features geplottet. Es wird das bzw. die Gelände dargestellt, welche gerade eingeblendet sind.
 -  **Tools** ▾ Im Dropdown Menü der Schaltfläche *Tools* stehen weiteren Bearbeitungswerkzeuge zu Verfügung, unter anderen *Reverse*, *Merge*, *Clip*, *Buffer*.
 -  ? Über das Fragezeichen öffnet sich eine Kurzanleitung mit Erklärungen zu allen Bearbeitungswerkzeugen.
- (HEC, 2022f, pp. 61-64)

Features können per Rechtsklick auf den gewünschten Layer und *Import Features From Shapefile* im *.shp-Format importiert werden. Hierbei kann über das Ordner-Symbol im nächsten Fenster ein Dateipfad gewählt und über die Schaltfläche *Import* importiert werden. (HEC, 2022f)

Ist die Modifizierung des Layers vollendet, wird die Bearbeitung des Layers über die *Stop Editing Selected Layer* Schaltfläche (s. Abbildung 4-4 roter Punkt) oder über Rechtsklick und Auswahl von *Stop Editing* beendet. (HEC, 2022f)

5 Rauheitsbeiwerte und Versickerung

Im folgenden Kapitel werden die *Map Layers* innerhalb des *RAS-Mappers* behandelt. Dort können Luftbilder und Onlinekarten erstellt sowie Rasterinformationen zur Landbedeckung hinzugefügt werden. Anschließend kann den verschiedenen Landnutzungstypen ein Rauheitsbeiwert sowie ein Durchlässigkeitswert zugeordnet werden.

5.1 Luftbild und Ansicht

Als erstes wird ein Satellitenbild-Layer (z. B. Google Hybrid) hinzugefügt. Dieser kann über Rechtsklick auf *Map Layers – Add Web Imagery Layer* aus einer Liste ausgewählt werden. Mittels Doppelklicks auf den neu erstellten Layer kann im Eigenschaften Fenster unter *Opacity* die Transparenz eingestellt werden, damit sowohl Luftbild als auch *Terrain* Layer sichtbar sind (s. Abschnitt 12.1.1 „Darstellungsoptionen von Layern“). Da HEC-RAS für diesen Layer auf das Internet zugreifen muss, können zudem Ausschnitte lokal gespeichert werden, um diese auch offline einsehen zu können. Dazu kann eine aktuelle Ansicht über Rechtsklick auf *Google Hybrid – Export Layer – Export current image to TIF* im Ordner „03_Aerial Photos“ gespeichert werden. Diese Ansicht kann über Rechtsklick auf *Map Layers – Reference Layers – Add Reference Layer* wieder importiert werden. Hierbei muss bei der Auswahl des hinzuzufügenden Bildes im Windows Explorer im Dropdown Menü hinter *Dateiname* als Dateiformat *Other* oder *Common Raster Files* ausgewählt werden, damit alle Dateien angezeigt werden. Dieses Luftbild ist zwar nun auf die gewählte Ansicht begrenzt, jedoch dafür offline verfügbar. Über denselben Weg können auch eigene Luftbilder hinzugefügt werden, die zuvor in „03_Aerial Photos“ abgelegt wurden. (The RAS Solution, 2019)

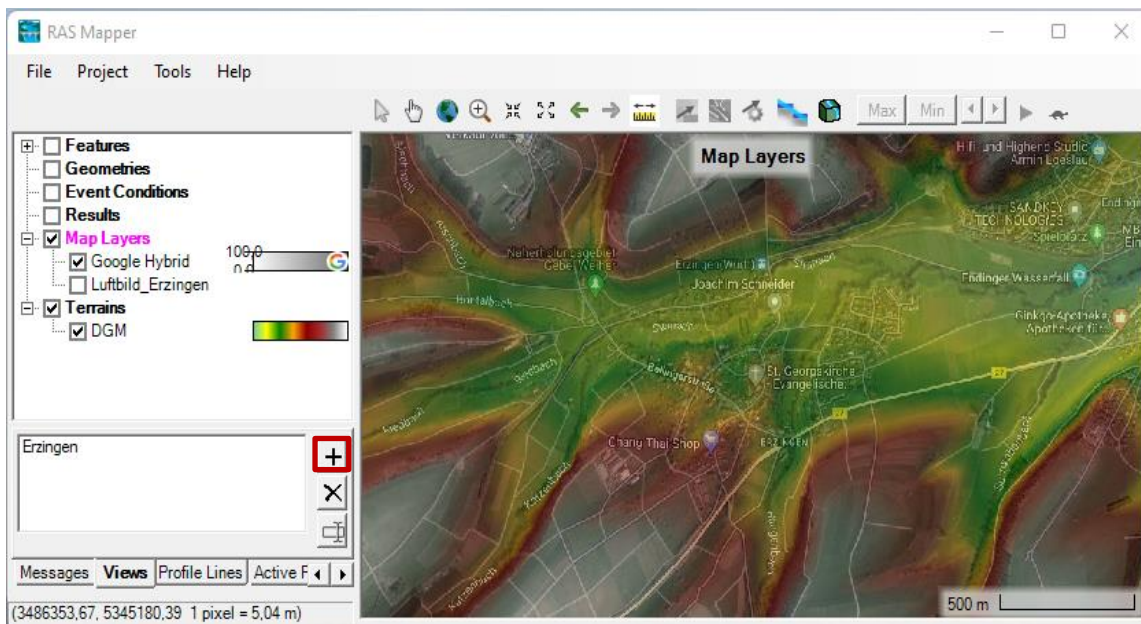


Abbildung 5-1: Erstellen einer Ansicht im *RAS-Mapper*

Weiterhin kann über das + des Reiters *View* im unteren Bereich eine Ansicht gesichert werden (s. Abbildung 5-1 Markierung). Bei Doppelklick auf die erstellte *View* zoomt die Ansicht immer wieder zurück auf den gewählten Kartenausschnitt. (The RAS Solution, 2019)

Im Beispielprojekt wird zunächst als Onlinekarte Google Hybrid hinzugefügt. Außerdem steht ein hoch aufgelöstes Luftbild zur Verfügung, welches ebenfalls importiert wird. Aufgrund der hohen Auflösung ist jedoch das Verschieben des Kartenausschnittes des Luftbildes nicht immer ohne Verzögerung möglich, weshalb die Onlinekarte für alle weniger präzisen Zwecke hinzugenommen wird.

5.2 Landnutzungskarte

Die Festlegung der Geländerauheit (und der Durchlässigkeit) erfolgt indirekt über einen Landnutzungs- oder Landbedeckungslayer (englisch: *Land Cover Layer*). Daher muss dieser zwingend zuerst erzeugt werden. Ein Landnutzungslayer wird über Rechtsklick auf *Map Layers* erstellt. Hier gibt es drei Möglichkeiten:

1. Stehen GIS-Daten zur Landnutzung zur Verfügung, wird der Pfad *Create a New RAS Layer – Land Cover Layer* gewählt. Über diese Option können Dateien importiert werden. Diese sollten vorab unter „05_Land Use“ abgelegt worden sein. Hierbei können sowohl Vektor- als auch Rasterdateien als Datengrundlage des Layers dienen. HEC-RAS erstellt jedoch aus beidem eine Rasterdatei. Die Daten können über das + (s. Abbildung 5-2) importiert werden. Im Dropdown Menü oben rechts kann das Attribut der importierten *.shp-Dateien ausgewählt werden, welches zur Klassifikation der Landnutzung verwendet werden soll. Wurde das richtige Attribut gewählt, werden in der Tabelle unten links alle Bezeichnungen, die unter diesem Attribut vorkommen, gelistet. Dort hat der Nutzer die Möglichkeit, die Namen der Landnutzungsklassifikation in der rechten Spalte anzupassen. Jeder Name darf nur einmal vergeben werden. Im Feld hinter *Cell Size* kann die Größe der Rasterzellen angegeben werden, die HEC-RAS erzeugen soll. Zuletzt muss über das Ordnersymbol Name und Speicherort der erstellten *.hdf-Datei gewählt werden, welche HEC-RAS anhand der Daten erstellt. (HEC, 2022e)

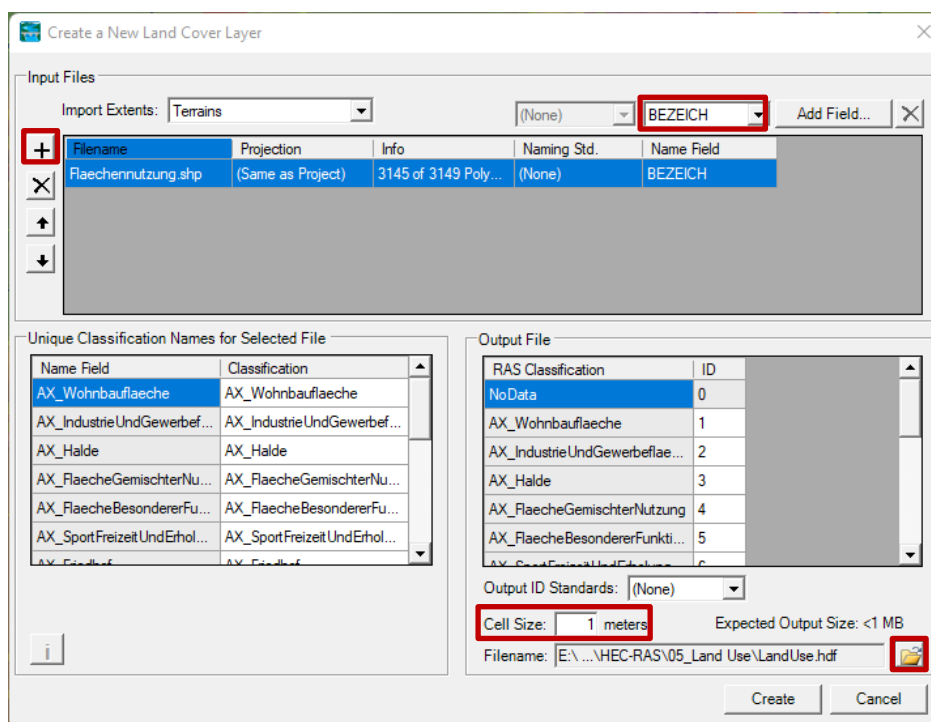


Abbildung 5-2: Importieren von Landnutzungsdaten zur Erstellung eines Landbedeckungslayers

Im Beispielprojekt stehen Vektordaten zur Flächennutzung zur Verfügung, welche importiert werden, um den *Land Cover Layer* zu erstellen. Es wird mit einer Zellgröße von 1 m dieselbe Rasterauflösung wie für das DGM gewählt. Jedoch kann besonders im Falle des Imports von *.shp-Dateien auch eine feinere Zellgröße verwendet werden. Die *.hdf-Datei wird unter „05_Land Use“ abgelegt.

2. Sind keine Daten zur Landnutzung vorhanden, wird der Landbedeckungslayer per Rechtsklick auf *Map Layers* über den Pfad *Create an Empty RAS Layer – Land Cover Layer* manuell erstellt. Ab Version 6.3.1 wird auch für einen leeren Layer der Pfad *Map Layers – Create a New RAS Layer – Land Cover Layer* gewählt und anschließend die Schaltfläche *Create Empty* ausgewählt. Nach der Benennung des Layers können im Unterlayer *Classification Polygons* Polygone zur Landnutzung gezeichnet oder importiert werden. Derselbe Unterlayer existiert ebenso bei Landbedeckungslayern, die durch importierte Daten erstellt wurden. Auch hier können zusätzlich zur schon vorhandenen Rasterdatei Polygone im Unterlayer *Classification Polygons* zur genaueren Landnutzungs klassifikation gezeichnet oder importiert werden (s. Abschnitt 4.3). Ist die Erstellung eines Polygons abgeschlossen, öffnet sich das in Abbildung 5-3 dargestellte Fenster. Das gezeichnete Polygon kann im Dropdown Menü hinter *Classification Name* einer Landnutzung zugeordnet werden. Existiert die jeweilige Landnutzung noch nicht, kann sie im Feld des Dropdown Menüs neu benannt werden. Bei importierten Polygonen wird das Fenster zur Zuordnung einer Landbedeckungsklassifikation mittels Rechtsklick auf das Polygon und Auswahl von *Edit Classification Value* geöffnet. Die Polygone haben eine höhere Priorität als die Rasterdatei und ersetzen deren Klassifikationen an den jeweiligen Stellen. Dieses Vorgehen ist besonders sinnvoll, wenn die Rasterauflösung in relevanten Bereichen wie dem Gewässerbett oder den Uferbereichen nicht fein genug ist. Es besteht weiterhin die Möglichkeit, Landnutzungsdaten in Form von *.shp-Dateien hier gänzlich zu importieren. (HEC, 2022e)

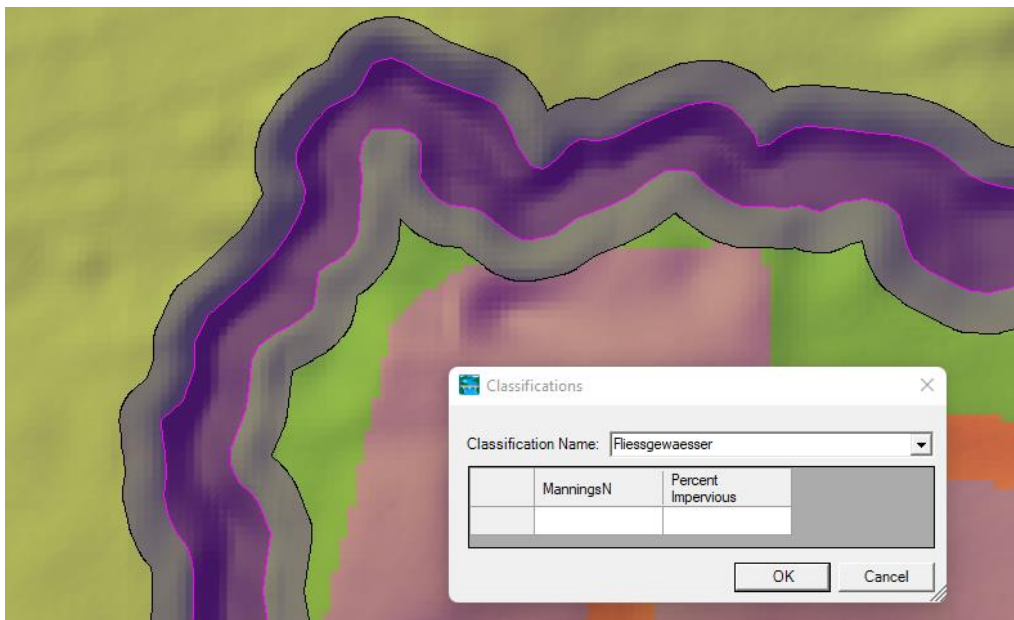


Abbildung 5-3: Zuordnung von Polygonen zu Klassen der Landbedeckung

3. Wurde mittels einer der beiden ersten Methoden bereits ein Landnutzungslayer erstellt, kann dieser per Rechtsklick auf *Map Layers* über die Option *Add an Existing RAS Layer – RAS Classification Layer* erneut hinzugefügt werden.

In diesem Beispiel werden zwecks Verfeinerung der Rasterinformation Polygone für eine genauere Darstellung des Gewässerlaufs und der Uferbereiche definiert (s. Abbildung 5-3). Dazu wird das Polygon des Gewässerlaufs um eine konstante Uferbreite von 5 m, die anhand des Luftbildes ermittelt wurde, gepuffert (z. B. über *Tools – Buffer*, s. Abschnitt 4.3 oder in einer GIS-Software). Werden die Polygone importiert, muss beachtet werden, dass HEC-RAS nur Polygone importieren kann, die eine eindeutige Umrandung haben und keine Aussparungen besitzen.

5.3 Rauheitsbeiwerte

Rauheitsbeiwerte werden in HEC-RAS als n-Werte nach Manning angegeben (HEC, 2022e). Diese Manning's-n-Werte sind für eine Simulation besonders relevant, da dies die Stellschrauben sind, die bei einer Kalibrierung verändert werden und somit für die Richtigkeit einer Simulation sorgen (HEC, 2022g). Rauheitsbeiwerte können nur definiert werden, wenn bereits Klassifikationen eines Landbedeckungslayers existieren, denen sie zugeordnet werden können (HEC, 2022e). Der Manning's-n-Wert [s/ m^{1/3}] ist der Kehrwert des k_{St}-Wertes [m^{1/3}/s] (Zanke, 2013):

$$n = \frac{1}{k_{St}} \quad (5-1)$$

Die den Landbedeckungen zugeordneten n-Werte können im Fenster, welches in Abbildung 5-3 abgebildet ist, direkt angegeben werden. Alternativ können die Rauheitsbeiwerte in der Tabelle aller Landnutzungen gesammelt eingesehen bzw. definiert werden. Diese kann über Rechtsklick auf den *Land Cover Layer* und Auswahl von *Edit Land Cover Data Table* abgerufen werden. Für nicht zugewiesene Flächen greift HEC-RAS auf den Wert zurück, welcher in der Zeile „NoData“ hinterlegt ist. (HEC, 2022e)

Im Beispielprojekt werden die in Tabelle 5-1 dargestellten Rauheitsbeiwerte verwendet, welche dem „HEC-RAS Hydraulic Reference Manual“ entnommen wurden (HEC, 2022g, p. 117).

Tabelle 5-1: Klassifikationen der Landbedeckung im Beispielprojekt mit Rauheitsbeiwerten (HEC, 2022g, p. 117)

Landbedeckung	Manning's-n-Wert	Zuweisung Wert aus „HEC-RAS Hydraulic Reference Manual“
NoData	0,040	A. 2. b. 3.
Wohnbauflaeche	0,035	A. 2. a. 2.
IndustrieUndGewerbeflaeche	0,020	B. 3. a.
Halde	0,050	A. 2. c. 1.
FlaecheGemischterNutzung	0,035	A. 2. a. 2.
FlaecheBesondererFunktionalerPraegung	0,035	A. 2. a. 2.
SportFreizeitUndErholungsflaeche	0,030	A. 2. a. 1.
Friedhof	0,035	A. 2. a. 2.
Landwirtschaft	0,040	A. 2. b. 3.
Wald	0,100	A. 2. d. 3.
Gehoelz	0,050	A. 2. c. 1.
UmlandVegetationsloseFlaeche	0,050	A. 2. c. 1.
Strassenverkehr	0,016	B. 6. b.

Weg	0,020	B. 3. a.
Platz	0,016	B. 6. b.
Bahnverkehr	0,050	A. 3. b.
Fliessgewaesser	0,035	A. 1. b.
StehendesGewaesser	0,030	A. 1. a.
Ufer	0,070	A. 2. c. 4.

Die zweite Spalte der Klassifikationstabelle, welche die Undurchlässigkeit einer Landbedeckung angibt (englisch: *Percent Impervious*), ist optional zu füllen (s. Abschnitt 5.4.3). Wenn keine Simulation von Infiltration durchgeführt werden soll, kann die Spalte gänzlich leer gelassen werden.

5.4 Versickerung

Um in HEC-RAS Versickerung zu simulieren, kann im Bereich *Map Layers* ein *Infiltration Layer* erstellt werden, welcher die Berechnungsmethode und die flächenabhängigen Werte der Infiltration festlegt (HEC, 2022e). Dieser kann abhängig von der Bodenart erstellt werden. Im Folgenden wird daher zunächst auf den Layer zu Bodenklassifizierung sowie die Berechnungsmethoden eingegangen.

5.4.1 Bodenklassifizierung

Der Layer zu Klassifizierung von Böden (englisch: *Soils Layer*) wird analog zur Erstellung des Landbedeckungslayers generiert.

- Sind Raster- oder Vektordaten vorhanden, aus denen der Layer erstellt werden soll, wird per Rechtsklick auf *Map Layers – Create a New RAS Layer – Soils Layer* gewählt. Anschließend werden die Daten in einem Fenster analog zu Abbildung 5-2 importiert.
- Sind keine Daten vorhanden, wird ein leerer Layer erstellt, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, und anschließend Polygone gezeichnet, denen eine bestimmte Bodenklasse zugeordnet werden kann.
- Ist bereits ein Layer erstellt worden, kann dieser per Rechtsklick auf *Map Layers – Add an Existing RAS Layer – RAS Classification Layer* hinzugefügt werden.

(HEC, 2022e)

In dem vorliegenden Beispiel sind keine Daten zur Bodenklassifizierung vorhanden, weshalb ein leerer *Soils Layer* erstellt und mittels *Classification Polygons* gefüllt wird. Dieser wird „Soil“ genannt und unter „05_Land Use“ gespeichert. Für das gesamte betrachtete Gebiet steht „Braunerde aus Mergelgesteinen und kalkhaltigen Schottern“ an (BfG, 2022), (Düwel, et al., 2007). In diesem Beispiel wird nach dem SCS-Verfahren (*Soil Conservation Service*) vorgegangen (s. Abschnitt 5.4.2), weshalb der genannte Boden einer Bodenklasse zugeordnet wird, in diesem Fall der Bodenklasse C mit einer geringen Wasserdurchlässigkeit (RP Freiburg LGRB, 2022), (Patt & Jüpner, 2020). Um dies in HEC-RAS zu übertragen, wird ein Polygon gezeichnet, welches das gesamte betrachtete Gebiet abdeckt und anschließend per Rechtsklick auf das Feature und Auswahl von *Edit Classification Value* für *Classification Name* „C“ eingegeben (analog zu Abbildung 5-3).

Die Bodenklassen nach dem SCS-Verfahren werden wie folgt zugeordnet:

- A: Großes Versickerungsvermögen (tiefe Schicht aus Kies, Sand oder Löss)
 - B: Mittleres Versickerungsvermögen (mäßig tiefe Böden aus Sand, Löss oder lehmigem Sand)
 - C: Geringes Versickerungsvermögen (Lehmböden, flache Böden aus sandigem Lehm, Böden mit wasserstauer Schicht, geringem Organikanteil oder hohem Tonanteil)
 - D: Sehr geringes Versickerungsvermögen (Tonböden, Böden mit undurchlässigen Schichten, schwellfähige Böden, Böden mit hohem anstehendem Grundwasser)
- (Patt & Jüpner, 2020), (HEC, 2022g)

5.4.2 Berechnungsmethoden der Infiltration

Der *Infiltration* Layer beinhaltet nicht nur Flächen mit unterschiedlichen Infiltrationseigenschaften, sondern gibt auch das Berechnungsverfahren der Infiltration vor. Es kann hierbei aus drei verschiedenen Verfahren gewählt werden, die im Folgenden vorgestellt werden. An dieser Stelle wird nur ein Überblick über die Methoden gegeben. Eine detaillierte Darstellung der Berechnungen ist im „HEC-RAS Hydraulic Reference Manual“ zu finden (HEC, 2022g).

Deficit and Constant

Die Grundannahme des *Deficit and Constant* Modells basiert auf einer Bilanzgleichung der Bodenfeuchte, welche in Gleichung (5-2) dargestellt ist. Es wird eine einzelne Bodenschicht mit einer gleichmäßigen Feuchtigkeitsverteilung angenommen. (HEC, 2022g)

$$\frac{dD}{dt} = E_v - f + s_p \quad (5-2)$$

Im Bilanzmodell ist D [mm] das Feuchtigkeitsdefizit des Bodens, E_v [mm/hr] die Evapotranspirationsrate, f [mm/hr] die Infiltrationsrate sowie s_p [mm/hr] die Versickerungsrate. Ist die Bodenschicht nicht vollständig gesättigt (also $D > 0$), infiltriert jeglicher Niederschlag gänzlich in den Boden. Während dieser Zeit versickert kein Wasser in tiefere Bodenschichten. Ist der Boden gesättigt (also $D = 0$), versickert Wasser und die Differenz zwischen Versickerung und Niederschlagsereignis, sollte dieses größer sein als die Versickerungsrate, fließt als Oberflächenabfluss ab. Zudem wird das Feuchtigkeitsdefizit des Bodens durch Evapotranspiration vergrößert. Wird keine Zeitreihe der Evapotranspiration angegeben, wird dem Boden keine Feuchtigkeit entzogen. Bei der Nutzung des *Deficit and Constant* Modells besteht die Gefahr, dass die Infiltration besonders bei kleinen Regenereignissen unrealistisch groß angenommen wird. (HEC, 2022e), (HEC, 2022g)

Die folgenden Parameter müssen für jede Flächenart des Infiltrationslayers, welcher auf dem *Deficit and Constant* Modell basiert, angegeben werden:

- Maximales Bodenfeuchtedefizit [mm]
- Anfängliches Bodenfeuchtedefizit [mm]
- Potenzielle Versickerungsrate [mm/hr]

(HEC, 2022e)

SCS Curve Number

Auch das SCS-Verfahren, welches nach seinen Entwicklern, dem *Soil Conservation Service* der USA, benannt wurde, beruht auf einer Bilanzgleichung. Nach dieser Bilanzgleichung (s. Gleichung (5-3)) bildet sich der Gesamtniederschlag N [mm] aus dem Anfangsverlust N_{Anf} [mm] (durch Benetzung/Mulden), dem Versickerungsanteil N_V [mm] und dem Abflussanteil N_A [mm]. (Patt & Jüpner, 2020)

$$N = N_{Anf} + N_V + N_A \quad (5-3)$$

Der Gesamtniederschlag muss in einer Niederschlagszeitreihe wiedergegeben werden. Der Oberflächenabfluss, hier bezeichnet als Niederschlagsüberschuss P_e [mm] (englisch: *Precipitation excess*), wird in HEC-RAS anhand von Gleichung (5-4) berechnet. Dabei ist P [mm] die Gesamtniederschlagshöhe (englisch: *Precipitation depth*), I_a [mm] die Anfangsentnahme (englisch: *Initial abstraction*) und S [mm] der Bodenrückhalt (englisch: *Soil retention*). (HEC, 2022g)

$$P_e = \begin{cases} 0 & \text{für } P < I_a \\ \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} & \text{sonst} \end{cases} \quad (5-4)$$

Der Bodenrückhalt S hängt wiederum von der *Curve Number* (CN) [-] ab, die für unterschiedliche Bodentypen und Bodennutzungen variiert und in Tabellen z. B. im „HEC-RAS Hydraulic Reference Manual“ nachgeschlagen werden kann. Der CN-Wert liegt zwischen 0 und 100, wobei niedrige Zahlen eine hohe Durchlässigkeit wiedergeben und hohe Werte eine niedrige Durchlässigkeit repräsentieren. Die Berechnung des Bodenrückhalts geschieht nach Gleichung (5-5). Eine Gefahr bei der Nutzung dieses Verfahrens ist, dass die Infiltration besonders bei großen Regenereignissen zu klein angenommen wird. (Patt & Jüpner, 2020), (HEC, 2022g)

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (5-5)$$

Zudem wird in HEC-RAS die Anfangsentnahme I_a im Verhältnis zum Bodenrückhalt S nach Gleichung (5-6) mit der anfängliche Entnahmerate r [-] berechnet. (HEC, 2022g)

$$I_a = r \cdot S \quad (5-6)$$

Die folgenden Parameter müssen für jede Flächenart des Infiltrationslayers, welcher auf dem SCS-Verfahren basiert, angegeben werden:

- *Curve Number* CN [-]
 - Anfängliche Entnahmerate r (Empfehlung: 0,05 – 0,2) [-]
 - Minimale Infiltrationsrate pro Zelle (optional) [mm/hr]
- (HEC, 2022e)

Green and Ampt

Das Verfahren zur Infiltrationsberechnung nach Green und Ampt ist für Infiltrationssimulationen ausgelegt. Grundlage hierfür ist das Filtergesetz nach Darcy (Patt & Jüpner, 2020). Annahmen des Verfahrens sind ein homogener Boden mit konstantem, anfänglichem Bodenwassergehalt und konstanter hydraulischer Leitfähigkeit. Im Falle der Infiltration wird von einer konstanten Benetzungsfront ausgegangen, die sich horizontal abwärts bewegt. Nach dem Verfahren von Green und Ampt wird die potenzielle Infiltration f_* [mm/hr] wie folgt berechnet: (HEC, 2022g)

$$f_* = K_s \cdot \left(1 + \frac{\Psi \cdot \theta_d}{F}\right) \quad (5-7)$$

Hierbei ist K_s [mm/hr] die hydraulische Leitfähigkeit des gesättigten Bodens, Ψ [mm] die gemittelte Saugwirkung an der Benetzungsfront und θ_d [-] das Bodenfeuchtedefizit. F [mm] stellt die akkumulierte Infiltration dar. Für den Fall, dass die Niederschlagsintensität R [mm/hr] geringer ist als die potenzielle Infiltration f_* , ist die tatsächliche Infiltrationsrate $f = R$. Andernfalls ist $f = f_*$. (HEC, 2022g)

Die folgenden Parameter müssen für jede Flächenart des Infiltrationslayers, welcher auf dem *Green and Ampt* Verfahren basiert, angegeben werden:

- Saugwirkung der Benetzungsfront Ψ [mm]
 - Hydraulische Leitfähigkeit für gesättigten Boden K_s [mm/hr]
 - Anfänglicher Bodenwassergehalt [-]
 - Bodenwassergehalt für gesättigten Boden [-]
 - Restwassergehalt im Boden (optional für Wiederherstellung nach Regenereignis) [-]
 - Verteilungsindex der Porengröße (optional für Wiederherstellung nach Regenereignis) [-]
- (HEC, 2022e)

5.4.3 Infiltrationslayer

Der *Infiltration* Layer kann basierend auf verschiedenen anderen Layern erstellt werden:

- einem *Land Cover* Layer (s. Abschnitt 5.2)
 - einem *Soils* Layer (s. Abschnitt 5.4.1)
 - einer Kombination aus *Land Cover* und *Soils* Layer
 - oder basierend auf *Classification Polygons* innerhalb eines *Infiltration* Layers
- (HEC, 2022e)

Für die ersten drei Optionen wird per Rechtsklick auf *Map Layers – Create a New RAS Layer – Infiltration From Land Cover / Soils Layer* ausgewählt. Das sich öffnende Fenster ist in Abbildung 5-4 dargestellt. Im ersten Dropdown Menü wird die gewünschte Berechnungsmethode gewählt. In den beiden Dropdown Menüs darunter werden die zugrundeliegenden Layer gewählt. Es kann entweder nur ein *Land Cover* Layer, nur ein *Soils* Layer oder beides gewählt werden. Die Angabe darunter ist optional und nur für die SCS-Methode verfügbar. Hier kann angegeben werden, ab welcher Zeit nach einem Regenereignis, die Anfangsbedingungen eines Bodens wiederhergestellt werden sollen, da das SCS-Verfahren für einzelne Regenereignisse ausgelegt ist. Zuletzt kann der Speicherort und der Dateiname gewählt werden. (HEC, 2022e)

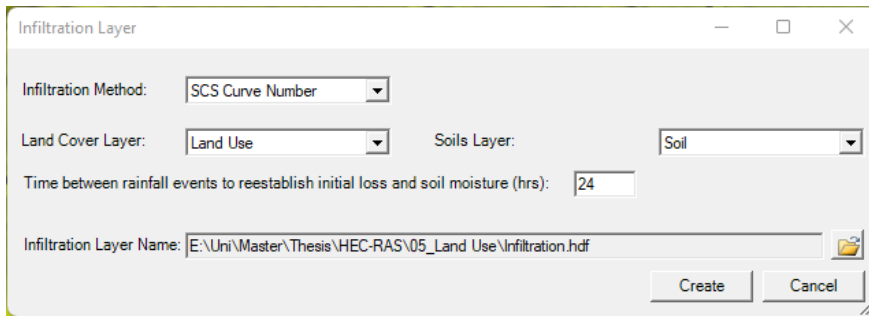


Abbildung 5-4: Erstellen eines Infiltrationslayers aus Landbedeckungs- und Bodenlayer

Soll ein Infiltrationslayer anhand von bestehen *.shp-Dateien erstellt werden, wird per Rechtsklick auf *Map Layers – Create a New RAS Layer – Infiltration Layer From Shapefile* gewählt und die gewünschte Berechnungsmethode angegeben. Hier können nach dem bekannten Verfahren Polygone importiert und einer definierten Infiltrationsfläche zugeordnet werden bzw. eine solche neu benennen. (HEC, 2022e)

Per Rechtsklick auf einen bestehenden Infiltrationslayer und Auswahl von *Edit Infiltration Data Table*, können nun die benötigten Parameter je nach Berechnungsmethode für jede mögliche Flächenkombination eingegeben werden (s. Abbildung 5-5). Wurde nur ein Layer bei der Erstellung als Grundlage ausgewählt, werden hier die Flächen dieses Layers aufgelistet. Wurden Landbedeckungs- und Bodenlayer gewählt, werden hier alle möglichen Flächenkombinationen der beiden Layer aufgelistet. Es entsteht eine Karte von Flächen mit unterschiedlichen Infiltrationseigenschaften, wie sie exemplarisch in Abbildung 5-5 zu sehen ist. (HEC, 2022e)

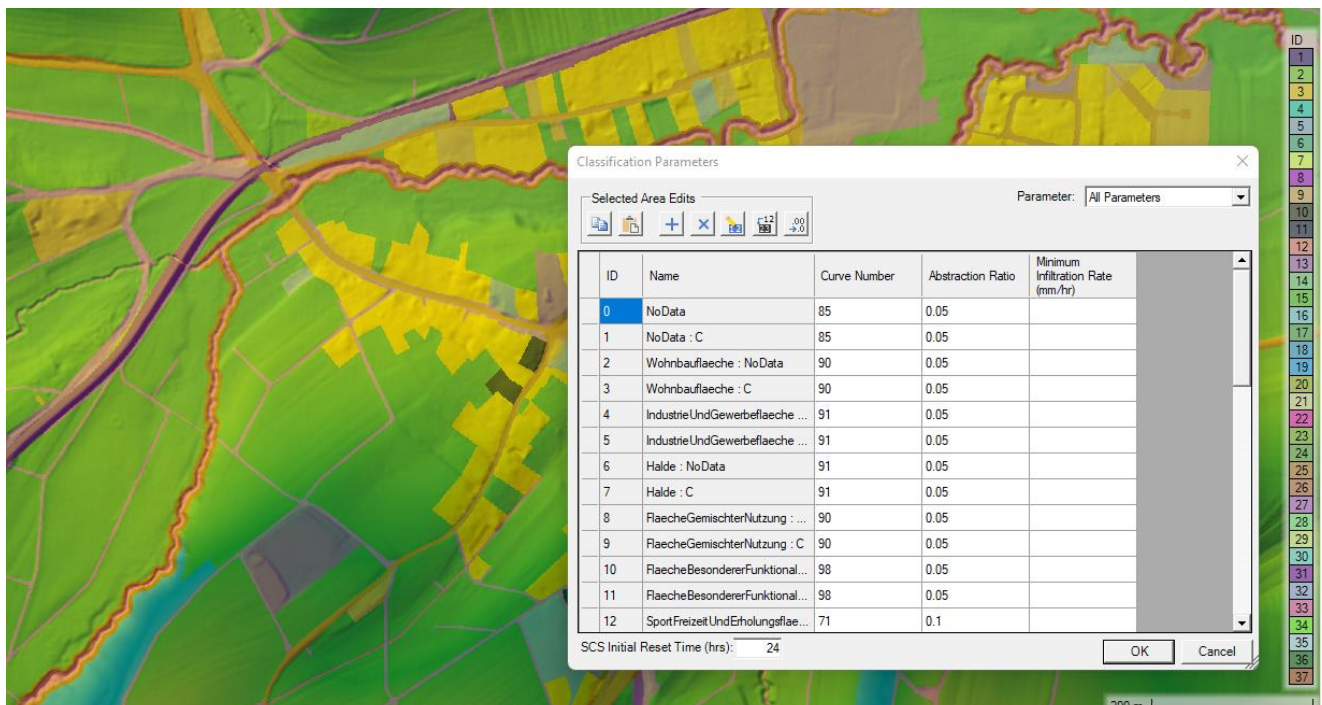


Abbildung 5-5: Zuordnung von Infiltrationsparametern zu verschiedenen Flächenkombinationen

Es besteht zudem die Möglichkeit, in der Tabelle der Landbedeckung (s. Abbildung 5-3, *Percent Impervious*) einen Wert für die Undurchlässigkeit von Flächen anzugeben. Wird diese Möglichkeit

zusätzlich zu den im Infiltrationslayer angegebenen Durchlässigkeitseigenschaften der Böden genutzt, wird folgendes Vorgehen empfohlen: (HEC, 2022e)

- Werden beide Eingabemöglichkeiten genutzt, sollten die CN-Werte im Infiltrationslayer nur die durchlässigen Flächen darstellen. Undurchlässige Flächen sollten über die Spalte *Percent Impervious* im Landbedeckungslayer angegeben werden. Auf diese Weise treten keine Verluste auf und es erfolgt direkt Oberflächenabfluss.
- Wird die Spalte *Percent Impervious* im Landbedeckungslayer nicht genutzt, können alle Flächentypen der Infiltration über CN-Werte definiert werden.

(HEC, 2022e)

Im Beispielprojekt wird als Berechnungsverfahren das SCS-Verfahren für die Infiltration gewählt und der Infiltrationslayer basierend dem Landnutzungs- und Bodenschicht erstellt. Die in Tabelle 5-2 aufgeführten Parameter für die verschiedenen Flächen werden für die Infiltrationsberechnung verwendet. Die Werte basieren auf den Angaben, welche im „HEC-RAS 2D User's Manual“ (HEC, 2022e, pp. 42-44) sowie im „Hochwasser-Handbuch“ (Patt & Jüpner, 2020, p. 42) zu finden sind. Allen Flächenkombinationen mit „NoData“ werden dieselben Werte zugewiesen, wie ihrem Pendant mit Bodentyp C, da diese Flächen ohnehin im Untersuchungsgebiet nicht vorkommen. Den Flächen für Gewässer wird ein CN-Wert von 100 zugeordnet, da in diesen Bereichen nur Oberflächenabfluss und keine Infiltration stattfinden soll (HEC RAS, 2022a). Die Möglichkeit der Angabe von *Percent Impervious* Werten im Landbedeckungslayer wird nicht genutzt.

Tabelle 5-2: Klassifikationen der Infiltrationsflächen im Beispielprojekt mit zugewiesenen Parametern

Infiltrationsflächen	<i>Curve Number</i>	<i>Abstraction Ration</i>
NoData : C	85	0,05
Wohnbauflaeche : C	90	0,05
IndustrieUndGewerbeflaeche : C	91	0,05
Halde : C	91	0,05
FlaecheGemischterNutzung : C	90	0,05
FlaecheBesondererFunktionalerPraegung : C	98	0,05
SportFreizeitUndErholungsflaeche : C	71	0,1
Friedhof : C	71	0,1
Landwirtschaft : C	84	0,15
Wald : C	73	0,2
Gehoelz : C	77	0,2
UmlandVegetationsloseFlaeche : C	91	0,15
Strassenverkehr : C	98	0,05
Weg : C	87	0,05
Platz : C	98	0,05
Bahnverkehr : C	89	0,05
Fliessgewaesser : C	100	0,0
StehendesGewaesser : C	100	0,0
Ufer : C	98	0,1

6 Gewässerlaufmodellierung im Geländemodell

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Geländemodellerstellung eines HEC-RAS Projektes im *RAS-Mapper* sowie im *Geometric Data* Fenster behandelt. Es wird auf die Gewässerlaufmodellierung, also die Abbildung der Bathymetrie eines Flusses, sowie weitere Geländemanipulationen eingegangen. Bei der Erstellung eines DGM mittels *Airborne Laserscanning* (ALS) werden die Laserstrahlen von der Wasseroberfläche reflektiert, weshalb das Gewässerbett im DGM zunächst nicht abgebildet ist (Mandlbürger, et al., 2009). Der Gewässerlauf ist demnach in einer Nachbearbeitung zu ergänzen. Zudem ist es möglich, dass die Auflösung des Rasters in den relevanten Bereichen nicht ausreicht oder die Geländedarstellung nicht aktuell ist. In diesem Fall ist eine anschließende Aufbereitung des DGM anhand von weiteren, feiner aufgelösten Vermessungsdaten notwendig. Im folgenden Kapitel wird die Einarbeitung von Gewässerlauf, Gebäuden und ähnlicher Strukturen in das bestehende DGM erläutert.

Für das verwendete Beispielprojekt ist ein DGM mit einer Rasterweite von 1 m vorhanden. Zur Gewässerlaufgenerierung stehen zusätzliche Vermessungen von Gewässerprofilen in regelmäßigen Abständen zur Verfügung. Zudem ist das vorhandene DGM so aufbereitet, dass Bewuchs und Gebäude entfernt wurden. Letztere werden jedoch im Modell wieder abgebildet. (Blasy & Øverland, 2012)

6.1 Geometriedaten bearbeiten

Als erster Schritt wird im *RAS-Mapper* über Rechtsklick auf *Geometries – Add New Geometry* ein neuer Layer für die Geometriedaten des Flusses erstellt. Da im weiteren Verlauf noch anderen Geometrielayer ergänzt werden, ist eine eindeutige Benennung zu empfehlen. In dieser Geometriedatei werden anschließend alle nötigen Features gezeichnet oder importiert, die nötig sind, um einen Gewässerlauf zu generieren.

Das Grundprinzip der Gewässerlaufmodellierung wird im Folgenden kurz erläutert. In Abbildung 6-1 ist das von HEC-RAS erzeugte Netz zu sehen, anhand dessen der Gewässerlauf interpoliert wird. Die Interpolation erfolgt zwischen Querprofilen (englisch: *Cross Sections*), für die durch den Nutzer Höheninformationen vorgegeben werden und die in Abbildung 6-1 in Grün dargestellt sind. Die Interpolation folgt der Gewässermittellinie (englisch: *River Centerline*), die in Abbildung 6-1 in Blau gezeichnet ist. Zusätzlich zeichnet der Nutzer Uferlinien (englisch: *Bank Lines*), welche in Abbildung 6-1 in Rot gekennzeichnet sind. HEC-RAS erzeugt anschließend ein Berechnungsnetz (s. Abbildung 6-1, schwarze Linien), das die Enden der Querprofilen verbindet und sich an der Ausrichtung und Lage der Gewässermittellinie und der Uferlinien orientiert. Der Nutzer hat zur Erstellung des Gewässerlaufs zwei Möglichkeiten. Es kann ein interpoliertes Gelände innerhalb des gesamten Berechnungsnetzes oder nur innerhalb der beiden Uferlinien erzeugt werden. (HEC, 2022f)

In diesem Beispiel wird der Name „Erzingen - River“ für die Geometriedatei gewählt, da dieser Layer ausschließlich genutzt wird, um einen Gewässerlauf zu erstellen. Das Gelände wird nur innerhalb der Uferlinien interpoliert, da die Dichte der Vermessungspunkte insbesondere außerhalb des Gewässerlaufs nicht hoch genug ist, um einen guten Übergang zum umliegenden DGM zu gewährleisten. So werden die Uferbereiche und das Umland präziser dargestellt, als es eine Interpolation könnte.

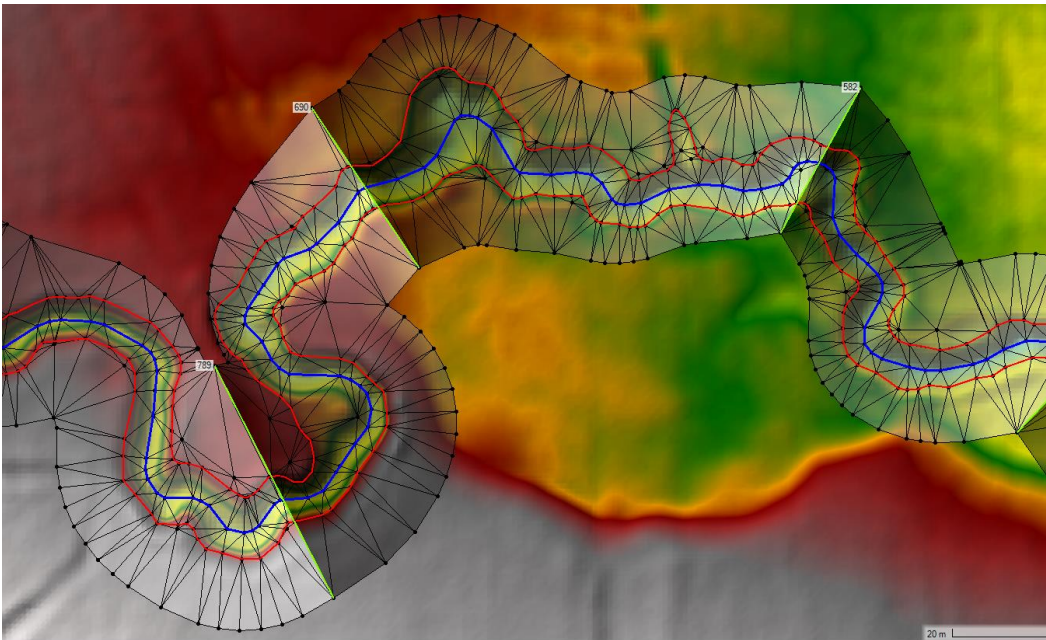


Abbildung 6-1: Berechnungsnetz zur Interpolation eines Gewässerlaufs

6.1.1 Flussverlauf

Als erster Schritt wird innerhalb des Geometrielayers eine Gewässermittellinie gezeichnet oder importiert. Dazu wird die Bearbeitung des Geometrielayers über Rechtsklick und Auswahl von *Edit Geometry* aktiviert und für die Erstellung des Gewässerlaufs der Layer *River* ausgewählt. Das Zeichnen und Bearbeiten von Gewässermittellinien erfolgt analog zum Zeichnen von Polygonen (s. Abschnitt 5.2). Die Gewässermittellinie muss stromabwärts gezeichnet werden. Das Zeichnen des Verlaufes des Flusses geschieht optisch anhand eines Luftbildes oder einer Onlinekarte. Wird die Bearbeitung einer *River* Linie beendet, öffnet sich ein Fenster zur Eingabe des *River Name* (deutsch: Gewässername) sowie des *Reach Name* (deutsch: Name des Gewässerabschnitts). Diese sollten eingängig benannt werden. (The RAS Solution, 2019)

Linien können auch per Rechtsklick auf den Layer und *Import Features From Shapefile* im *.shp-Format importiert werden. Sind importierte Linien nicht stromabwärts gezeichnet, können diese über Auswahl des Werkzeug *Tools – Reverse Feature* umgedreht werden. Die Reihenfolge der Punkte eines Linienfeatures kann per Rechtsklick auf die Linie im Kartenbereich, Auswahl von *View/Edit Points* und Aktivieren von *Zoom To Selected Point* nach Auswahl des ersten oder letzten Punktes eingesehen werden.

Weiterhin ist es möglich, wenn nur ein Gewässerabschnitt betrachtet wird, aber trotzdem die für das Gesamtgewässer geltenden Fließkilometer (englisch: *River Station*) verwendet werden sollen, diese zu definieren. Hierfür wird der Unterlayer *River Station Markers* ausgewählt, ein Punkt gesetzt bzw. importiert und anschließend der Fließkilometer eingegeben. Dies kann hilfreich sein, möchte ein Nutzer im weiteren Verlauf bspw. Querprofile importieren, die einen Bezug zu den globalen Fließkilometern haben. Andernfalls berechnet HEC-RAS die Fließkilometer ausgehend vom Endpunkt der Linie.

Ist die Modifizierung des Geometrielayers vollendet, muss die Bearbeitung des Layers über die *Stop Editing Selected Layer* Schaltfläche beendet werden, bevor ein anderer Layer verändert werden kann.

In dem dargestellten Beispielprojekt wird zunächst nur die Gewässermittellinie des Hauptgewässers Steinach importiert und mit dem *River Name* „Steinach“ und dem *Reach Name* „Erzingen“ benannt.

6.1.2 Einmündungen

Je nach Gebiet ist es notwendig, Einmündungen in Gewässer (englisch: *Junctions*) zu modellieren. Hierfür gibt es in HEC-RAS zwei Methoden: (HEC, 2022f)

- Wird ein zweites Gewässer erstellt, dessen letzter Punkt genau auf dem Lauf des bisherigen Gewässers liegt, dann bildet HEC-RAS die *Junction* automatisch. Dies ist besonders sinnvoll, wenn die beiden Gewässerringen als vorbereitete *.shp-Dateien importiert werden können und der Endpunkt des Zulaufes exakt auf der Linie des Hauptgewässers liegt. Nach dem Import muss dem Aufspalten des Hauptgewässers in zwei Linien (oberhalb und unterhalb der *Junction*) zugestimmt werden (s. Abbildung 6-2 links). Anschließend muss die *Reach* des Unterlaufs und die *Junction* benannt werden.
- Wenn kein exakt anknüpfendes Linienfeature des Zulaufs vorhanden ist, wird die Gewässermittellinie des Zulaufs gezeichnet. Endet diese nah genug am Hauptgewässers, wird erneut automatisch nach dem Aufspalten der Hauptgewässermittellinie gefragt und eine *Junction* erstellt (s. Abbildung 6-2 rechts). Anschließend können die Anfangs- und Endpunkte der Linien auf denselben Punkt gelegt werden, indem aus einer der Punkttabellen (Rechtsklick auf *Feature – View/Edit Points*) der entsprechende Punkt kopiert und in die anderen Tabellen eingefügt wird (s. Abbildung 6-2 rechts).

(HEC, 2022f)



Abbildung 6-2: Optionen zur Erstellung einer Einmündung im *RAS-Mapper*: Links: Automatisch, rechts: Manuell

Auch Zuflüsse, für die keine Vermessungsdaten vorliegen, deren Verlauf also nur durch das bestehende DGM abgebildet werden soll, sollten über eine kurze Gewässermittellinie mittels einer *Junction* mit dem Hauptgewässer verbunden werden. Sollte der Zufluss bei der Erstellung des Gewässerlaufs nicht über eine *Junction* berücksichtigt werden, würde durch die Interpolation entlang des Ufers des Hauptgewässers eine Art „Aufschüttung“ entstehen, sodass der Zufluss nicht nahtlos ins Hauptgewässer übergeht. Dies sollte vermieden werden.

In dem in Abbildung 6-3 dargestellten Beispiel wird nur das Nebengewässer Haugenbach über die erste Option importiert, wodurch die *Junction* automatisch erstellt wird. Die Gewässermittellinie des Haugenbachs reicht bis etwas hinter die Stelle des letzten Vermessungsquerschnittes. Die Linien der Nebengewässer Bontalbach und Riedbach sind, da keinerlei Vermessungsdaten vorliegen, gerade lang genug für einen Übergang zum DGM. Diese letzten beiden Zuflüsse werden über die zweite Option der Erstellung einer *Junction* modelliert, da hier die *River* Linien gezeichnet werden.

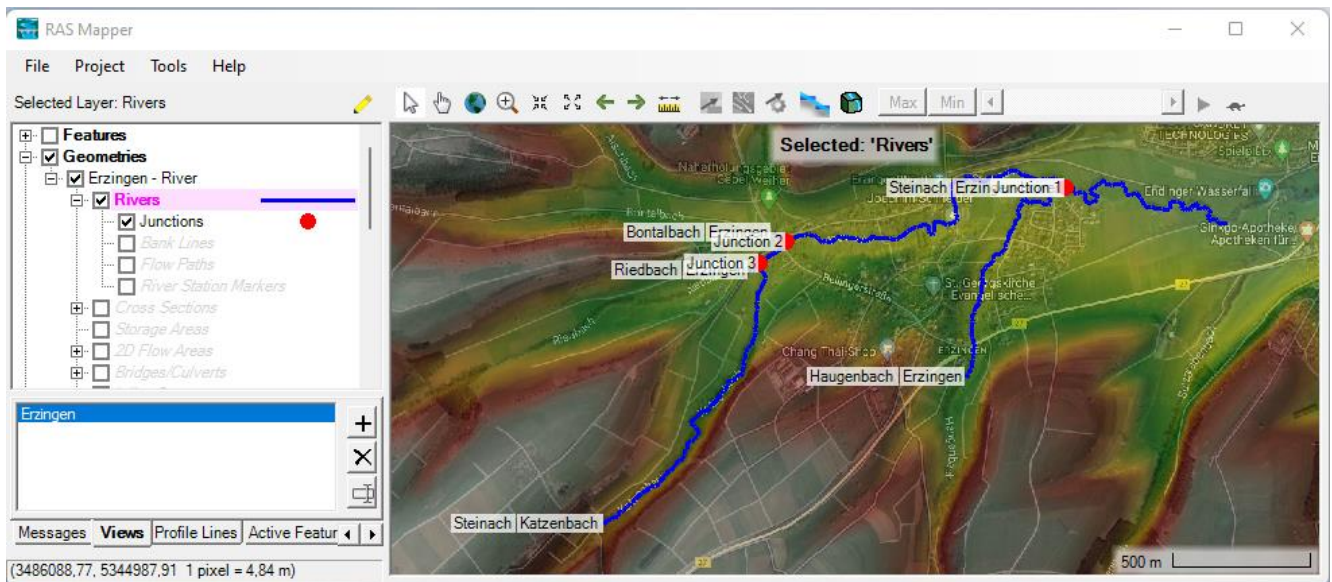


Abbildung 6-3: Erstellte Gewässermittellinien im Beispielprojekt

6.1.3 Uferlinien

Nun werden innerhalb desselben Geometrie Layers links- und rechtsseitig Uferlinien gezeichnet oder importiert. Dazu wird die Bearbeitung aktiviert und der Unterlayer *Bank Lines* (s. Abbildung 6-3 unter *Rivers*) ausgewählt. Im Bearbeitungsmodus können die zu erstellenden Linien analog zum Flussverlauf entweder gezeichnet oder importiert werden. Die *Bank Lines* müssen in dieselbe Richtung wie die Gewässermittellinie also von Ober- nach Unterstrom gezeichnet werden und dürfen diese nicht schneiden. (HEC, 2022f)

An *Junctions* treffen demnach zwei Uferlinien mit unterschiedlichen Richtungen aufeinander. Es kann jedoch zunächst eine durchgehende Uferlinie für Haupt- und Nebengewässer gezeichnet werden, die anschließend an der Einmündung über Rechtsklick und Auswahl von *Split Selected Line* sowie *Tools – Reverse Feature* geteilt und umgedreht wird. Der Verlauf der Uferlinien wird optisch anhand eines Luftbildes (s. Abbildung 6-4 links) oder des Geländes (s. Abbildung 6-4 rechts) abgeschätzt.

- Ist ein Luftbild wie in Abbildung 6-4 links vorhanden, in dem deutlich der Schnittpunkt zwischen Böschung und Wasserspiegel zu erkennen ist, sollte die Uferlinie genau entlang dieses Schnittpunktes gezeichnet werden. Vorteil dieser Methode ist, dass so die Außenkante des Gewässerlaufs entlang des konstanten Wasserspiegelgefälles interpoliert wird. Dasselbe Gefälle findet sich auch im DGM wieder, wodurch sich der Gewässerlauf ohne Höhenversatz in das umliegende DGM einbetten lässt. Diese Methode ist jedoch nur bei breiteren Gewässern ohne viel Ufervegetation möglich.

- Bei schmalen Gewässern ist der Wasserspiegel meist aufgrund von Ufervegetation in Luftbildern nicht sichtbar bzw. der Wasserspiegel aufgrund einer zu niedrigen Auflösung im DGM nicht dargestellt und die Uferlinien müssen anhand des DGM gezeichnet werden. Bei dieser Methode sollte vor allem auf eine einheitliche Höhe bzw. ein einheitliches Gefälle der Uferlinien geachtet werden, damit später kein Höhenversatz entsteht. Zur Hilfe können dazu im Eigenschaften Fenster des Geländemodells unter *Plot Contours* Höhenlinien eingeblendet werden (s. Abschnitt 12.1.1 „Darstellungsoptionen von Layern“). Ob und wie viel Uferbereich innerhalb der *Bank Lines* liegt und somit durch die Gewässerlaufinterpolation mit abgebildet wird, hängt ganz von der Qualität des DGM und der Dichte der Vermessungspunkte ab.

In Abhängigkeit der Geometrie des Gewässers, ist auch die Erstellung der Uferlinien in einem GIS-Programm z. B. durch Buffern um eine konstante Gewässerbreite möglich. Hierbei sollte jedoch im Nachgang die Lage der Linien kontrolliert werden.

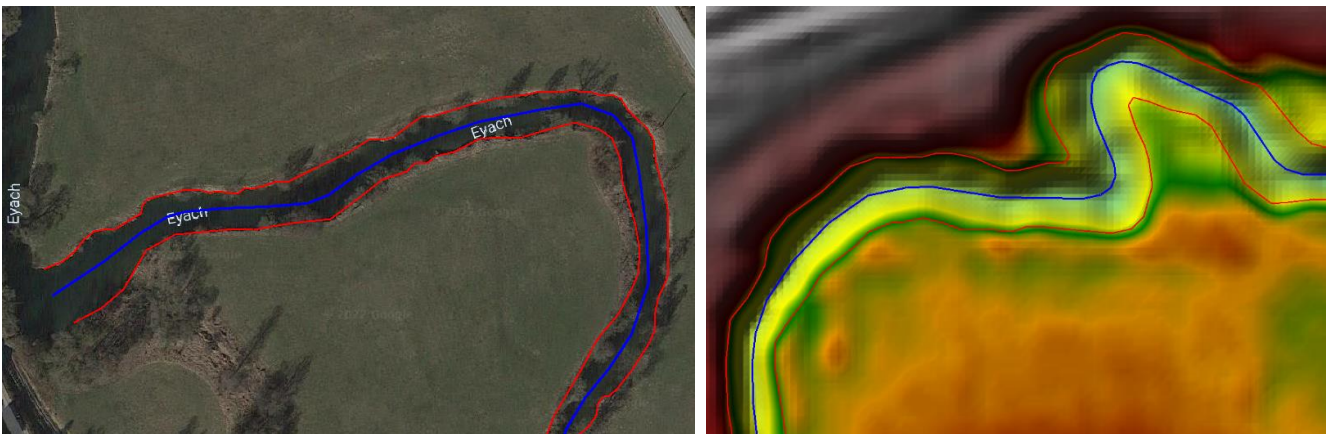


Abbildung 6-4: Methoden des optischen Zeichens der Uferlinien anhand eines Luftbildes (links) oder des Geländes (rechts)

Für das Beispielprojekt werden die Uferlinien anhand des DGM gezeichnet (s. Abbildung 6-4 rechts). Die Uferlinien werden in den oberen Böschungsbereich gelegt. Da diese Uferlinien im Beispielprojekt mehrfach angepasst werden, werden die Versionen je über Rechtsklick auf den Layer *Bank Lines – Export Layer – Save Features to Shapefile* in einem Unterordner „Bank Lines“ von „04_Shapefiles“ gespeichert. So wird ebenso für alle weiteren in HEC-RAS gezeichneten Features verfahren.

6.1.4 Querprofile

Lage der Querprofile im *RAS-Mapper* zeichnen

Der nächste Schritt ist das Erstellen von Querprofilen. Dazu wird analog zum Zeichnen des *Rivers* und der *Bank Lines* der Layer *Cross Sections* bearbeitet. Die *Cross Sections* werden nach Unterstrom schauend von links nach rechts gezeichnet. Zudem müssen die *Cross Sections* alle drei Linien (*River* und beide *Bank Lines*) möglichst im rechten Winkel genau einmal kreuzen. Jede *Cross Section* hat einen eindeutigen Bezug durch die Lage in einer bestimmten *River Reach*, an einem *River* und mit einer eindeutigen *River Station*. (HEC, 2022d), (HEC, 2022f)

Es sollten mindestens dort *Cross Sections* eingefügt werden, wo sich der Querschnitt ändert (vor und nach jeder Querschnittsänderung). Es ist auch möglich, Querprofile in regelmäßigen Abständen durch HEC-RAS automatisch generieren zu lassen. Dies ist im Bearbeitungsmodus des Layers *River* über

Rechtsklick und Auswahl von *Auto-Generate Cross Sections* möglich. Zudem wird der Gewässerlauf nur innerhalb des ersten und letzten Querprofils generiert, was beim Setzen der *Cross Sections* beachtet werden sollte. Demnach müssen für jedes Gewässer mindestens zwei Querprofile vorhanden sein (HEC, 2022f). Zudem ist es sinnvoll, auch wenn Vermessungsdaten vorliegen, am Anfang und am Ende des Gewässerlaufs Querprofile einzuzichnen. Für diese werden die Höheninformationen des DGM übernommen und bilden so beim späteren Interpolieren des Gewässerlaufs einen glatten Übergang zum Gewässerbett, wie es im DGM dargestellt ist.

Höhen der Querprofile im *Geometric Data* Fenster anpassen

Die Bearbeitung der *Cross Sections* erfolgt nicht im *RAS-Mapper* sondern im *Geometric Data* Fenster. Um dieses zu öffnen, darf sich kein Layer im *RAS-Mapper* im Bearbeitungsmodus befinden. Das *Geometric Data* Fenster wird über das HEC-RAS Hauptfenster geöffnet (s. Abbildung 6-5). Die Geometriedaten des Projektes müssen anschließend über *File – Open Geometry Data* geladen werden. Im sich nun öffnenden Fenster kann mit der *Cross Section* Schaltfläche die Bearbeitung der vorher festgelegten Querschnitte aktiviert werden (s. Abbildung 6-6 links). Alle Anpassungen im *Geometric Data* Fenster sollten über *File – Save Geometry Data* gespeichert werden. (HEC, 2022d)

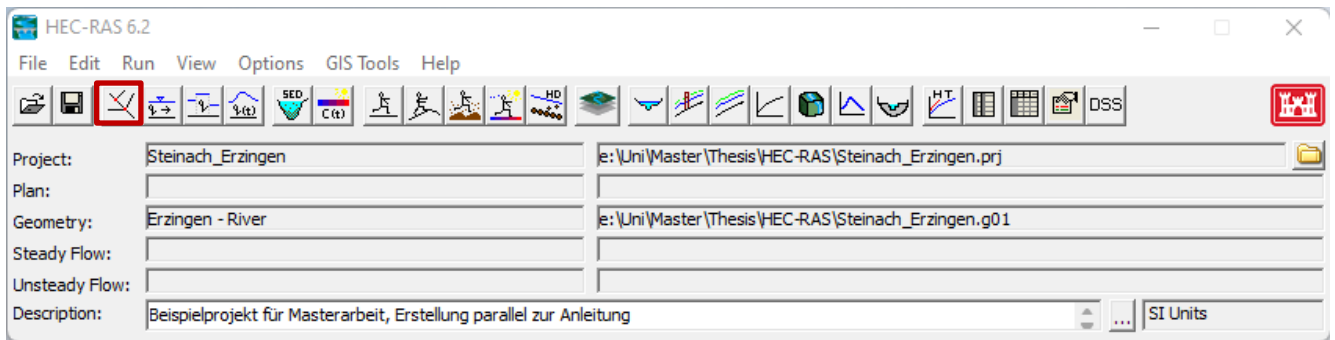


Abbildung 6-5: *Geometric Data* Fenster Schaltfläche im Hauptfenster von HEC-RAS

Die Bearbeitung der Querschnitte ist in zwei Modi möglich:

- Im ersten in Abbildung 6-6 dargestellten Fenster kann mit den Pfeilen zwischen den gezeichneten *Cross Sections* entlang des Gewässerlaufs geblättert werden. Über die Dropdown Menüs kann ein anderer Gewässerabschnitt bzw. ein anderes Gewässer ausgewählt werden. Über die Tabelle können Punkte in das Querprofil eingegeben und gelöscht werden. Es können auch die Höhen der bestehenden Punkte geändert werden. Um diese Änderungen anschließend zu bestätigen, muss auf *Apply Data* geklickt werden. Die entsprechenden Höhenpunkte sind im Bereich rechts grafisch in Schwarz abgebildet. Zudem ist die aktuelle Lage des DGM durch die graue Linie dargestellt. Die Uferpunkte sind in Rot gekennzeichnet. In der Tabelle sind die Uferpunkte durch eine höhere Anzahl an Dezimalstellen bei der Höhenangabe (englisch: *Elevation*) zu erkennen. Die Lage der Uferpunkte entlang der *Cross Section* (s. Abbildung 6-6 x-Achse: *Station*) sollte für ein gutes Interpolationsergebnis nicht oder nur minimal geändert werden. Sinnvoller ist es, bei nicht zufriedenstellender Lage der Uferpunkte, diese zu verschieben, indem die *Bank Lines* im *RAS-Mapper* angepasst werden. Die Höhe der Randpunkte des Interpolationsbereiches sollte jedoch auf dieselbe Höhe wie das umliegende Gelände gelegt werden, damit ein stufenloser Übergang entsteht. Soll nur innerhalb der Uferlinien interpoliert werden, ist es empfehlenswert, die Höhen der Uferpunkte anzupassen. Bezieht sich die Interpolation ebenfalls auf den

Uferbereich, muss die Höhe des ersten und letzten Punktes angepasst werden. (The RAS Solution, 2018b)

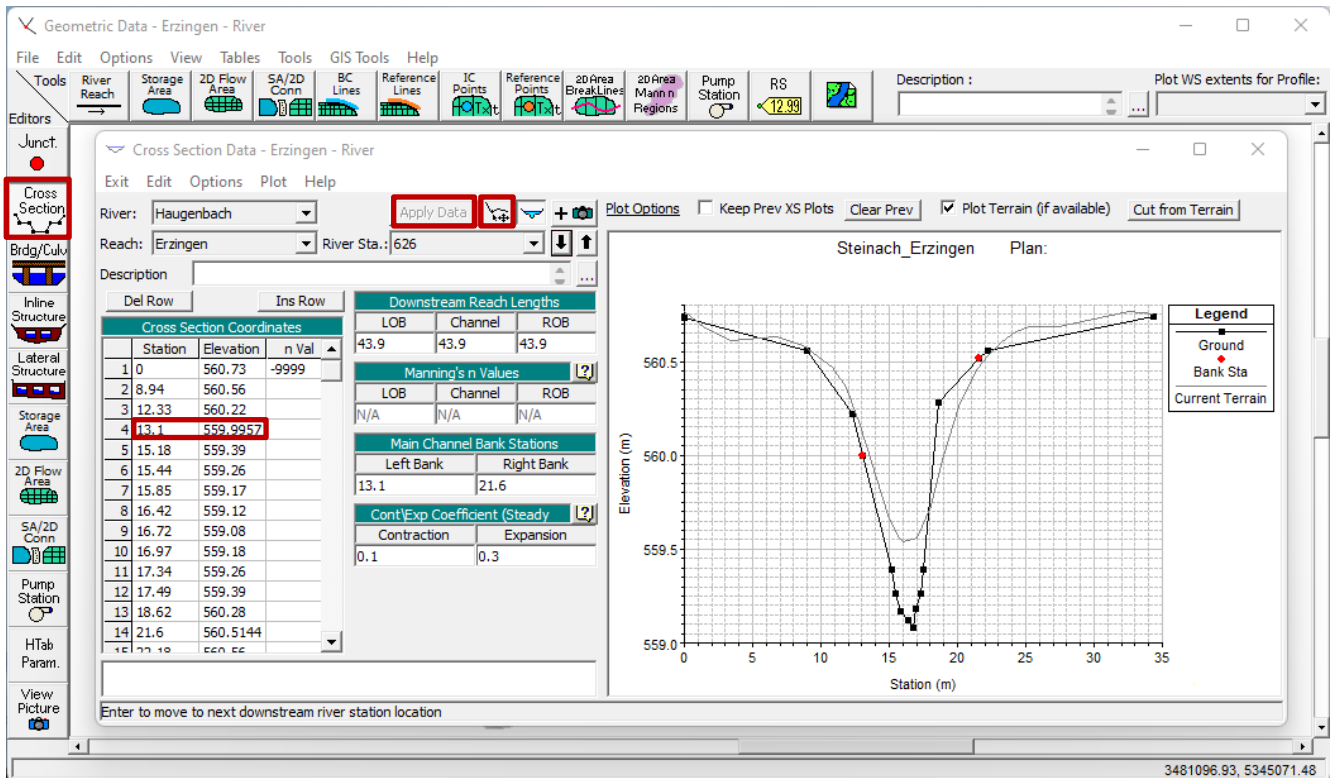


Abbildung 6-6: *Geometric Data* Fenster: Manuelles Bearbeiten von *Cross Sections* (1)

- Der zweite Modus zur Modifizierung der Querschnitte öffnet sich über die markierte Schaltfläche in Abbildung 6-6 (oben neben *Apply Data*). Dieser ist in Abbildung 6-7 zu sehen. Auch hier kann über die Pfeile zwischen den einzelnen *Cross Sections* geblättert werden. In diesem Modus können die Punkte des Querschnittes mit der Maus verschoben werden. Über *Options* oder über Rechtsklick auf den Zeichenbereich können andere Bearbeitungswerkzeuge gewählt werden, wie z. B. Punkte hinzufügen oder löschen. Die roten Punkte, welche die Ufer markieren, können nicht verschoben werden. Soll deren Lage trotzdem verändert werden, müssen die Uferpunkte entweder manuell auf andere Punkte gelegt werden oder über die Schaltflächen oberhalb der Grafik verschoben werden. Der Wechsel in den vorherigen Bearbeitungsmodus ist über die markierte Schaltfläche möglich (s. Abbildung 6-7). (The RAS Solution, 2018b)

Diese Methode der manuellen Geländeanpassung ist sinnvoll, wenn keine oder nur sehr wenige Vermessungspunkte vorliegen oder bspw. nur einzelne Höhenlagen oder Wassertiefen vorhanden sind. Diese können ohne viel Aufwand in die Tabelle kopiert oder manuell eingetragen werden. Liegen viele Vermessungsprofile vor, bietet es sich an, diese zu importieren, da sonst das manuelle Übertragen zu zeitaufwändig ist. In beiden Fällen ist zu beachten, dass durch Änderungen der in beiden Modi dargestellten Höhen lediglich die Geometriedatei bearbeitet wird, nicht jedoch das zugrundeliegende *Terrain*. Dies erfolgt erst in Abschnitt 6.2.

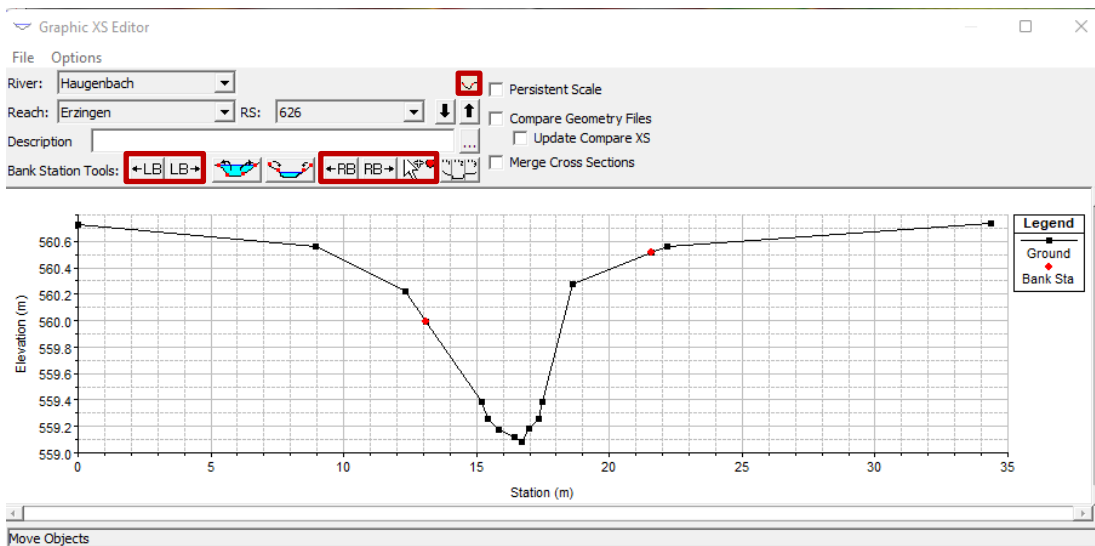


Abbildung 6-7: *Geometric Data* Fenster: Manuelles Bearbeiten von *Cross Sections* (2)

Importieren von Vermessungsdaten als *.csv-Datei

Das Importieren von Vermessungspunkten in die Geometriedatei ist auf verschiedenen Wegen und in unterschiedlichen Dateiformaten möglich. Hier wird zunächst die Importmöglichkeit einer *.csv-Datei vorgestellt.

Hierfür wird im *Geometric Data* Fenster unter dem Reiter *File* die Option *Import Geometry Data – CSV (Comma Separated Value) Format* ausgewählt. Zunächst muss hierfür der Speicherort der *.csv-Datei angegeben werden. Anschließend muss zwischen zwei Optionen gewählt werden (s. Abbildung 6-8 unten):

- Im *X, Y, Z Format* werden Punkte mit drei Koordinaten und einer Zuweisung zu einem Querprofil mit definierter *River Station* (RS) importiert. Hier müssen zuvor keinerlei Querprofilinien vorhanden sein, da alle Punkte aufgrund der Koordinatenangaben georeferenziert sind. Vermessungslinien können unverändert übernommen werden. Für die Interpolation eines Gewässerlaufs in HEC-RAS ist es nicht relevant, ob die Querprofilinien eine exakt gerade Linie darstellen. Kleine Abweichungen von einer geraden Linie führen trotzdem zu identischen Interpolationsergebnissen.
- Im *Station-Elevation Format* werden für schon bestehende Querprofile mit definierter *River Station* (RS) Höhenpunkte mit deren Lage innerhalb des Querprofils (wie bspw. in der Tabelle in Abbildung 6-6) importiert. Für diese zweite Option müssen bereits Querprofilinien existieren, da die importierten Daten nicht georeferenziert sind. Die bestehenden Querprofilinien müssen dieselbe Länge aufweisen, wie die *Station* des letzten importierten Punktes an der jeweiligen *Cross Section*. Wird diese Option gewählt und werden die Querprofilinien zuvor im *RAS-Mapper* importiert, muss beachtet werden, dass nach dem Import alle *Junctions* im *RAS-Mapper* neu definiert werden müssen. Das heißt, die bestehenden *Junctions* müssen gelöscht werden und anschließend nach Methode zwei, wie im Abschnitt 6.1.2 beschrieben, neu gesetzt werden.

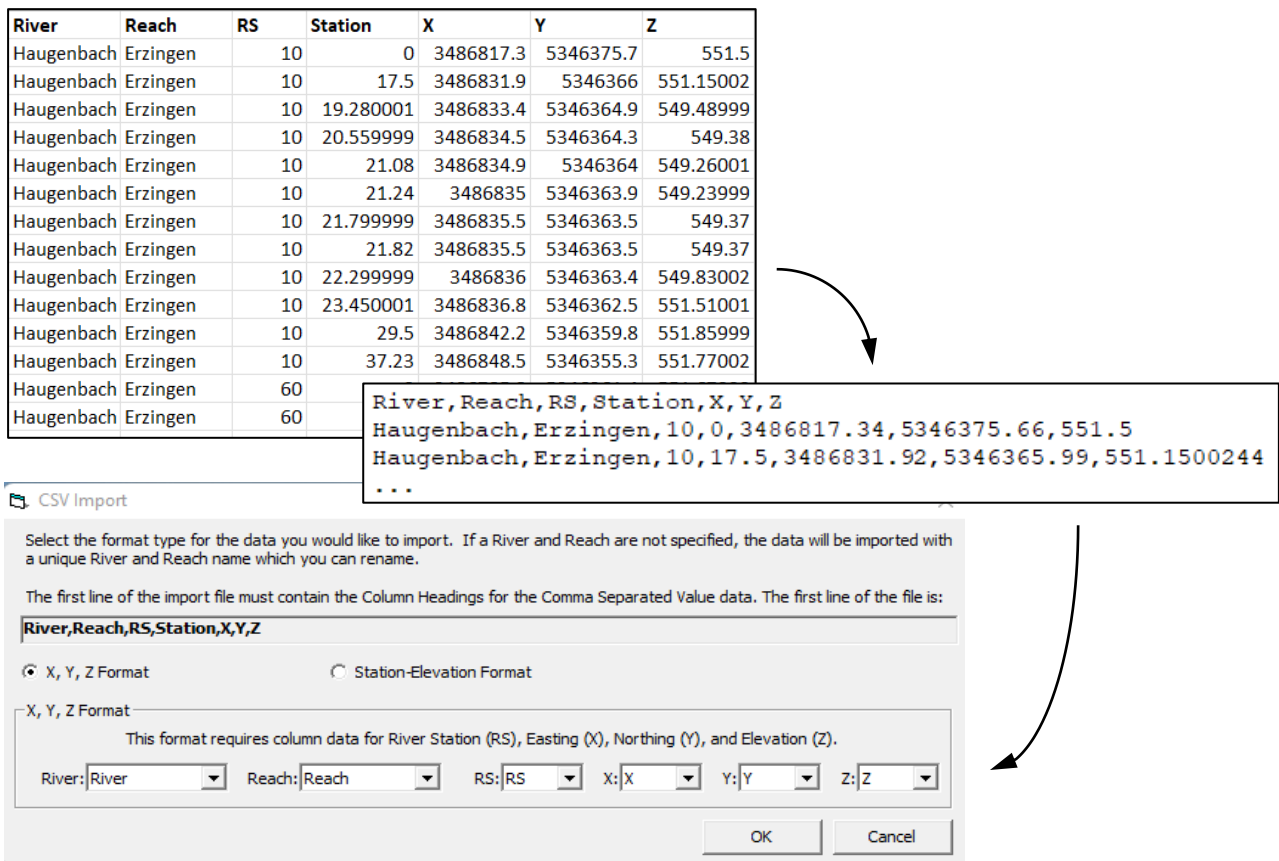


Abbildung 6-8: Import von Vermessungsdaten aus einer *.csv-Datei

Die zu importierende *.csv-Datei sollte in etwa wie in Abbildung 6-8 oben aussehen. Die erste Zeile muss die Spaltenbezeichnungen beinhalten, welche in den Dropdown Menüs des Fensters in Abbildung 6-8 unten zugeordnet werden können. Die dargestellte Tabelle kann für beide Importmethoden verwendet werden, da sowohl die Spalten *X* und *Y* als auch die Spalte *Station* vorhanden sind. In der Tabelle muss jeder Vermessungspunkt einem *River*, einer *Reach* und einer *River Station* zugeordnet werden. Für das Beschaffen der *River Stations* gibt es verschiedene Herangehensweisen: (HEC, 2022d)

- Im Falle des Imports im *Station-Elevation Format* können die *River Stations* einfach von den schon vorhandenen Querprofilen übernommen werden.
- Im Falle des Imports im *X, Y, Z Format*, ist es sinnvoll, zuvor im *RAS-Mapper* einen *River Station Marker* (s. Abschnitt 6.1.1) zu setzen, um die globalen Fließkilometer für die *River Station* verwenden zu können.

Daten im *X, Y, Z Format* können in Daten im *Station-Elevation Format* umgerechnet werden. Mithilfe des Satzes von Pythagoras kann die *Station* [m] innerhalb einer *Cross Section* anhand der Differenzen der *X*- und *Y*-Koordinaten ΔX und ΔY [m] wie in Gleichung (6-1) berechnet werden. Die für das Importformat *Station-Elevation* notwendigen Querprofilen können über die Koordinaten einfach im *RAS-Mapper* konstruiert werden.

$$Station = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \tag{6-1}$$

Weiterhin ist beim Erstellen der *.csv-Datei zu beachten, dass als Dezimaltrennzeichen ein Punkt verwendet wird und als Trennzeichen der Zellen ein Komma (s. Abbildung 6-8 Mitte) (HEC, 2022d). An dieser Stelle ist es wichtig, dass für die in Windows hinterlegte Formatregion „Englisch (Vereinigte Staaten)“ ausgewählt ist (s. Abschnitt 3.3 „Festlegen von Format und Einheit“), da die Trennzeichen beim Import sonst verändert werden. Zudem darf die Datei keine Einzelpunkte beinhalten, sondern nur Punkte, die einem Querprofil zuzuordnen sind, welches die Gewässer- und Uferlinien schneidet. Auch Vermessungsdaten für Quer- und Längsbauwerke sollten zuvor aussortiert werden, sodass nur noch Vermessungen der Gewässersohle in der Tabelle enthalten sind.

Je nach Bedarf können Vermessungsprofile der Sohle am Anfang eines Querbauwerkes im *Station-Elevation Format* ohne viel Aufwand ans Ende des Querbauwerkes kopiert werden, wenn an dieser Stelle kein weiteres Profil vorliegt. Dazu werden in der *.csv-Datei die Zeilen mit den Vermessungsdaten vor dem Bauwerk einfach kopiert und mit angepasster *River Station* (die vorherige *River Station* abzüglich der Bauwerksbreite) erneut eingefügt. Je nach Datenlagen können auch die Höhen um ein konstantes Gefälle im Vergleich zum Ursprungsprofil angepasst werden. Zusätzlich muss auch die Querprofilinie vor dem Bauwerk im *RAS-Mapper* hinter das Bauwerk kopiert werden.

Sind alle Spalten richtig zugeordnet, kann mit *OK* bestätigt werden. Im nächsten Fenster muss *SI (metric) units* ausgewählt werden. Anschließend müssen alle Haken für die zu importierenden Gewässer entfernt werden. Ist, wie in Abschnitt 6.1.1 beschrieben, vorgegangen worden, sollte in der Spalte *Status* überall *exists* stehen, weshalb keine Gewässerlinien importiert werden müssen, die diese ersetzen. Im letzten Fenster muss bei allen *River Stations* ein Haken gesetzt sein, damit diese importiert werden.

- Im Falle des Imports im *Station-Elevation Format* sollte in der Spalte *Status* überall *exists* stehen, da die Querprofilinien bereits vorhanden sind. Hier werden die Vermessungsdaten und die Linien durch den Import zusammengeführt.
- Im Falle des Imports im *X, Y, Z Format* sollte in der Spalte *Status* überall *new* stehen, da die Querprofilinien durch den Import erst erstellt werden.

Ist dies alles korrekt, kann der Import durchgeführt werden. Anschließend wird die Geometriedatei unter dem Reiter *File – Save Geometry Data* gespeichert. Nun wird in den *RAS-Mapper* gewechselt. Wurde das *X, Y, Z Format* gewählt, müssen alle *Junctions*, wie oben beschrieben, neu definiert werden. Für beide Importmethoden muss anschließend die Bearbeitung der *Cross Sections* gestartet werden und über Rechtsklick auf den Layer *Update Cross Sections – Bank Stations* gewählt werden. Zudem können nun auch zusätzliche *Cross Sections* gezeichnet werden, z. B. am Anfang und Ende des Gewässers und jeweils zwei *Cross Sections* in den Zuflüssen, für die keine Querprofile importiert wurden. Dieser Schritt ist jedoch auch zu jedem anderen Zeitpunkt vor Abschnitt 6.2 möglich.

Zuletzt wird erneut in das *Geometric Data* Fenster gewechselt und die Höhen der Ufer- bzw. Randpunkte auf dieselbe Höhe wie das umliegende Gelände gelegt, damit ein stufenloser Übergang entsteht (s. Abschnitt 6.1.4 „Höhen der Querprofile im *Geometric Data* Fenster anpassen“).

Importieren von Vermessungsdaten als *.sdf-Datei

Ein weiteres Format, in dem im *Geometric Data* Fenster Dateien importiert werden können, ist das *.sdf-Format (USACE Survey Data Format). Eine solche Datei kann beispielsweise in QGIS mithilfe des Plugins *RiverGIS* erstellt werden. Dabei wird eine Datenbank angelegt, die alle in HEC-RAS benötigten

Features beinhaltet. Dabei werden die Gewässermittellinie sowie alle weiteren in Abschnitt 6.1 vorgestellten Features in QGIS gezeichnet und anschließend eine komplette Geometriedatei importiert. Da diese Importvariante jedoch einen großen Vorbereitungsaufwand in QGIS benötigt, wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine Demonstration verzichtet. (RiverGIS, 2015)

Importieren von Vermessungsdaten im *RAS-Mapper*

Zudem besteht auch eine Option des Imports von Vermessungspunkten im *RAS-Mapper*. Dies ist jedoch nur möglich, wenn bereits Querschnittslinien existieren und Vermessungspunkte hinzugefügt werden sollen, die in etwa auf diesen Querprofilen liegen. Hierzu muss zunächst mittels Rechtsklick auf *Map Layers – Create a New RAS Layer – Elevation Point Layer* ein neuer Unterlayer erstellt werden. Es kann anschließend eine *.shp-Datei ausgewählt werden, welche die Vermessungspunkte beinhaltet. Die Datei muss jedoch auch die Z-Koordinaten der Punkte beinhalten, da diese sonst ohne Höheninformationen importiert werden. Alternativ kann der Layer auch über *Map Layers – Create an Empty RAS Layer – Elevation Point Layer* erstellt werden (ab Version 6.3.1 über *Map Layers – Create a New RAS Layer – Elevation Point Layer – Continue Without Importing*). Hier muss in einem zweiten Schritt über Rechtsklick auf den Layer und Auswahl von *Edit Elevation Control Points* eine Liste von Punkten in eine Tabelle mit X-, Y- und Z-Koordinaten eingefügt werden. (HEC, 2022f)

Ist der Punktlayer erstellt, wird im Bearbeitungsmodus der schon bestehenden *Cross Sections* über Rechtsklick *Update Cross Sections – Elevation Profiles from Points* gewählt. Nun kann im Dropdown Menü oben links der erstellte Punktlayer ausgewählt werden und im Dropdown Menü oben rechts angegeben werden, ob nur das Gewässerbett oder das gesamte Profil an die Vermessungspunkte angepasst werden soll (s. Abbildung 6-9). Zudem kann in der Spalte *Elev Pt Tol* eine Toleranz angegeben werden, mit der im Umfeld um die *Cross Sections* Punkte verwendet werden sollen. Durch Auswahl eines Querschnitts in der Liste, wird das jeweilige, aktuelle Profil des *Terrain Layers* und die Veränderung durch die Punkte im Diagramm rechts angezeigt. Es werden nur diejenigen *Cross Sections* angepasst, bei denen in der Spalte *Update* der Haken gesetzt ist. Der Import wird durch Klick auf *Update Cross Sections* durchgeführt. Auch hier sollten nach Abschluss des Imports die Höhen der Ufer- bzw. Randpunkte auf dieselbe Höhe wie das umliegende Gelände gelegt werden. (HEC, 2022f)

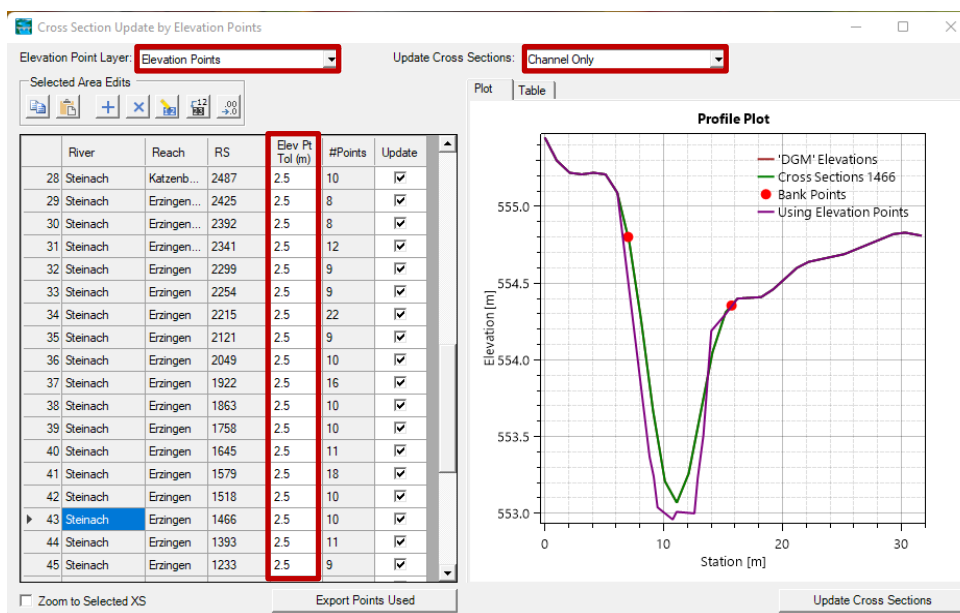


Abbildung 6-9: Anpassen der Querprofilhöhen anhand eines Punktlayers im *RAS-Mapper*

Im Beispielprojekt werden die vorhandenen Vermessungsdaten über eine *.csv-Datei importiert. Hierbei wird das *Station-Elevation Format* verwendet. Die Lage der Vermessungsprofile ist als *.shp-Datei verfügbar, weshalb diese einfach importiert werden können. An Brücken und Durchlässen kann zudem jeweils die *Cross Section* Linie vom Einlass an den Auslass kopiert werden. Anschließend wird anhand der verfügbaren Vermessungspunkte die in Abbildung 6-8 dargestellte Tabelle erstellt. In der Tabelle werden die Vermessungspunkte an Bauwerken doppelt eingefügt, am Einlass und ggf. mit Höhenversatz am Auslass. Die Lage der *River Stations* wird in der Tabelle manuell eingetragen, anhand der von HEC-RAS automatisch erstellten Werte der zuvor importierten *Cross Sections*. Nach dem Import der Daten werden zudem, wie zuvor beschrieben, die Höhen der Uferpunkte angepasst. Die Methode des Imports von Vermessungsdaten im *RAS-Mapper* ist zwar insgesamt weniger aufwändig, ist in diesem Fall jedoch nicht gut geeignet. Einige der Vermessungspunkte weichen stark von einer Linienform ab, weshalb die Toleranz des Suchbereiches erhöht werden müsste. Da jedoch einige eng zusammenliegende Vermessungsprofile existieren, ist diese Erhöhung nicht an allen Profilen sinnvoll. So müsste aufwändig für jedes Profil einzeln entschieden und kontrolliert werden, ob die richtigen Punkte je Profil gefunden werden. Zudem ist bei diesem Verfahren ein Kopieren von Profilen an Querbauwerken nicht möglich. Daher wird der Import per *.csv-Datei gewählt. Die dafür nötige *.csv-Datei wird in einem Unterordner „v02_DGMandRivers“ des Ordners „02_Terrain“ abgelegt.

6.2 Anpassung des Geländemodells

Sind alle Querschnitte bearbeitet bzw. importiert und die Geometrie im *Geometric Data* Fenster gespeichert, kann anhand dieser ein Geländemodell des Gewässerlaufs entlang der *River* Linie interpoliert werden. Dies geschieht erneut im *RAS-Mapper*.

6.2.1 Gewässerlaufeinbindung

Zunächst sollte das Berechnungsnetz für die Interpolation kontrolliert werden, da hieraus vor dem Erstellen des Gewässerlaufs grobe Fehler ersichtlich werden. Wurde beispielsweise eine *Cross Section* oder eine *Bank Line* falsch herum gezeichnet, ergibt sich ein unplausibles Berechnungsnetz. Das Netz kann im Bearbeitungsmodus des Layers *Cross Sections* über Rechtsklick auf *Interpolation Surface – Compute XS Interpolation Surface* erzeugt und eingeblendet werden (s. Abbildung 6-10). Es kann am besten durch die Aktivierung der Felder *TIN Points* und *TIN Edges* (unter *Additional Options*) in den *Layer Properties* kontrolliert werden (s. Abschnitt 12.1.1 „Darstellungsoptionen von Layern“). Es sollten Knotenpunkte entlang der Ufer- und Gewässermittellinien liegen und keine dieser Linien sollte durch die Außenlinie des Interpolationsbereiches geschnitten werden. Ist das Berechnungsnetz nicht zufriedenstellend, sollte die Richtung aller Linien kontrolliert werden und das Netz durch dichtere Querprofile oder Lageveränderung der Uferlinien optimiert werden.

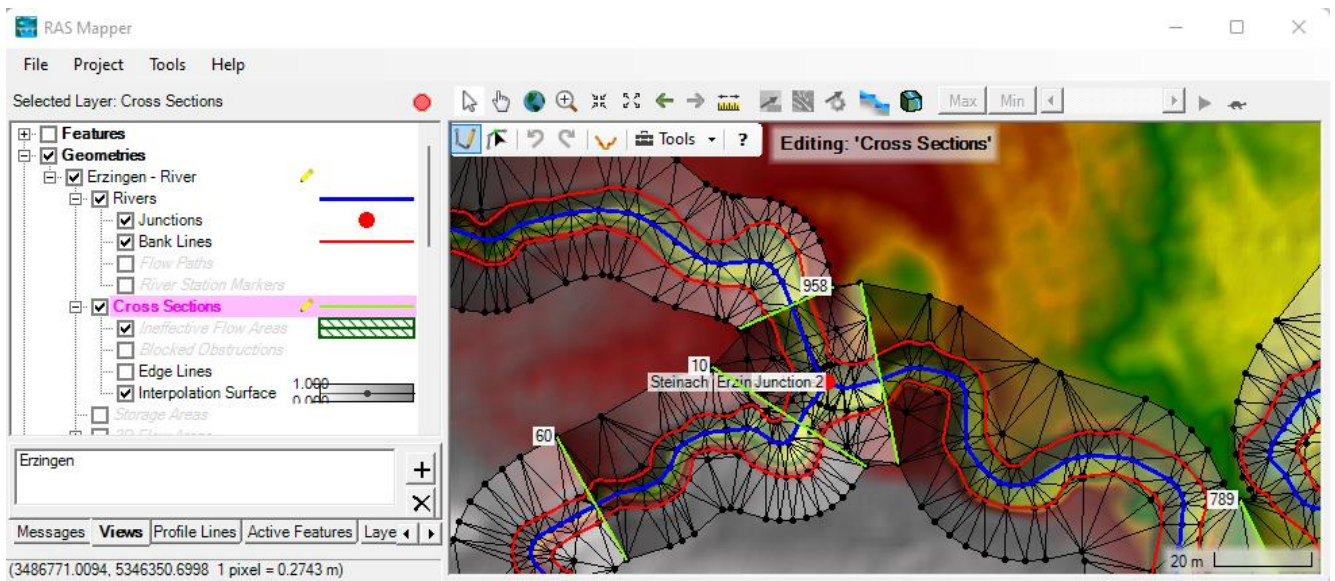


Abbildung 6-10: Kontrolle des Berechnungsnetzes zum Interpolieren eines Gewässerlaufs

Bei einem zufriedenstellenden Berechnungsnetz wird als nächstes per Rechtsklick auf den übergeordneten Geometrie Layer *Export Layer* ausgewählt. Hier wird eine der beiden Optionen unter *Create Terrain GeoTiff from XS's* gewählt. Soll das Gelände, wie in Abschnitt 6.1 beschrieben, nur zwischen den Uferlinien interpoliert werden, wird hier *Channel Only* gewählt. Soll der gesamte Bereich innerhalb des Berechnungsgitters interpoliert werden, wird *Overbanks and Channel* gewählt. In beiden Fällen ist zu beachten, dass nur innerhalb der ersten und der letzten *Cross Section* interpoliert wird. Nach der Wahl einer Option wird als Speicherort der Ordner „02_Terrain“ bzw. ein entsprechender Unterordner ausgewählt. Die Bezeichnung der *.tif-Datei sollte eindeutig sein, also *Overbanks and Channel* oder *Channel Only* beinhalten sowie ein Datum oder eine Versionsnummer. Anschließend muss eine sinnvolle Zellgröße für den Flusslauf angegeben werden.

Nun wird ein neues Terrain erstellt, welches sowohl das alte DGM als auch den neu modellierten Gewässerlauf enthält. Dies geschieht erneut über Rechtsklick auf den Layer *Terrain – Create a New RAS Terrain*, nur dass diesmal sowohl der erstellte Gewässerlauf als auch das DGM je über die + Schaltfläche ausgewählt werden (s. Abbildung 6-11). Wichtig ist hierbei, dass der Gewässerlauf die höhere Priorität haben muss. Dazu wird dieser über die Pfeil Schaltflächen nach oben bewegt (s. Abbildung 6-11). Beim Zusammenfügen mehrerer *.tif-Dateien sollte außerdem die Option *Create Stitches* aktiviert sein. Zudem sollte erneut auf eine eindeutige Namensgebung geachtet werden.

In dem verwendeten Beispiel wird das anhand der Geometriedatei erstellte Gelände mit „v02_ChannelOnly“ benannt und zusätzlich im Unterordner „v02_DGMandRivers“ abgelegt. Es wird eine Zellgröße von 0,5 m gewählt. Das neu zusammengefügte Gelände wird „DGMandChannel“ genannt und ebenfalls im Unterordner „v02_DGMandRivers“ gespeichert.

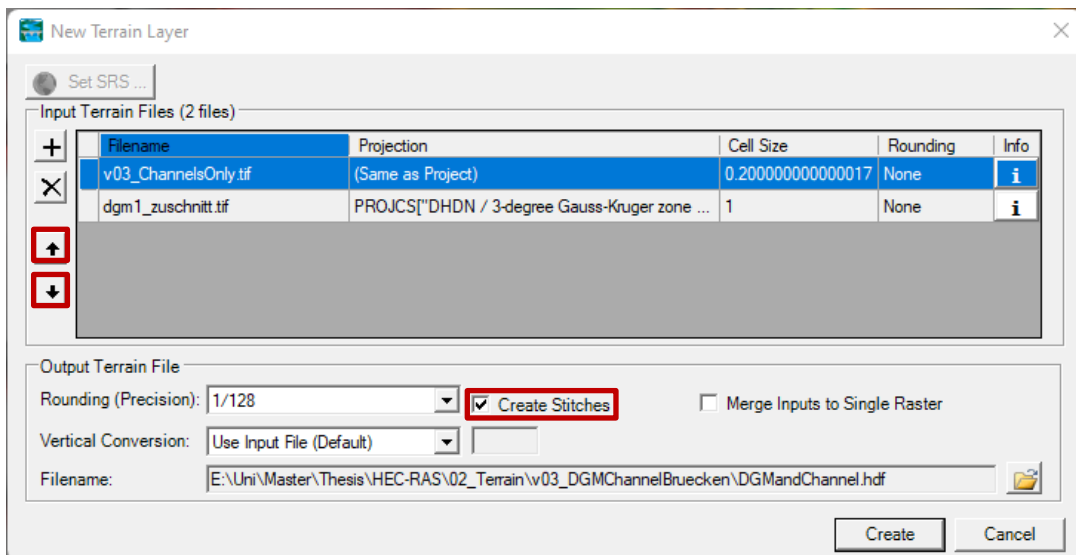


Abbildung 6-11: Erstellen eines neuen Geländelayers aus mehreren *.tif-Dateien

Anschließend muss das erstellte Gelände im *RAS-Mapper* kontrolliert werden. Um es sichtbar zu machen, muss es entweder die höchste Priorität im *Terrains* Layer haben oder darüberliegende *Terrain* Layer müssen deaktiviert werden. Anschließend sollte entlang der Uferbereiche kontrolliert werden, ob ein glatter Übergang zum DGM gelungen ist oder nicht. In Abbildung 6-12 links ist ein gut eingebetteter Gewässerlauf abgebildet. In Abbildung 6-12 rechts dagegen ist an einigen Stellen Verbesserungsbedarf zu sehen. Dies kann auch mithilfe des *Measure Distance* Tools oben in der Toolbox des *RAS-Mappers* kontrolliert werden (Schaltfläche mit Maßband). Damit kann mit einem Klick auf der einen Gewässerseite und Doppelklick auf der anderen Gewässerseite und Auswahl von *Plot Terrain Profile(s)* ein Querschnitt des Gewässers dargestellt werden. Hier können mögliche Höhenversätze eindeutig identifiziert und abgelesen werden. Außerdem kann überprüft werden, ob der Versatz im Toleranzbereich liegt oder an dieser Stelle überarbeitet werden muss.

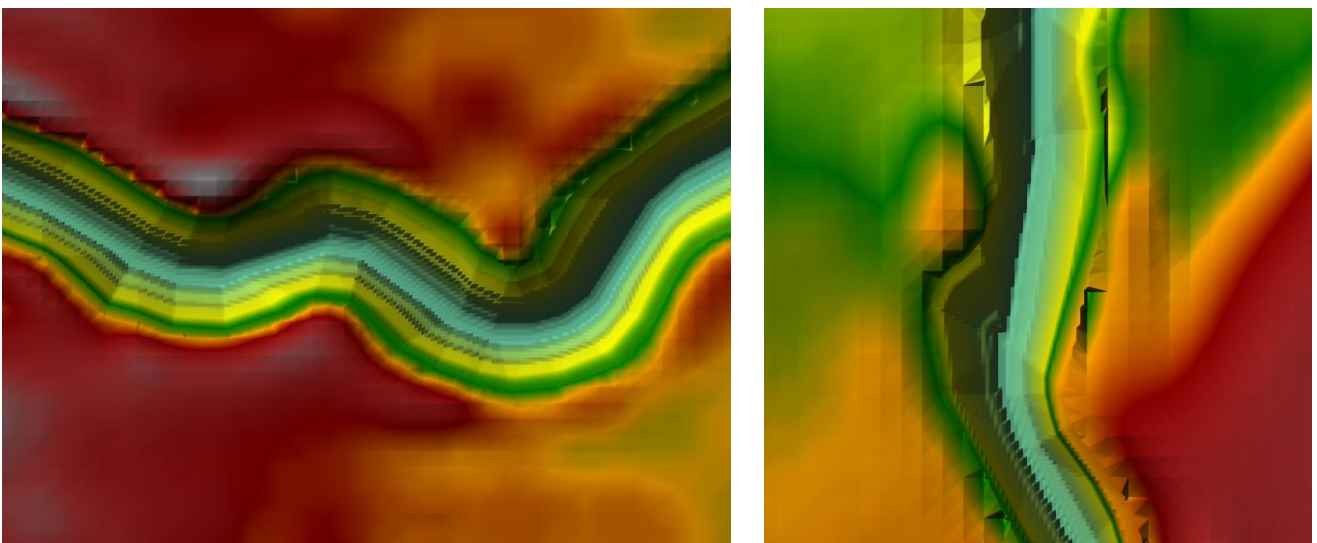


Abbildung 6-12: DGM mit eingebettetem Gewässerlauf: Links: Guter Übergang, rechts: Überarbeitungsbedarf

Ist eine Nacharbeitung erforderlich, sollte zunächst die Lage der Uferlinien verschoben werden, was meist die gewünschte Besserung bewirkt. Bei einem sehr unregelmäßigem Uferbereich kann jedoch

unter Umständen nur durch dichtere Vermessungsquerschnitte eine Besserung erreicht werden. Wurde die Uferlinie an einer *Cross Section* verändert, muss erneut die Bearbeitung der *Cross Sections* gestartet werden und mit Rechtsklick auf den Layer und Auswahl von *Update Cross Sections – Bank Stations* die Lage der Uferpunkte aktualisiert werden. Anschließend müssen erneut die Uferpunkte im *Geometric Data* Fenster auf die Höhe des DGM gelegt werden und noch einmal alle Schritte in Abschnitt 6.2 befolgt werden. Dies kann unter Umständen ein iterativer Prozess sein und einige Zeit in Anspruch nehmen.

Im Beispielprojekt wurden die Uferlinien in mehreren Durchgängen angepasst und anschließend der Übergang vom Gewässerlauf zum DGM überprüft. Das beste Ergebnis wird bei einer Lage der Uferlinien im oberen Böschungsbereich erzielt. Kleinere Höhenversätze können in einigen Bereichen, wo die Höhe der Böschungskarte zu stark variiert und keine Vermessungsdaten vorliegen, nicht vermieden werden.

6.2.2 Räumlich verteilte Infrastrukturelemente einbinden

Weitere Geländemodifikationen können direkt am *Terrain* Layer umgesetzt werden. Dazu wird per Rechtsklick auf den Geländelayer *Add New Modification Layer* ausgewählt. Hier gibt es nun verschiedene Möglichkeiten, Geländeerhebungen oder -absenkungen in verschiedenen Formen durchzuführen: (HEC, 2022f)

- Formen (englisch: *Shapes*)
 - Kreisförmig, ellipsenförmig, rechteckig, dreieckig (für verschiedenste Bauwerke mit einer konstanten Höhe)
 - Längliche Brückenpfeiler
 - Linien (englisch: *Lines*)
 - Geländeerhebungen (z. B. Deiche)
 - Kanäle (mit gleichbleibendem Trapez- oder Rechteckprofil)
 - Polygone (englisch: *Polygons*)
 - Multipunkt, rechteckig (für verschiedenste Bauwerke mit veränderbarer Höhe)
 - Füllen von Lücken (englisch: *No Data Regions*) im DGM
- (HEC, 2022f)

Im Folgenden wird auf zwei dieser Optionen genauer eingegangen: Zunächst die Polygonfunktion Multipunkt, mit der Gebäude dargestellt werden können sowie anschließend die Linienfunktion zur Erstellung von Deichen, da Bauwerke dieser Art in vielen Modellen benötigt werden. Eine Beschreibung aller Geländemodifikationsmöglichkeiten ist im „HEC-RAS Mapper User’s Manual“ zu finden. Sollen mittels Geländemodifikationen verschiedene Versionen eines Geländes erstellt werden, ohne dieses jedes Mal neu erstellen zu müssen, kann die Option *Clone Terrain (Virtual)* verwendet werden. Diese ist über Rechtsklick auf den zu kopierenden *Terrain* Layer zu finden. Dabei wird eine neue *.hdf-Datei erstellt, welche jedoch auf dieselben *.tif-Dateien zugreift. Kopiert ein Nutzer ein Gelände, welches bereits Modifikationen beinhaltet, werden diese mitkopiert. So müssen große Dateien nicht mehrfach existieren und Modifikationen können schnell in verschiedenen Varianten erstellt werden. (HEC, 2022f)

Geländemodifikation mittels Polygone

Um Gebäude im Gelände darzustellen, kann die Funktion der Geländemodifikation mittels Polygone verwendet werden. Dazu muss ein neuer Unterlayer zu dem bestehenden Layer hinzugefügt werden, in

dem die Gebäude abgebildet werden sollen. Dazu wird per Rechtsklick auf den Geländelayer *Add New Modification Layer – Polygons – Multipoint* ausgewählt und der Layer anschließend benannt. Im Bearbeitungsmodus des neuen Layers können anschließend Polygone anhand von Onlinekarten oder Luftbildern gezeichnet oder importiert werden. Nach Fertigstellung eines Features öffnet sich das in Abbildung 6-13 dargestellte Fenster. (HEC, 2022f), (The RAS Solution, 2021b)

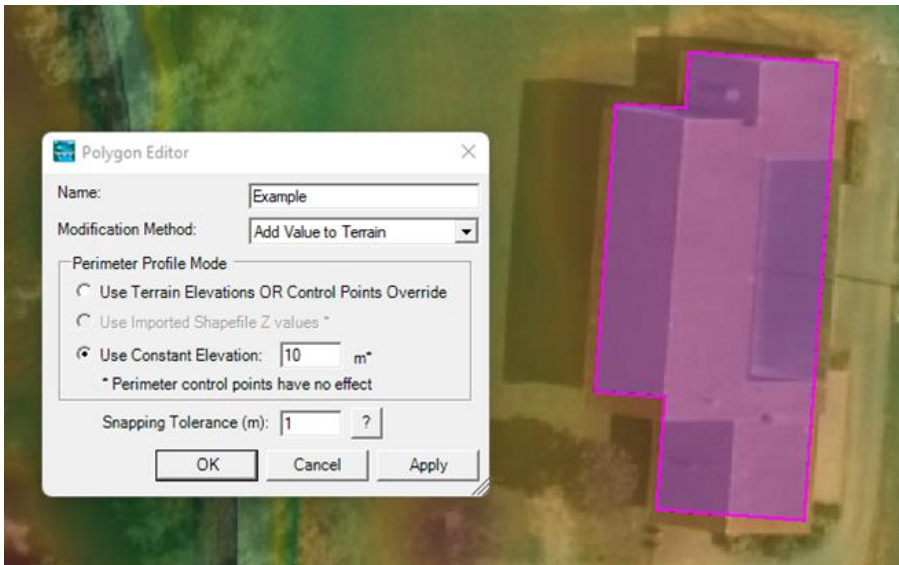


Abbildung 6-13: Einstellungen der Geländemodifikation mittels Polygone

Es gibt verschiedene Modifikationsmethoden, die aus dem Dropdown Menü des Einstellungsfensters in Abbildung 6-13 je nach Anwendungsfall ausgewählt werden können (HEC, 2022f):

- *Replace Terrain Value*: Das Gelände innerhalb des Polygons wird mit der angegebenen Höhe in Meter über Normalnull überschrieben. So entsteht eine konstante Polygonhöhe.
- *Higher (Terrain/User) Value*: Es werden die Geländehöhe und die angegebene Höhe verglichen. Das Gelände innerhalb des Polygons wird mit der größeren Höhe in Meter über Normalnull überschrieben.
- *Lower (Terrain/User) Value*: Es werden die Geländehöhe und die angegebene Höhe verglichen. Das Gelände innerhalb des Polygons wird mit der niedrigeren Höhe in Meter über Normalnull überschrieben.
- *Add Value to Terrain*: Auf die Geländehöhe innerhalb des Polygons wird der angegebene Wert dazu addiert.

(HEC, 2022f)

Die benötigte Höhenangabe, kann vom Nutzer in drei verschiedenen Modi (*Perimeter Profile Mode*) angegeben werden: (HEC, 2022f)

- *Use Terrain Elevation OR Control Points Override*: Diese Option nutzt die Höhe des Features, die über Rechtsklick und *Set Elevation for Selected* angegeben werden kann, als Meter über Normalnull. Die Höhe kann zudem mit *Control Points* modifiziert werden, indem Punkte mit verschiedenen Höhen angegeben werden (Erstellung im Unterlayer *Control Points* des Modifikationslayers). So kann ein Polygon erstellt werden, welches keine konstante Höhe besitzt.

HEC-RAS interpoliert anschließend die Höhen innerhalb des Polygons. In der Distanz, die hinter *Snapping Tolerance* angegeben ist, wird um die erstellten Punkte die Polygonhöhe an die neue Höhe per Interpolation angepasst. (The RAS Solution, 2021b)

- *Use Imported Shapefile Z values*: Es werden die importierten Polygonhöhen verwendet.
- *Use Constant Elevation*: Es wird ein beliebiger, konstanter Wert angegeben.

In dem verwendeten Beispiel wird der Unterlayer „Buildings“ genannt, da ausschließlich Gebäude abgebildet werden. Die *.shp-Dateien der Gebäudeumrisse werden importiert. Im Einstellungsfenster aus Abbildung 6-13 wird für *Modification Method* die Methode *Add Value to Terrain* gewählt, da eine konstante Gebäudehöhe auf der Höhe des aktuellen Geländes aufaddiert werden soll. Zudem wird unter *Perimeter Profile Mode* die Option *Use Constant Elevation* gewählt und eine beliebige Gebäudehöhe angegeben. Die Option *Use Terrain Elevation OR Control Points Override* dagegen nutzt die Höhe des Features, die über Rechtsklick und *Set Elevation for Selected* angegeben werden kann, als Meter über Normalnull. Diese Option ist jedoch für das verwendete Beispiel unvorteilhaft, da viele Gebäude importiert werden, die auf unterschiedlichen Geländehöhen stehen. Demnach wird als konstante Gebäudehöhe im Beispiel 10 m gewählt. Es könnte jedoch auch jede andere Höhe gewählt werden, die oberhalb des erwarteten Wasserstandes liegt, da die Modifikation lediglich verhindern soll, dass Wasser auf Gebäudeflächen fließen kann. Bei der verwendeten Methode ist die Höhe der Gebäude innerhalb der Polygone zudem nicht konstant, sondern besitzt aufgrund der Addition der Höhen die Form des darunterliegenden Geländes, was jedoch aus demselben Grund nicht relevant ist. Vorteil der für dieses Beispiel verwendeten Methode der Geländemodifikation über Multipunkt Polygone ist, dass vorhandene *.shp-Dateien von Gebäudeumrissen ohne viel Aufwand importiert werden können. (HEC, 2022f), (The RAS Solution, 2021b)

Geländemodifikation mittels Linien

Um Deiche im Gelände darzustellen, wird die Funktion der Geländemodifikation mittels Linien verwendet. Dazu wird ein neuer Unterlayer zu dem bestehenden *Modifications* Layer hinzugefügt. Per Rechtsklick auf den Layer wird *Add Modification – Line – High Ground* ausgewählt und der Layer anschließend benannt. Im Bearbeitungsmodus des neuen Layers können anschließend Linien gezeichnet oder importiert werden. Nach Fertigstellung eines Features öffnet sich das in Abbildung 6-14 dargestellte Fenster. (HEC, 2022f)

Die Auswahl der Modifikationsmethoden oben links ist analog zur Geländemodifikation mit Polygonen. Für *High Ground* ist automatisch *Higher Value*, für *Channel* automatisch *Lower Value* ausgewählt. In den darunterliegenden Felder kann die Geometrie des Deichs definiert werden: Breite der Spitze (englisch: *Top Width*), Gefälle beidseitig (englisch: *Slope*) und maximale Breite (englisch: *Max Extent Width*). Es wird automatisch zwischen den Höhen des Anfangs- und Endpunktes interpoliert. Diese Höhen können jedoch auch angepasst werden, bzw. weitere Höhenpunkte entlang der Linie über die Tabelle unten links eingefügt werden. Auch hier können *Control Points* analog zur Geländemodifikation mit Polygonen zur individuellen Höhenanpassung gesetzt werden. (HEC, 2022f)

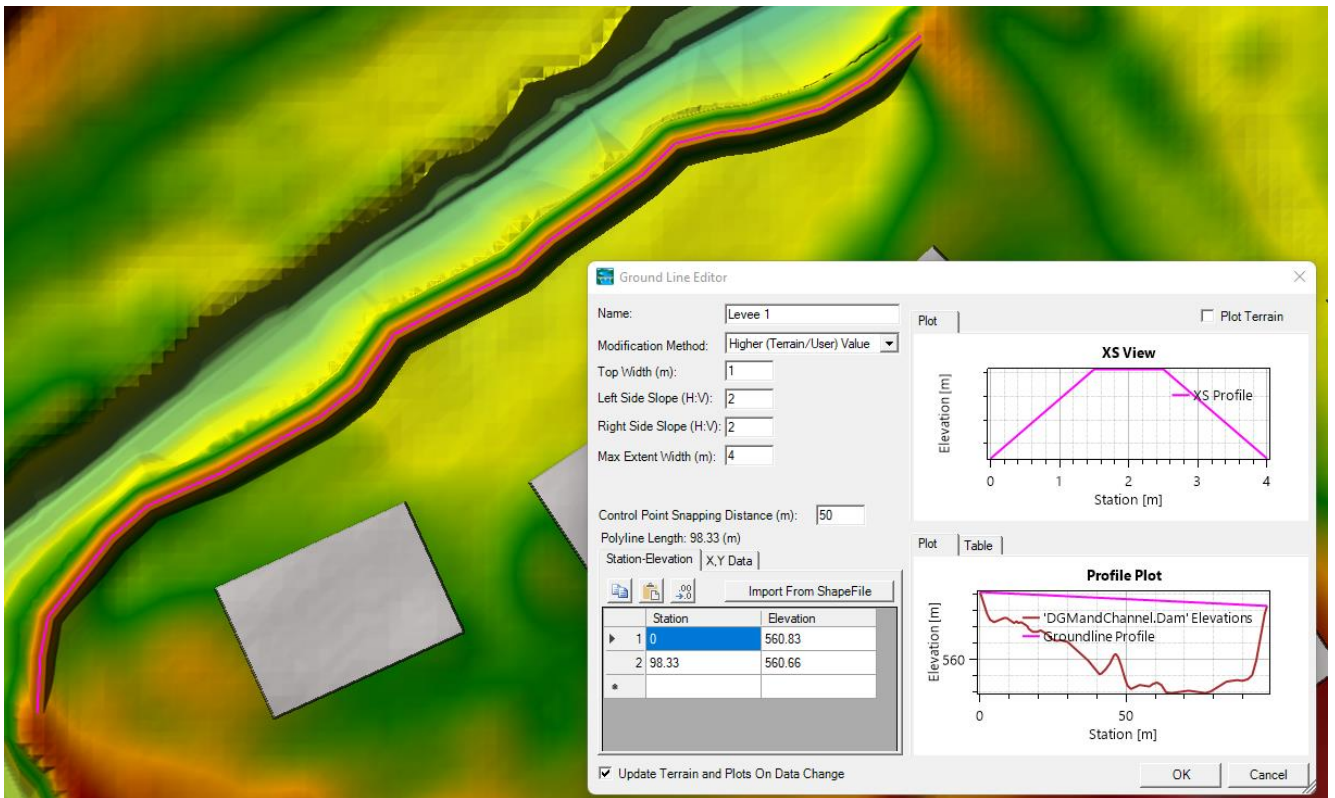


Abbildung 6-14: Einstellungen der Geländemodifikation mittels Linien

Im Beispielprojekt wird für Geländemodifikation mittels Linien eine virtuelle Kopie des Geländelayers erstellt (*Clone Terrain (Virtual)*), da im eigentlichen Istzustand des Gebietes keine Deiche ins DGM eingefügt werden müssen. Der neue Unterlayer unter dem bestehenden *Modifications* Layer wird „Levee“ genannt. Zur Veranschaulichung wird in einem Uferbereich, der niedriger liegt als das übrige Ufer, ein Deich ergänzt, welcher die beiden höheren Uferteile verbindet (s. Abbildung 6-14).

7 Berechnungsnetz

Als erster Schritt zur Erstellung des Berechnungsnetzes (englisch: *Mesh*), wird im *RAS-Mapper* über Rechtsklick auf *Geometries – Add New Geometry* eine neue Geometrie erstellt, welche für die Simulation genutzt wird. Geometrielayer, die Gewässerlinien, Uferlinien und Querprofilinien enthalten, können für eine 2D-Simulation nicht verwendet werden, da aufgrund der vorhandenen Features keine reine 2D-Simulation durchgeführt wird. Es ist jedoch sinnvoll, den Layer, der genutzt wurde, um einen Gewässerlauf zu modellieren, unverändert bestehen zu lassen, falls noch Anpassungen nötig sind. Der neue Geometrielayer sollte eingängig benannt werden.

Im Beispiel Erzingen wird der Geometrielayer „Erzingen - River“, welcher für die Gewässerlaufmodellierung verwendet wurde, unverändert belassen und ergänzt um einen weiteren Geometrielayer „Erzingen - Simulation“.

7.1 Verknüpfung von Layern und Geometrie

Ein Geometrielayer kann, wie es in Abbildung 2-1 dargestellt ist, auf die folgenden weiteren Layer zugreifen:

- *Terrain* (s. Kapitel 4 und Kapitel 6)
- *Manning's n* (s. Kapitel 5)
- *Infiltration* (s. Kapitel 5)
- *% Impervious* (s. Kapitel 5)
- *Sediment Bed Material* (s. Kapitel 11)

Sollen Informationen, die in diesen Layern enthalten sind, in einer Simulation verwendet werden, müssen diese mit dem verwendeten Geometrielayer verknüpft werden. Dies geschieht per Rechtsklick auf *Geometries – Manage Geometry Associations*. Hier werden die vorhandenen Geometrielayer (sowie später die Layer der Simulationsergebnisse) aufgelistet (s. Abbildung 7-1). Aus den Dropdown Menüs kann jeweils gewählt werden, welche Layer verknüpft werden sollen. Außer in der Spalte *Terrain*, besteht auch die Option, keine Verknüpfung „(None)“ zu wählen. Der Layer *Terrain* ist der Einzige, der für eine 2D-Simulation zwingend notwendig ist. Sobald mehrere *Terrain* Layer existieren, sollte der Nutzer in der dargestellten Tabelle prüfen, ob die Verknüpfungen korrekt sind. (HEC, 2022e)

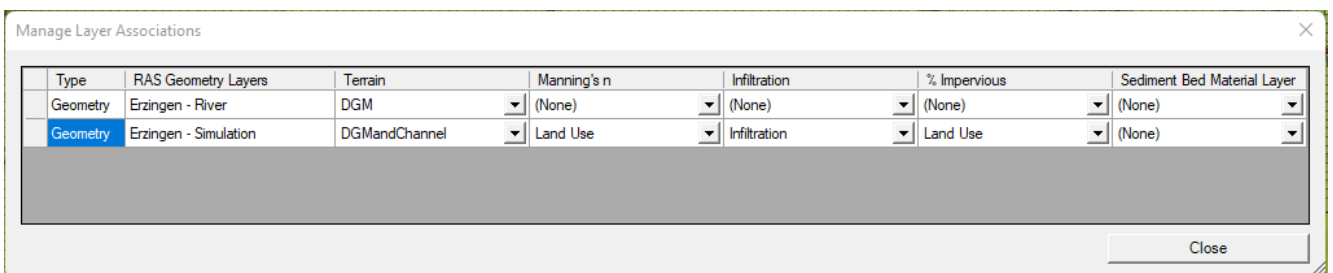


Abbildung 7-1: Verknüpfung von Geometrie mit anderen Layern

Für die beiden Spalten *Manning's n* und *% Impervious*, werden *Land Cover* Layer als Verknüpfungsoption aufgelistet, da die Rauheits- und Undurchlässigkeitsinformationen dort enthalten sind. Für die beiden

Spalten *Infiltration* und *Sediment Bed Material* werden die jeweiligen Layer vorgeschlagen, die unter *Map Layers* hinzugefügt werden können (s. Abbildung 7-1).

Im Beispielprojekt bleibt der erste Geometrielaye „Erzingen - River“ mit dem ursprünglichen DGM verknüpft. Der neue Geometrielaye „Erzingen - Simulation“ wird mit dem in Kapitel 6 erstellten Gelände „DGMandChannel“ verknüpft, welches den Gewässerlauf enthält. Der neue Geometrielaye wird zudem in der Spalte *Manning's n* mit dem in Kapitel 5 erstellten Layer „Land Use“ verknüpft, um Rauheitswerte zu erhalten. Soll eine Infiltration simuliert werden, würde in der Spalte *Infiltration* der in Kapitel 5 erstellte Layer „Infiltration“ verknüpft werden. Wird diese nicht berücksichtigt, wird hier „(None)“ gewählt. Für die Spalten *% Impervious* und *Sediment Bed Material* wird ebenso die Option „(None)“ gewählt.

7.2 Berechnungsnetz generieren

Das Berechnungsnetz, innerhalb dessen die Simulation durchgeführt werden soll, wird im Geometrielaye unter *2D Flow Areas* erstellt und angepasst. Dieses Gitter bildet die Zellen, innerhalb derer die Strömungsgleichungen gelöst und Parameter wie bspw. Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe berechnet werden. HEC-RAS erzeugt hierbei ein unstrukturiertes Gitter, mit Zellen die maximal acht Seiten haben können. (HEC, 2022e), (Ferziger, et al., 2020)

7.2.1 Untersuchungsgebiet

Der erste Schritt, zur Erstellung eines Berechnungsnetzes, ist das Festlegen von Außengrenzen des Untersuchungsgebietes. Hierfür wird im Unterlayer *Perimeters* unter *2D Flow Areas* die Bearbeitung aktiviert und ein Polygon gezeichnet oder importiert, welches diese Grenzen festlegt. Hierbei sollte das Polygon so klein wie möglich gehalten werden, um die Berechnungsdauer der späteren Simulation gering zu halten. Jedoch sollten alle relevanten Bereiche enthalten sein und außer am Ein- und Ausstromrand der Gewässer kein Wasser bis an den Rand des Untersuchungsgebietes reichen. Der Rand selbst ist nicht durchströmbar. Wenn dort also Wasser ansteht, wird es künstlich gestaut, was die Simulationsergebnisse verfälscht. Das Gebiet sollte also dort platziert werden, wo aufgrund der Höhenlage Wasser erwartet wird. Das Berechnungsnetz muss sich jedoch innerhalb der Grenzen des gewählten *Terrains* befinden. (HEC, 2022e), (The RAS Solution, 2018e)

Nach dem Beenden des Zeichnens bzw. nach einem Import per Rechtsklick auf *Perimeters* und Auswahl von *Edit 2D Area Properties*, öffnet sich ein Eigenschaftfenster für das Untersuchungsgebiet (s. Abbildung 7-2). Hier kann hinter *Points Spacing* zunächst eine Zellgröße für das Rechtecknetz (mit quadratischen Zellen) gewählt werden. Um eine sinnvolle Zellgröße zu wählen, muss das Vorverarbeiten (englisch: *Preprocessing*) des *Meshs* von HEC-RAS verstanden werden. Hierbei wird vor der eigentlichen Simulation für jede einzelne Zelle des Netzes eine Eigenschaften Tabelle (englisch: *Property Table*) berechnet. Diese beinhaltet einen Zusammenhang zwischen Wasserstand und den Eigenschaften: Benetzte Oberfläche, Rauheit und Fläche. Auf diese Weise werden diese Geländedetails auch bei größeren Zellen berücksichtigt. Größere Zellen reduzieren zudem die Gesamtzellzahl, was die Berechnungsdauer mindert. Verfeinerungen sind an einzelnen Stellen durch Bruchkanten (s. Abschnitt 7.2.2) und Verfeinerungszonen (s. Abschnitt 7.2.3) möglich. Jedoch sollte besonders bei unregelmäßigem Gelände und Flächen, in denen Wasser erwartet wird, die Zellgröße nicht zu groß sein. (HEC, 2022e)

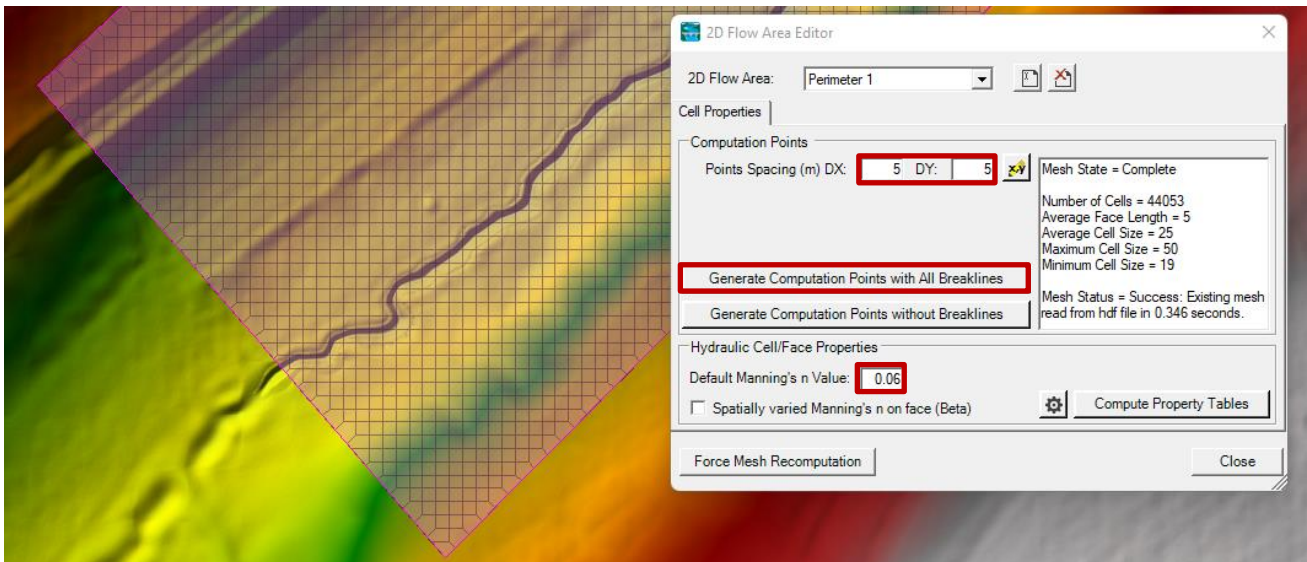


Abbildung 7-2: Eigenschaftenfenster des Berechnungsnetzes

Es besteht zudem die Möglichkeit, einen Standardwert für die Geländerauheit anzugeben (s. Abbildung 7-2 *Default Manning's n Value*). Für alle Flächen, denen kein Manning's-n-Wert durch einen *Land Cover Layer* zugewiesen wird, greift HEC-RAS auf diesen Wert zurück. Das Netz wird, wenn alle Eingaben erfolgt sind, per Klick auf die Schaltfläche *Generate Computation Points* erstellt. Anschließend muss die Bearbeitung des Layers beendet werden. (HEC, 2022e)

Im vorgestellten Beispiel werden außerhalb der Ortschaft Erzingen die Grenzen des Untersuchungsgebiets auf der einen Uferseite nah ans Gewässer gelegt, da ein hohes Gefälle vorliegt. Auf der anderen Seite werden die Grenzen hinter eine Bahntrasse gelegt, die erhöht liegt und somit ein Fluten bis zur Gebietsgrenze verhindert. Die Ortschaft Erzingen ist größtenteils im Untersuchungsgebiet enthalten, da die Darstellung von möglichen Überflutungsflächen hier besonders relevant ist. Vor und nach der Ortschaft wird zudem in den Gewässern eine ausreichende Fließlänge als Puffer zum Untersuchungsgebiet hinzugenommen, um eine Beeinflussung der Strömung durch die Randbedingungen in der Ortschaft selbst auszuschließen. Es wird eine Zellgröße von 2 m gewählt.

7.2.2 Strömungsbeeinflussende Geländebruchkanten

Die Berechnung der Strömungsparameter ist zellengebunden, was bedeutet, dass ein berechneter Wert für die gesamte Zelle gilt. Daher sollten Zellen so gelegt werden, dass die Fläche, die sie abdecken, durch nur einen Wert pro Parameter repräsentiert werden kann. Ein Beispiel hierfür ist ein Deich, der einen Bereich vor Überflutung schützen soll. Ersteckt sich eine Zelle über beide Seiten eines Deichs wie es in Abbildung 7-3 links zu sehen ist, wird für die gesamte Zelle ein Wert für die Wassertiefe berechnet. Dies verfälscht jedoch das Ergebnis, da in der Realität nur auf einer Seite des Deichs Wasser ansteht. Durch das fehlerhafte Legen der Zellen, gelangt in der Simulation Wasser auf die andere Deichseite. Aus diesem Grund besteht die Möglichkeit (Gelände-)Bruchkante (englisch: *Breaklines*) zu setzen, an denen eine Zellkante erzwungen wird. So werden Zellen beiderseitig von *Breaklines* angeordnet und erstecken sich nicht über die Linie hinweg (s. Abbildung 7-3 rechts). Solche Bruchkanten sollten an Deichen, Dämmen, Straßen oder anderen Geländeerhöhungen sowie insbesondere an den Ufern von Gewässern gesetzt werden. So wird verhindert, dass Wasser über diese Bereiche übertritt, ohne dass der Wasserstand die

Geländeerhöhung tatsächlich überschreitet. Bruchkanten können auch durch Verfeinerungszonen (s. Abschnitt 7.2.3) erzeugt werden. (HEC, 2022e), (Ferziger, et al., 2020)

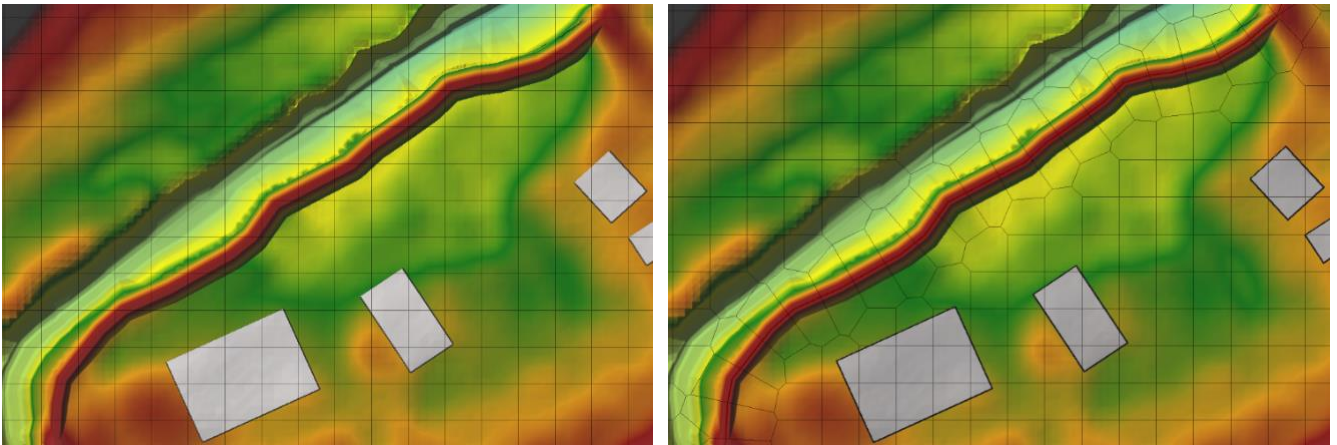


Abbildung 7-3: Berechnungsnetz an einem Deich ohne Bruchkante (links) und mit Bruchkante (rechts)

Weiterhin sollte berücksichtigt werden, dass die berechnete Strömung durch die Lage und Ausrichtung der Zellen beeinflusst wird. Eine Wasserbewegung von einer Zelle in eine Nachbarzelle erfolgt über die gemeinsame Zellkante. Daher ist es sinnvoll, die Zellen innerhalb des Gewässerlaufs in Strömungsrichtung anzuordnen, um die Genauigkeit der Berechnung zu verbessern (Ferziger, et al., 2020). Zudem kann an *Breaklines* die Zellgröße vorgegeben werden. (HEC, 2022e)

Das Zeichnen oder Importieren von *Breaklines* erfolgt im Bearbeitungsmodus unter *2D Flow Area – Breaklines*. Weiterhin können zusätzliche Einstellungen per Rechtsklick auf *Breaklines – Open Attribute Table* getroffen werden (s. Abbildung 7-4). Hierbei geben die Einträge der Spalte *Near Spacing* die Zellgröße unmittelbar entlang des jeweiligen Features an. Wird dort nichts eingetragen, entspricht die Zellgröße entlang der *Breakline* der des übrigen Berechnungsnetzes. *Near Repeats* gibt die Anzahl an Zellen an, die sich mit der Zellgröße aus *Near Spacing* beiderseits der *Breakline* wiederholen. Nach der Zellgröße aus *Near Spacing* wird die Größe der Zellen in einem Übergangsbereich so lange verdoppelt, bis entweder der Wert aus *Far Spacing* erreicht ist, sollte dieser angegeben sein, oder die Zellgröße des *Perimeters* erreicht ist. Die Option *Enforce 1 Cell Protection Radius* generiert einen Schutzbereich im Abstand von *Near Spacing* um die Bruchkante, innerhalb dessen das Mesh nicht durch andere *Breaklines* oder andere Netzmodifizierungen verändert werden kann. (HEC, 2022f)

FID	Name	Near Spacing	Near Repeats	Far Spacing	Enforce 1 Cell Protection Radius
9	Strasse8		0		<input type="checkbox"/>
10	Strasse9		0		<input type="checkbox"/>
11	Weg		0		<input type="checkbox"/>
12	Gewaesser1	1.5	2		<input type="checkbox"/>
13	Gewaesser2	1.5	2		<input type="checkbox"/>
14	Gewaesser3	1.5	2		<input type="checkbox"/>
15	Gewaesser4	1.5	2		<input type="checkbox"/>
16	Gewaesser5	1.5	2		<input type="checkbox"/>
17	Gewaesser6	1.5	2		<input type="checkbox"/>
18	Gewaesser7	1.5	1		<input type="checkbox"/>
19	Ufer1	1.5	0	3	<input checked="" type="checkbox"/>
20	Ufer2	1.5	0	3	<input checked="" type="checkbox"/>
21	Ufer3	1.5	0	3	<input checked="" type="checkbox"/>

Abbildung 7-4: Eigenschaftfenster der Geländebruchkanten

Nach vollständiger Eingabe aller Bruchkanten und deren Parameter muss das *Mesh* neu erzeugt werden, um die Bruchkanten dort zu integrieren. Dies geschieht erneut über das Eigenschaftfenster des Layers *Perimeter* (Rechtsklick und Auswahl von *Edit 2D Area Properties*) und Auswahl der Schaltfläche *Generate Computation Points with All Breaklines* (s. Abbildung 7-2), bzw. ab Version 6.3.1 Aktivieren von *Include Breaklines / Refinement Regions* und Auswahl von *Generate Computation Points*. Anschließend wird das Berechnungsnetz durch Beenden des Bearbeitungsmodus gespeichert. (HEC, 2022f)

7.2.3 Verfeinerungszonen

Das Erstellen von Verfeinerungszonen erfolgt analog zum Erstellen von *Breaklines*, jedoch im Bearbeitungsmodus des Unterlayers *Refinement Regions*. Es werden ganze Polygone mit einer bestimmten Zellgröße definiert. Die Ränder der Gebiete fungieren als *Breaklines*. Auch hier kann über *Open Attribute Table* je Feature ein Wert für *Near Repeats* und *Far Spacing* festgelegt sowie *Enforce 1 Cell Protection Radius* (de-)aktiviert werden. Das Angeben der Zellgröße innerhalb einer *Refinement Region* erfolgt in den Spalten *Cell Size X* und *Cell Size Y*. Der Wert in der Spalte *Perimeter Spacing* gibt die Zellgröße entlang des Randes der Verfeinerungszone an, analog zum Wert *Near Spacing* für *Breaklines*. Über *Refinement Regions* können Zonen mit kleineren, aber auch größeren Zellen festgelegt werden. Analog zu den Bruchkanten müssen auch Verfeinerungszonen ins Berechnungsnetz integriert werden, indem dieses, wie oben beschrieben, neu generiert wird. (HEC, 2022f)

7.2.4 Manuelles Nacharbeiten

Beim Neugenerieren des Berechnungsnetzes mit Bruchkanten ist es möglich, dass verschiedene Fehlermeldungen erscheinen (s. bspw. Abbildung 7-5). In HEC-RAS sind Zellen mit maximal 8 Seiten zulässig. Vor allem in Übergangsbereichen zwischen *Perimeter*, *Breaklines* und *Refinement Regions* ist es möglich, dass diese Regel nicht eingehalten werden kann. Ist dies bei zu vielen Zellen der Fall, sollten die Eigenschaften der Features (*Near Spacing*, *Near Repeats* und *Far Spacing*) angepasst werden, um die Zahl der betroffenen Zellen zu reduzieren. Anschließend muss das Mesh neu generiert werden.

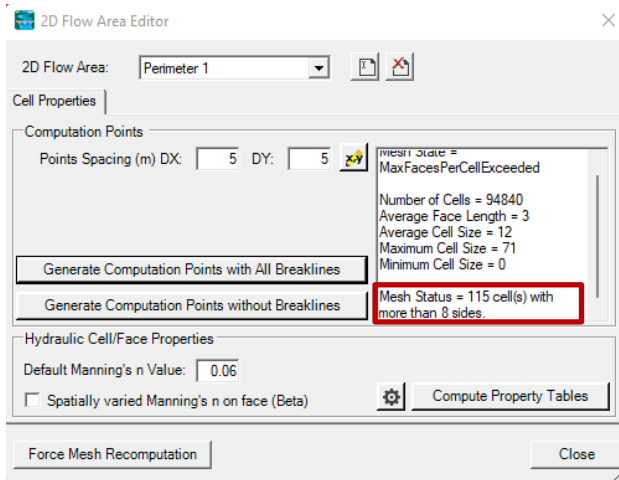


Abbildung 7-5: Error wegen zu hoher Seitenzahl der Zellen im Eigenschaftenfenster des Berechnungsnetzes

Wurde die Zahl der Zellen mit Error reduziert, können die verbleibenden Fehlermeldungen manuell behoben werden. Dazu muss das Fenster geschlossen werden und der Unterlayer *Computation Points* ausgewählt werden. Die rot markierten Punkte (s. Abbildung 7-6 links), markieren die Zellzentren, deren Zellen zu vielen Seiten besitzen. Es ist zu beachten, dass die Zellzentren nicht die rechnerischen Mittelpunkte der Zellen darstellen. Anhand der Lage der Zellzentren werden jedoch die Kanten der Zellen generiert (HEC, 2022e). Es werden nun mit den bekannten Werkzeugen neue Berechnungspunkte (englisch: *Computation Points*) gesetzt oder bestehende Berechnungspunkte verschoben, sodass diese maximal 8 Seiten haben und die roten Markierungen verschwinden (s. Abbildung 7-6 rechts). (The RAS Solution, 2018a)

Liegen keine rot markierten Zellen mehr vor, kann der Bearbeitungsmodus beendet und das *Mesh* gespeichert werden. Ist anschließend der Layer *2D Flow Area* mit einem roten Sternchen markiert und kursiv geschrieben, bedeutet dies, dass noch Zellen mit einer Fehlermeldung vorliegen. Diese müssen gefunden und wie oben beschrieben korrigiert werden. Eine Simulation kann nur mit einem fehlerfreien Berechnungsnetz durchgeführt werden.

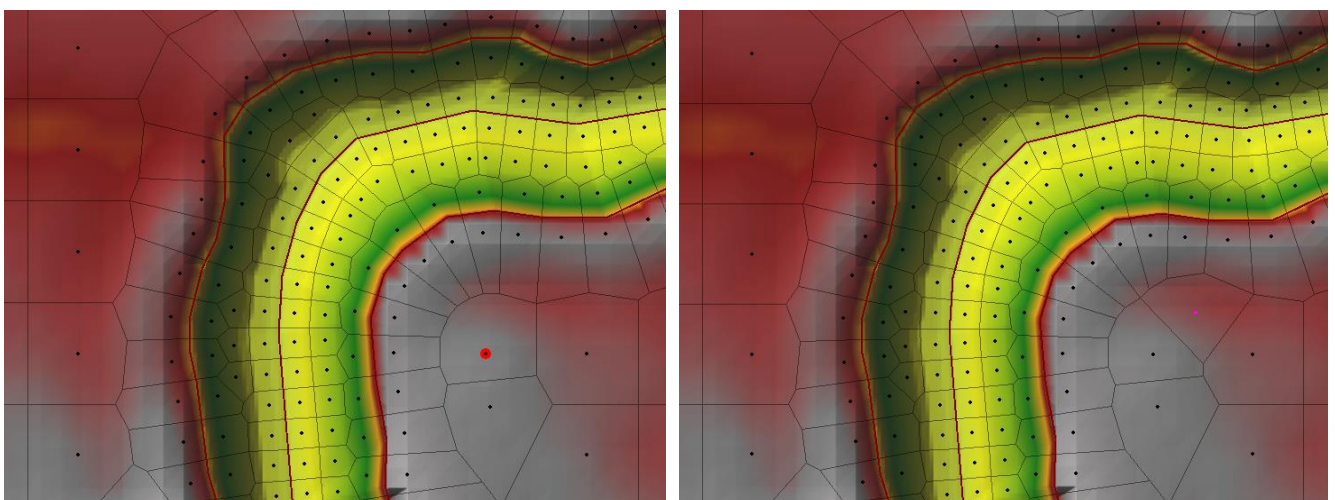


Abbildung 7-6: Links: Zelle mit Error aufgrund zu vieler Kanten, rechts: Zelle mit behobenem Error

Ein weiterer möglicher Fehler bei der Netzgenerierung ist in Abbildung 7-7 dargestellt. Es ist möglich, dass nicht alle Stellen einer Bruchkante einwandfrei als solche im *Mesh* umgesetzt werden. Bei der Bruchkante der Verfeinerungsregion in Abbildung 7-7 links handelt es sich bei der rechten unteren Ecke der Bruchkante um keine Außenkante einer Zelle. Eine Zelle außerhalb der Zone schneidet die Verfeinerungszone. Auch solche Fehler können durch Neusetzen oder Verschieben von *Computation Points* behoben werden. In den meisten Fällen wird die Bruchkante bei einem manuellen Nacharbeiten als solche erkannt und korrigiert. Kann der Fehler nicht durch Bearbeiten der *Computation Points* behoben werden, was häufig bei zu nah beieinanderliegenden *Breaklines* der Fall ist, sollte die Anordnung der Bruchkanten oder deren Eigenschaften überarbeitet werden.

Nach der Generierung des *Meshs* ist es aufgrund der möglichen Fehler demnach wichtig, das Berechnungsnetz und alle Geländebruchkanten gründlich zu kontrollieren und Fehler zu beheben. Vor allem bei Bruchkanten an Deichen oder Geländeerhöhungen, die ein bestimmtes Gebiet vor dem Überfluten schützen, kommt es darauf an, dass die *Breaklines* fehlerfrei sind. Es sind zudem einige weitere Fehlermeldungen möglich, welche gemeinsam mit Lösungsvorschlägen im „HEC-RAS 2D User's Manual“ aufgeführt sind (HEC, 2022e, pp. 61-66).

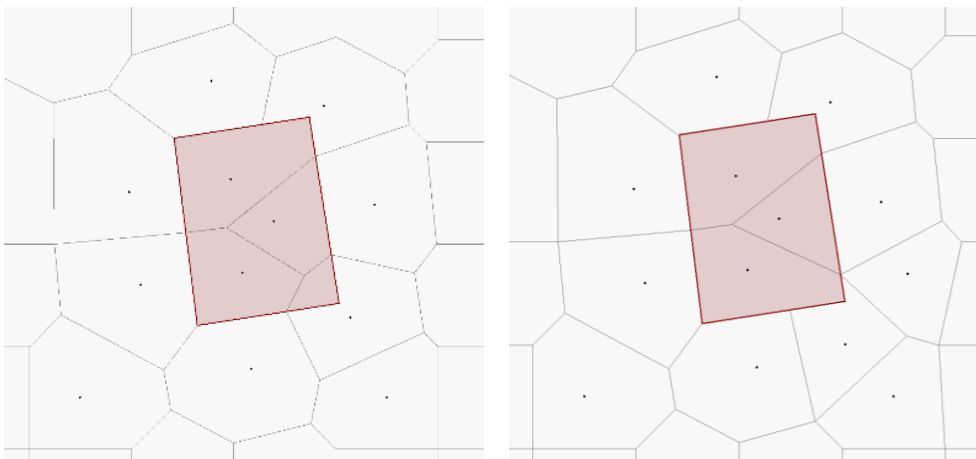


Abbildung 7-7: Links: Verfeinerungszone mit fehlerhafter Bruchkante, rechts: Korrigierte Bruchkante

Das Generieren des Berechnungsgitters kann einige Zeit in Anspruch nehmen und sollte nicht vernachlässigt werden, da ein gutes *Mesh* die Grundlage einer repräsentativen Simulation ist. In einigen Fällen reicht zudem das Bearbeiten der *Computation Points* nicht aus und eine andere Herangehensweise an die Netzmodifizierung muss in Betracht gezogen werden. Beispielsweise kann zwischen den beiden Optionen einer Verfeinerungszone oder einer *Breakline* mit *Near Repeats* gewechselt werden. Nah beieinanderliegende Bruchkanten oder *Refinement Regions* können durch Zusammenlegen mehrerer Features oder Löschen eines der beiden Features das Mesh verbessern. Probleme und deren Lösungsansätze können jedoch je nach Fall stark variieren.

Letztlich muss das *Mesh* nach der ersten Simulation erneut kontrolliert werden. Es sollten beispielsweise Stellen mit hohen Fließgeschwindigkeiten und Beschleunigungen identifiziert werden, um zu kontrollieren, ob die Courant-Bedingung (s. Abschnitt 10.1) erfüllt ist. Auch die Undurchlässigkeit von Deichen sollte überprüft werden. Ist diese nicht gewährleistet, kann die Ursache hierfür auf eine fehlerhafte *Breakline* zurückgeführt werden. Durch diese Vorgehensweise ist das Generieren des Berechnungsnetzes ein iteratives Verfahren.

Im Beispielprojekt wird in erster Linie mit *Breaklines* gearbeitet. Als Bruchkanten werden die Bahntrasse, größere Straßen, erhöhte Wege sowie die Ufer definiert. Zudem werden die Gewässermittellinien als *Breaklines* mit einigen *Near Repeats* definiert, damit sich innerhalb des Gewässerlaufes die Zellen in Fließrichtung ausrichten. Verfeinerungen mithilfe des *Near Spacing* Wertes werden vor allem für die Ufer- und Gewässerlinien verwendet. Ein Ausschnitt des damit generierte *Meshs* ist in Abbildung 7-8 zu sehen. Die verwendeten Parameter für die Bruchkanten im Beispielprojekt sind in Tabelle 7-1 aufgelistet.

Tabelle 7-1: Im Beispielprojekt verwendete Parameter für Bruchkanten

Bruchkante	<i>Near Spacing</i>	<i>Near Repeats</i>	<i>Far Spacing</i>	<i>Enforce 1 Cell Protection Radius</i>
Ufer	1 m	-	-	x
Gewässer	1 m	1 oder 2	-	x
Bahntrasse	-	-	-	✓
Straßen/Wege	-	-	-	✓

Verfeinerungszonen können genutzt werden, um im DGM vorhandene Gebäude ins Berechnungsgitter zu integrieren und Bruchkanten entlang der Gebäudeumrisse zu erzeugen. Da dies in der Simulationspraxis jedoch zu Instabilitäten in den benachbarten Zellen führt, wird hierauf verzichtet. Durch die Abbildung der Gebäude im Terrain und die damit einhergehenden *Property Tables* der Berechnungszellen ist eine realistische Berechnung an Zellen, die sowohl Gebäude als auch die umliegende Fläche beinhalten, trotzdem gewährleistet.

Die Parameter der Bruchkanten im Beispielprojekt müssen mehrfach angepasst werden, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt wird. Zuletzt ist ein manuelles Nacharbeiten an einigen Stellen notwendig, um alle *Breaklines* in Gänze darzustellen und sämtliche Errormeldungen zu beheben.

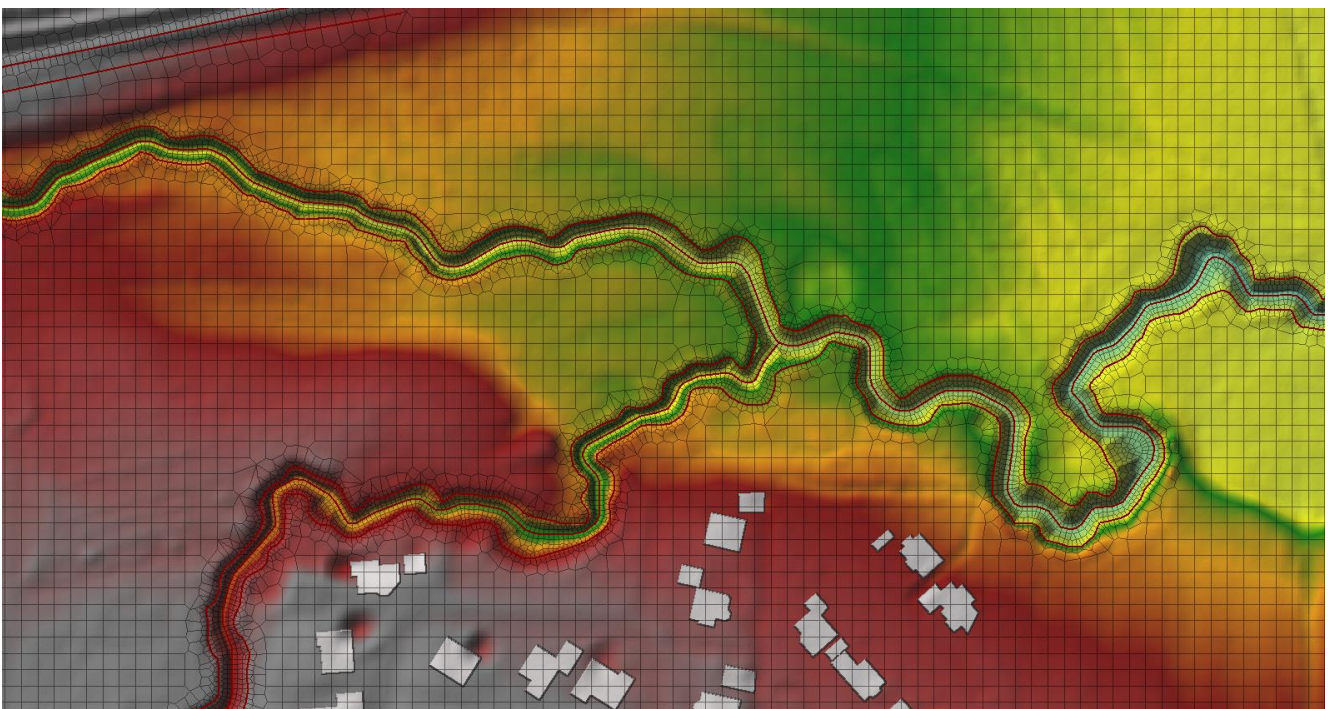


Abbildung 7-8: Ausschnitt des im Beispielprojekt erzeugten Berechnungsnetzes

8 Wasserbauwerke

In HEC-RAS geschieht die Modellierung von Wasserbauwerken nicht zwangsweise mittels der sonst verwendeten 2D-Fließformeln (s. Abschnitt 10.2.2). Stattdessen wird der Durchfluss von den Zellen des *Meshs* auf der einen Seite eines Bauwerks zu den Zellen auf der anderen Seite des Bauwerks mithilfe von eindimensionalen Gleichungen berechnet. Auf diese Weise werden Bauwerke wie zum Beispiel Brücken oder Rohrleitungen letztlich durch lokale Fließverluste dargestellt. Hierbei werden Verluste, die durch die Strömungsbeeinflussung unmittelbar vor und nach einem Wasserbauwerk entstehen, ebenso berücksichtigt wie die Verluste innerhalb des Bauwerks. Da die eindimensionalen Bauwerksgleichungen die Zellen des 2D-*Meshs* verbinden, um den zellenübergreifenden Durchfluss zu berechnen, ist eine vorherige Netzgenerierung notwendig. Die *2D Flow Area*, welche die zu verbindenden Zellen beinhaltet, kann so bei der Modellierung von Wasserbauwerken direkt angegeben werden und muss nicht nachträglich ergänzt werden (HEC, 2022e). Im Folgenden wird das Vorgehen für die Implementierung häufig vorkommender Bauwerke wie Brücken, Durchlässe und Wehre erläutert. Die Einbindung einer Reihe weiterer Bauwerke ist in HEC-RAS ebenso möglich. Da diese jedoch überwiegend analog zu den Vorgestellten erfolgt, wird hier auf eine detaillierte Darstellung aller Möglichkeiten verzichtet. Auch hier muss beachtet werden, dass alle Anpassungen im *Geometric Data* Fenster manuell über *File – Save Geometry Data* gespeichert werden sollten. (HEC, 2022g)

Optional kann Kapitel 8 „Wasserbauwerke“ erst nach Kapitel 10 „2D-Strömungssimulation“ bearbeitet werden. So kann eine Testsimulation mit geringen Durchflüssen und einer kurzen Rechendauer erstellt werden, welche nach der Modellierung einzelner Wasserbauwerke gestartet werden kann. Sind Fehler unterlaufen, wird der Nutzer vor der Simulation darauf hingewiesen und kann die entsprechenden Korrekturen direkt durchführen. Auch Instabilitäten in den Berechnungen der Wasserbauwerke zeigen sich meist bereits nach einer kurzen Simulationsdauer.

8.1 Wehre

Der erste Schritt zur Modellierung eines Wehres, ist das Zeichnen einer Mittellinie. Wichtig ist hierbei, dass diese Mittellinien immer von links nach rechts nach Unterstrom schauend gezeichnet werden, da HEC-RAS so die Ober- und Unterwasserseite (englisch: *Headwater* und *Tailwater*) festlegt. Die Wehrmittellinie darf zudem nicht niedriger liegen als die minimale Geländehöhe einer anliegenden Zelle des *Meshs*. Das bedeutet, dass der Anfangs- und Endpunkt des Wehres auf der Geländehöhe des Bauwerks liegen sollten. So liegt das Wehr später oberhalb des Geländes. Das Zeichnen der Mittellinie kann entweder im *RAS-Mapper* oder im *Geometric Data* Fenster geschehen. (HEC, 2022e), (The RAS Solution, 2018d)

- Im *RAS-Mapper* geschieht das Zeichnen von Wehrmittellinien im Unterlayer *SA/2D Connections* der Geometrie, in der auch das *Mesh* erstellt wurde. Das Zeichnen oder Importieren der Linie geschieht auf die bekannte Weise, wenn der Layer ausgewählt ist. Über Rechtsklick auf die gezeichnete Linie und Auswahl von *Plot Terrain Profil*, kann der Geländequerschnitt über die Mittellinie hinweg dargestellt werden. In dieser Darstellung, bzw. bei Auswahl des Reiters *Table* im neuen Fenster, kann überprüft werden, ob die Anfangs- und Endpunkte auf der gewünschten Höhe des Wehres liegen oder ob diese weiter angepasst werden müssen. Per Rechtsklick auf das Feature und Auswahl von *Edit SA2D Conn* öffnet sich das in Abbildung 8-1 links dargestellte

Fenster. Hier kann das Wehr benannt werden und dessen Breite sowie eine Beschreibung angegeben werden. Im Dropdown Menü wird der Bauwerkstyp gewählt:

- Die Option *Weir, Gates, Culverts, Outlet RC and Outlet TS* wird gewählt für Wehre, Wehröffnungen, Durchlässe und Durchfluss anhand von Wasserstand-Durchfluss-Beziehungen (englisch: *Rating Curves*) oder anhand von Zeitreihen (englisch: *Time Series*).
- Die Option *Linear Routing* wird gewählt für eine lineare Weitergabe des Durchflusses anhand eines konstanten Verhältnisses. Die Option steht jedoch für 2D-Untersuchungsgebiete nicht zur Verfügung (HEC, 2022d).
- Für Brücken wird die Option *Bridges (Internal to 2D Flow Area)* gewählt.

Anschließend werden diese Angaben gespeichert und das in Abbildung 8-1 rechts dargestellte Fenster per Rechtsklick auf das Feature und Auswahl von *Edit 2D Connection Breakline Properties* geöffnet. Da die Bauwerksmittellinie, wie oben beschrieben, mittels eindimensionaler Berechnung die Zellen vor und hinter dem Bauwerk verknüpft, dürfen diese nicht über die Linie hinausragen. Die Mittellinie wird demnach als Bruchkante im *Mesh* definiert. Die möglichen Eigenschaften der *Breakline* werden im Fenster in Abbildung 8-1 rechts angegeben (s. Abschnitt 7.2.2). Die Zellen um ein Wehr sollten jedoch nicht zu klein gewählt werden, da es bei einem Wehrüberfall zu hohen Fließgeschwindigkeiten kommen kann. Sind die Zellen zu klein, kann das zu Instabilitäten in der Berechnung führen. Anschließend wird die Bruchkante über Rechtsklick auf das Feature und Auswahl von *Enforce 2D Connection as Breakline* nachträglich ins Berechnungsnetz integriert. Auch hier können Fehler im Mesh entstehen, die nach Abschnitt 7.2.4 korrigiert werden müssen. (HEC, 2022e)

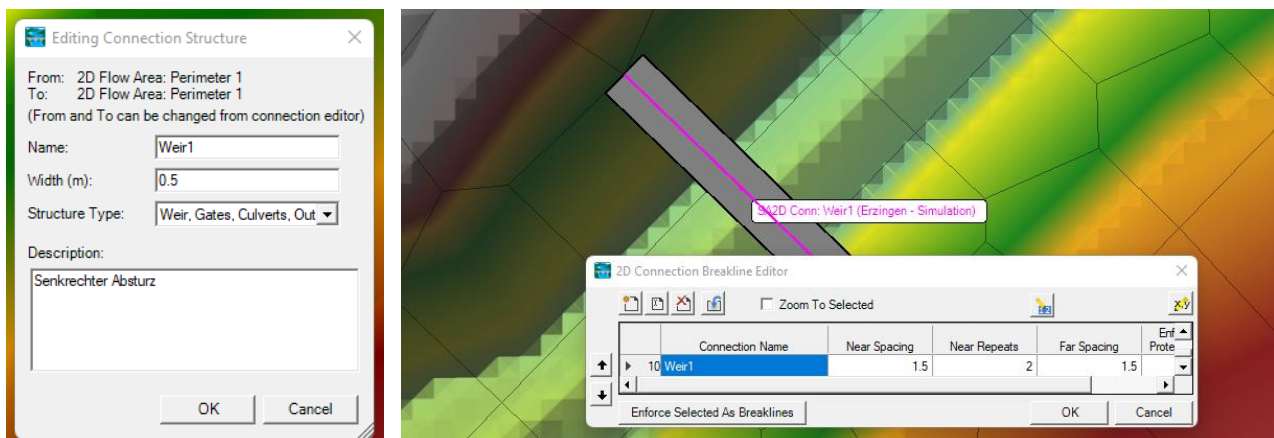


Abbildung 8-1: Bearbeitungsfenster zur Erstellung einer Wehrmittellinie im *RAS-Mapper*. Links: Angaben zum Wehr, rechts: Angaben zur Bruchkante

- Im *Geometric Data* Fenster kann die Bauwerksmittellinie nach Auswahl der Schaltfläche *SA/2D Conn* unter *Tools* (s. Abbildung 8-2 oben) gezeichnet werden. Im Reiter *GIS Tool – Storage Area/2D Flow Area Connection Centerline Table* können zudem die Koordinaten der gezeichneten Linie angepasst werden. In diesem Fenster ist weiterhin über die Schaltfläche *Import Lines* ein Import schon bestehender Wehrmittellinien als *.shp-Datei möglich, jedoch nur, wenn bereits mindestens eine Mittellinie existiert. Ist die Linie gezeichnet, muss diese als Bruchkante festgelegt werden. Dazu wird per Linksklick auf das Feature *Edit Internal Connection (Break Line) Cell*

Spacing ausgewählt. Der Wert *Minimum* entspricht dem Wert *Near Spacing*, der Wert *Maximum* dem Wert *Far Spacing*. Die Option *Near Repeats* ist hier nicht verfügbar. Anschließend wird die *Breakline* per Linksklick und Auswahl von *Enforce Internal Connection as Breakline in 2D Flow Area* erstellt. (The RAS Solution, 2018d)

Ist die Bauwerksmittellinie gezeichnet und als Bruchkante festgelegt, wird das Bauwerk selbst bearbeitet. Dazu wird das Fenster in Abbildung 8-2 entweder über die Schaltfläche *SA/2D Conn* unter *Editors* (s. Abbildung 8-2 links) oder per Linksklick auf das Feature und Auswahl von *Edit Connection* geöffnet.

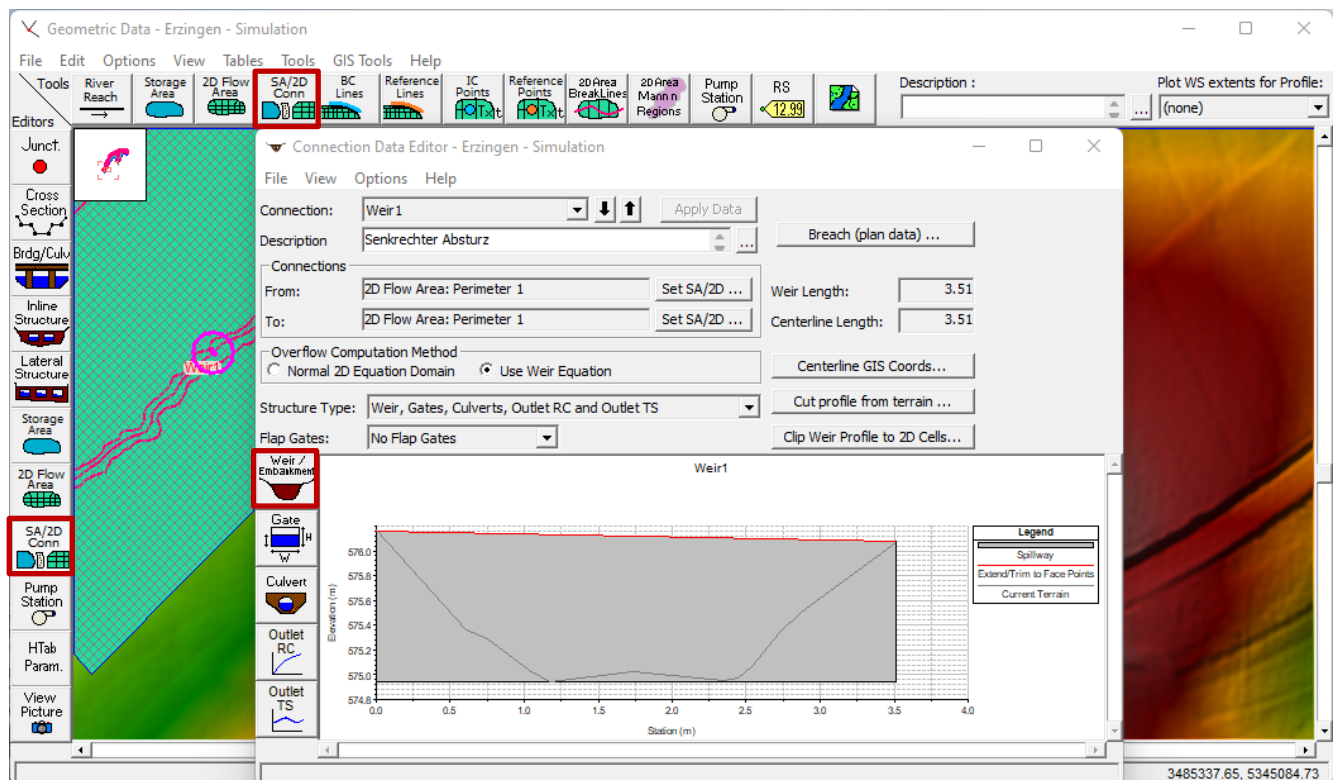


Abbildung 8-2: Bearbeitungsfenster zur Erstellung eines Wehres im *Geometric Data* Fenster

Im Bearbeitungsfenster kann über das Dropdown Menü und die Pfeil Schaltflächen in der obersten Zeile das gewünschte Wehr ausgewählt werden. Darunter kann die Beschreibung des Bauwerks angegeben oder angepasst werden. Im Bereich *Connections* wird das Berechnungsnetz angegeben, dessen Zellen vor und nach dem Bauwerk per 1D-Gleichung verbunden werden sollen. Wurde vor Erstellen des Bauwerks kein *Mesh* generiert, muss dieses hier vor einer Simulation für jedes Bauwerk ausgewählt werden. Besteht das *Mesh* bereits, wird das umliegende Berechnungsnetz als Standard von HEC-RAS ausgewählt.

Im Bereich *Overflow Computation Method* kann die gewünschte Berechnungsmethode des Wehres gewählt werden. Bei Auswahl von *Normal 2D Equation Domain* wird die zweidimensionale Fließformel verwendet (s. Abschnitt 10.2.2). Ist *Use Weir Equation* ausgewählt, wird die folgende Formel für einen Wehrüberfall verwendet: (HEC, 2022e), (HEC, 2022g)

$$Q = C \cdot L \cdot H^{3/2} \quad (8-1)$$

Hierbei ist L [m] die Länge der Überfallkrone, H [m] die Energiehöhe über der Wehroberkante im Oberstrom und C [$m^{1/2}/s$] der Wehrkoeffizient, welcher im weiteren Verlauf definiert wird (HEC, 2022g). Für hohe Wehrüberfälle, bei denen Wasser in freien Fall geraten kann, sollte die Wehrüberfallgleichung verwendet werden, da die normale 2D-Fließformel nicht in der Lage ist, diesen Fall stabil zu berechnen (HEC, 2022e).

Im Dropdown Menü hinter *Structure Type* wird die Bauwerksart gewählt. Die Auswahl ist dieselbe wie die im *RAS-Mapper*. Im Bereich *Flap Gates* kann eine Rückstauklappe, welche einen Rückfluss in eine beliebige Richtung verhindert, aktiviert werden. Über die Schaltflächen *Cut profile from terrain* und *Clip Weir Profile to 2D Cells*, kann die Wehrhöhe auf die Geländehöhe bzw. die Zelhöhe gelegt werden. Diese Funktionen können beispielsweise genutzt werden, falls ein Wehr bereits im Gelände abgebildet ist, aber trotzdem mit der Wehrüberfallgleichung berechnet werden soll. *Cut profile from terrain* ist zudem notwendig, falls die Lage der Mittellinie des Wehres verändert wurde. Die Änderung muss auf diese Weise manuell übertragen werden.

Im nächsten Schritt werden die Eigenschaften des Wehres über die Schaltfläche *Weir/Embankment* bearbeitet (s. Abbildung 8-2 Mitte). Es öffnet sich das in Abbildung 8-3 dargestellte Fenster. Hier wird zunächst die Breite des Wehres (englisch: *Weir width*) angegeben. In der Tabelle im rechten Bereich wird eine Querschnittsgeometrie der Wehrkrone angegeben. Die Länge dieses Querschnitts muss dieselbe Länge besitzen wie die Länge der Wehrmittellinie, weshalb als letzte Zahl in der Spalte *Station* der Wert aus *Centerline Length* (s. Abbildung 8-2 rechts) kopiert werden kann (The RAS Solution, 2018d). Die zugehörigen Werte in der Spalte *Elevation* dürfen nicht unterhalb des Geländes liegen (HEC, 2022e). Die eingegebene Wehrgeometrie wird nach dem Schließen des Fensters im Diagrammbereich des Fensters in Abbildung 8-2 eingeblendet. Dort kann die Wehrhöhe im Vergleich zum Gelände kontrolliert werden.

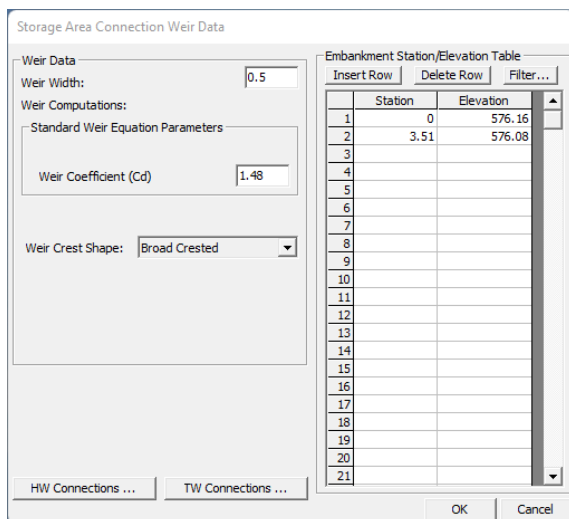


Abbildung 8-3: Fenster zur Bearbeitung der Geometrie eines Wehres

Im Dropdown Menü hinter *Weir Crest Shape* kann die Form der Wehrkrone im Längsschnitt gewählt werden. Hier gibt es zwei Möglichkeiten:

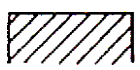
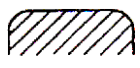




- Breitkroniges Wehr (englisch: *Broad crested*) (s. Tabelle 8-1, Zeile 1 und 2)
- Ausgerundetes Wehr (englisch: *Ogee*) (s. Tabelle 8-1, Zeile 3 bis 5)

Für die Berechnung des Wehrüberfall ist die Angabe der Wehrform jedoch irrelevant. Die Wehrform wird lediglich berücksichtigt, sobald ein unvollständiger Abfluss vorliegt, also eine Beeinflussung durch das Unterwasser entsteht. In diesem Fall wird der unvollständige Wehrüberfall je nach Wehrform mit unterschiedlichen Formeln berechnet (HEC, 2022g). An dieser Stelle ist die Auswahl eines scharfkantigen Wehres nicht möglich. Ist dies gewünscht, muss im Bereich Wehröffnung die *Overflow* Option gewählt werden (s. Abschnitt 8.1.2). Die Form des Wehres wird für die Berechnung des Wehrüberfalls mithilfe des Wehrkoeffizienten C aus Gleichung (8-1) berücksichtigt (HEC, 2022d). Dieser besitzt die Einheit $m^{1/2}/s$, weshalb Werte, die in den HEC Dokumentationen empfohlen werden, zunächst mithilfe des Umrechnungsfaktors 0,552 in SI Einheiten umgerechnet werden müssen (Goodell, 2016). Dieser lässt sich aus dem Überfallbeiwert μ [-] (englisch: *Discharge coefficient*, C_d) nach folgender Formel mit der Erdbeschleunigung g [m/s^2] berechnen (Bollrich, 2013), (Goodell, 2016):

$$C = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2g} \quad (8-2)$$

Der Wehrkoeffizient C wird für ein zu modellierendes Wehr im Fenster in Abbildung 8-3 hinter *Weir Coefficient* angegeben. Dieser ist im selben Fenster fälschlicherweise mit C_d bezeichnet. Es wird jedoch nicht der Überfallbeiwert μ dort eingegeben, sondern der Wehrkoeffizient C (Goodell, 2016). Typische Überfallbeiwerte sowie Wehrkoeffizienten sind Tabelle 8-1 zu entnehmen.

Tabelle 8-1: Typische Abflusskoeffizienten und Überfallbeiwerte für unterschiedliche Wehrformen (Lattermann, 2005)

	Wehrform	Bezeichnung	Überfallbeiwert $C_d = \mu$ [-]	Wehrkoeffizient C [$m^{1/2}/s$]
1		Breitkronig (englisch: <i>Broad crested</i>), scharfkantig	0,49 bis 0,51	1,45 bis 1,51
2		Breitkronig (englisch: <i>Broad crested</i>), abgerundet	0,50 bis 0,55	1,48 bis 1,62
3		Ausgerundet (englisch: <i>Ogee</i>)	0,72 bis 0,75	2,13 bis 2,21
4		Ausgerundet (englisch: <i>Ogee</i>) mit umgelegter Klappe	0,65 bis 0,73	1,92 bis 2,16
5		Dachförmig ausgerundet	0,78 bis 0,81	2,30 bis 2,39
6		Scharfkantig (englisch: <i>Sharp crested</i>)	0,62 bis 0,68	1,83 bis 2,01

Im Beispielprojekt wird ein senkrechter Absturz mithilfe eines Wehres modelliert. Aufgrund zu grober Zellgrößen im Geländemodell des Gewässerlaufs ist die genaue Darstellung eines senkrechten Absturzes nicht mithilfe des *Terrains* möglich. Zudem ist die Berechnung aufgrund des hohen Gefälles und der erhöhten Fließgeschwindigkeiten mithilfe der Wehrformel stabiler als mit den 2D-Fließformeln. Die Wehrmittellinie wird im *RAS-Mapper* gezeichnet und so gelegt, dass Anfangs- und Endpunkt auf der Geländehöhe liegen, die der des Wehres entspricht. Es wird eine Breite von 0,5 m gewählt. Die verwendeten Eigenschaften der Bruchkante sind: *Near Spacing* 1 m (also die Zellgröße aller Zellen im Gewässerlauf), 2 *Near Repeats* sowie *Far Spacing* 1 m. Das Wehr wird als breitkroniges Wehr mit einem Wehrkoeffizienten von $1,48 m^{1/2}/s$ modelliert.

8.1.1 Durchlässe

Die Voraussetzung zur Erstellung von Durchlässen (englisch: *Culverts*) oder Ähnlichem ist das Vorhandensein eines Wehres (HEC, 2022e). Der erste Schritt zur Modellierung ist also die Erstellung eines Wehres nach Abschnitt 8.1. Anschließend muss eine Mittellinie für den Durchlass gezeichnet oder importiert werden (The RAS Solution, 2018d). Die Mittellinie muss von Ober- nach Unterstrom gezeichnet werden (HEC, 2022e). Das Zeichnen kann entweder im *RAS-Mapper* oder im *Geometric Data* Fenster geschehen:

- Im *RAS-Mapper* kann eine Mittellinie eines Durchlasses im Bearbeitungsmodus des Layers *Culvert Barrels*, ein Unterlayer von *SA/2D Connections*, gezeichnet werden. Diese muss ein vorhandenes Wehr kreuzen. Das zugehörige Wehr wird automatisch ausgewählt. Alle Werte im Bearbeitungsfenster können später angepasst werden, wenn die genauen Angaben zum Durchlass definiert werden. Vorteil der Methode ist, dass die Höhen von Ein- und Auslass (*Inlet Elev* und *Outlet Elev*) mit den minimal möglichen Werten anhand des Geländemodells automatisch angegeben werden.
- Im *Geometric Data* Fenster können vorhandene Mittellinien im *.shp-Format importiert werden. Dies geschieht über den Reiter *GIS Tool – Culvert Centerlines – Import Barrel Centerline* (The RAS Solution, 2018d). Die zu importierende Linie muss ebenfalls ein vorhandenes Wehr kreuzen. Ist dies der Fall, wird es diesem automatisch zugeordnet.

Ist die Mittellinie gezeichnet, wird der Durchlass bearbeitet. Dazu wird wie in Abschnitt 8.1 die Schaltfläche *SA/2D Conn* unter *Editors* (s. Abbildung 8-2 links) gewählt. Im Bearbeitungsfenster zur Erstellung eines Wehres wird anschließend die Schaltfläche *Culvert* (s. Abbildung 8-4 rechts) gewählt (HEC, 2022e). Es öffnet sich das Bearbeitungsfenster für Durchlässe, welches in Abbildung 8-4, links zu sehen ist. Im Bearbeitungsfensters des Wehres (s. Abbildung 8-4 rechts) wird nach Angabe aller Werte der Durchlass grafisch dargestellt.

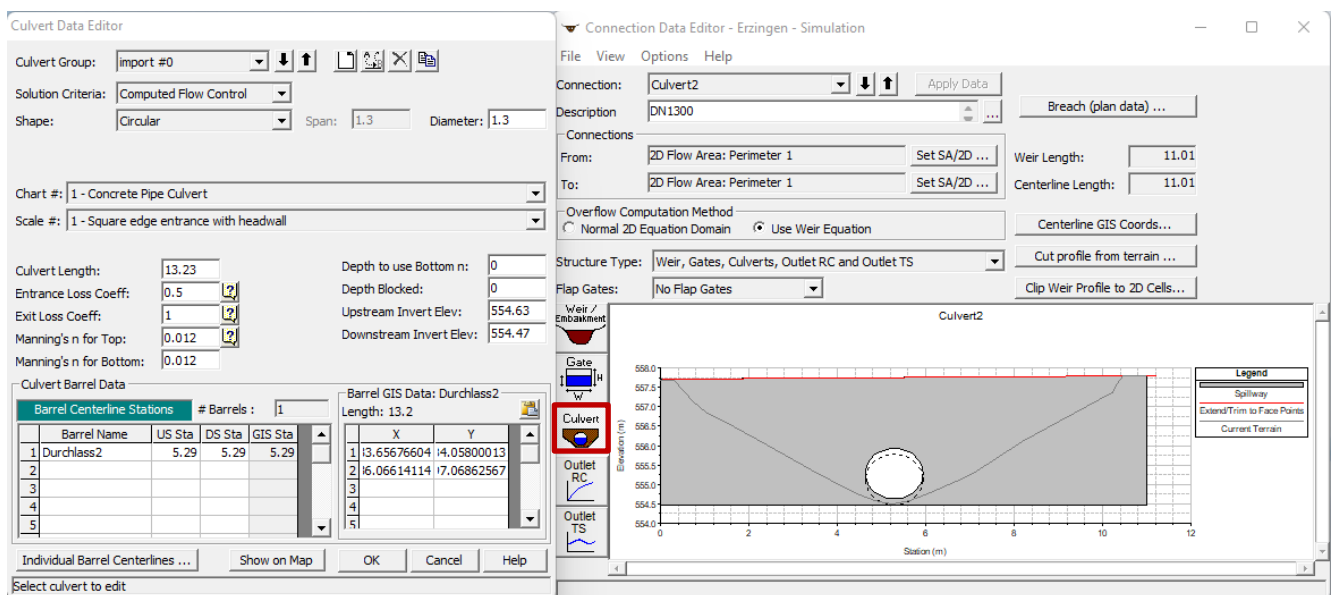


Abbildung 8-4: Links: Bearbeitungsfenster zur Erstellung eines Durchlasses, rechts: Bearbeitungsfenster zur Erstellung eines Wehres

Die Zuordnung zu einer *Culvert Group* im ersten Dropdown Menü geschieht zunächst automatisch. Sollen mehrere Durchlässe mit denselben Eigenschaften an einem Wehr hinzugefügt werden, sollten sich diese in derselben *Culvert Group* befinden. Sind Durchlässe unterschiedlich, müssen sie unterschiedlichen Gruppen zugeordnet werden. Es sind 10 unterschiedliche Gruppen mit je 25 identischen Durchlässen möglich (HEC, 2022g). Die Option *Computed Flow Control* im Dropdown Menü *Solution Criteria* kann meist unverändert belassen werden. Bei dieser Option wird der Ein- und Auslass berechnet und der höhere Wert verwendet. Es kann jedoch auch direkt einer dieser beiden Werte gewählt werden. In der folgenden Tabelle sind die Parameter aufgelistet, welche im Durchlass-Bearbeitungsfenster angegeben werden können. (HEC, 2022d)

Tabelle 8-2: Parameter zur Spezifizierung von Durchlässen (HEC, 2022g), (HEC, 2022d)

Bezeichnung	Beschreibung	Empfohlene Wertebereiche im „Hydraulic Reference Manual“
<i>Shape</i>	Querschnittsform des Durchlasses. In den Textfeldern hinter <i>Shape</i> werden die Abmessungen angegeben.	Seite 197 Seiten 216 f.
<i>Chart</i> und <i>Scale</i>	<i>Chart</i> : Gibt die Art des Durchlasses an. <i>Scale</i> : Gibt die Art des Durchlasseinlaufs an.	Seiten 222 ff. Insb. Tabelle 6-6
<i>Entrance/Exit Loss Coeff</i>	<i>Entrance/Exit Loss Coeff</i> : Dimensionsloser Wert zwischen 0 und 1, der den Energieverlust durch den Ein- und Auslass darstellt.	Einlass: Seiten 221 f. Auslass: Seite 222 (i. d. R. = 1)
<i>Manning's n</i>	Rauheit der Rohrwand abhängig von ihrer Art und Beschaffenheit (<i>Top</i> : oben, <i>Bottom</i> : unten). Wird für <i>Bottom</i> ein anderer Wert als für <i>Top</i> angegeben, muss im Fenster <i>Depth to use Bottom n</i> die Höhe angegeben werden, bis zu der der Wert in <i>Bottom</i> gilt.	Seiten 218 ff.

Weiterhin wird hinter *Culvert Length* abhängig von der gezeichneten Mittellinie die Länge der Rohrleitung automatisch angegeben. Diese kann unverändert belassen werden. *Depth Blocked* gibt einen Bereich bis zu einer bestimmten Höhe im unteren Teil des Durchlasses an, der nicht durchflossen werden kann. Dies kann z. B. bei Ablagerungen verwendet werden. Die Angaben *Upstream* und *Downstream Invert Elev* geben die Höhen für Einlass (*Upstream*) und Auslass (*Downstream*) an. Diese müssen oberhalb der Geländehöhe liegen. In der Tabelle unten links sind zudem die Angaben *US Sta* (*Upstream Station*) und *DS Sta* (*Downstream Station*) zu treffen. In der Zelle *GIS Sta* wird die *Station* also die Querschnittsposition des Durchlasses in der Wehrmittellinie angegeben. Kreuzt der Durchlass das Wehr orthogonal, kann in allen drei Zellen derselbe Wert angegeben werden. Ist dies nicht der Fall, kann hier für die Position des Ein- und Auslasses relativ zum Wehr die jeweilige *Station* angegeben werden. Dies ist exemplarisch in Abbildung 8-5 zu sehen. Im Bereich *Barrel GIS Data* können die Koordinaten der Mittellinie des Durchlasses verändert werden.

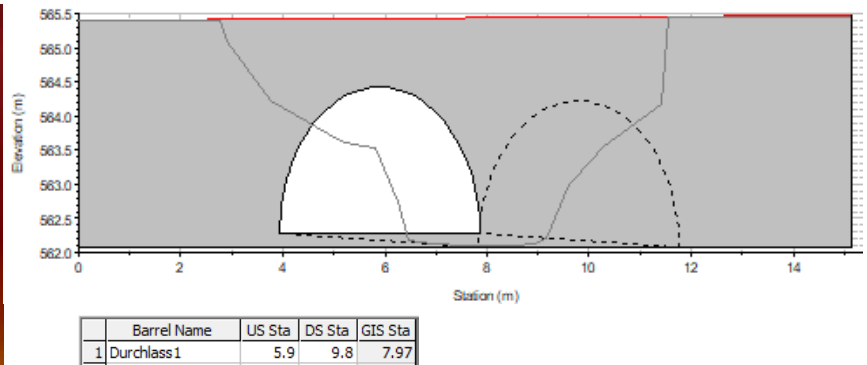
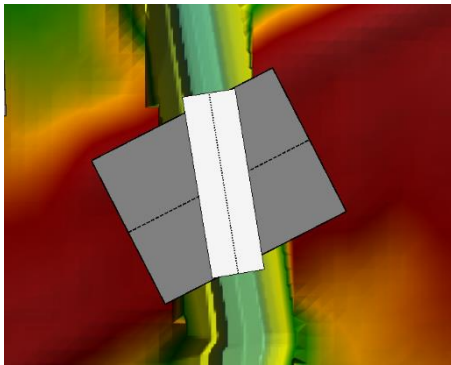


Abbildung 8-5: Durchlass mit unterschiedlicher *Upstream Station* und *Downstream Station*

Im vorgeführten Beispielprojekt Erzingen sind drei Durchlässe vorhanden. In Tabelle 8-3 ist beispielhaft dargestellt, wie Durchlässe aus der Realität mithilfe der verschiedenen Parameter in HEC-RAS modelliert werden können.

Tabelle 8-3: Im Beispielprojekt modellierte Durchlässe im Vergleich zu Bildern der Bauwerke

Foto Realität	Eigenschaften Modell
	Shape: Arch Span: 3.93 Rise: 2.14 Chart #: 42- Arch; Corrugated metal Scale #: 2 - Mitered to slope Culvert Length: 13.61 Depth to use Bottom n: 0.2 Entrance Loss Coeff: 0.7 Depth Blocked: 0 Exit Loss Coeff: 1 Upstream Invert Elev: 562.28 Manning's n for Top: 0.019 Downstream Invert Elev: 562.08 Manning's n for Bottom: 0.035
	Shape: Circular Span: 1.3 Diameter: 1.3 Chart #: 1 - Concrete Pipe Culvert Scale #: 1 - Square edge entrance with headwall Culvert Length: 13.23 Depth to use Bottom n: 0 Entrance Loss Coeff: 0.5 Depth Blocked: 0 Exit Loss Coeff: 1 Upstream Invert Elev: 554.63 Manning's n for Top: 0.012 Downstream Invert Elev: 554.47 Manning's n for Bottom: 0.012
	Shape: Semi-Circle Span: 3.26 Rise: 1.63 Chart #: 41- Arch; Corrugated metal Scale #: 1 - 90 Degree headwall Culvert Length: 6.17 Depth to use Bottom n: 0.2 Entrance Loss Coeff: 0.5 Depth Blocked: 0 Exit Loss Coeff: 1 Upstream Invert Elev: 553.55 Manning's n for Top: 0.015 Downstream Invert Elev: 553.47 Manning's n for Bottom: 0.035

8.1.2 Weitere Wehröffnungen

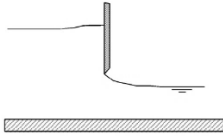
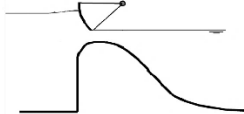
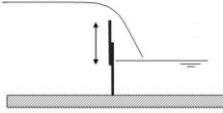
Es sind zusätzlich zu dem in Abschnitt 8.1.1 vorgestellten Durchlass weitere Möglichkeiten vorhanden, einen Durchfluss durch oder über ein Wehr zu modellieren. Diese können analog zum Durchlass im Wehr-Bearbeitungsfenster (s. Abbildung 8-2 und Abbildung 8-4) erstellt werden. Es sind zudem Kombinationen der verschiedenen Möglichkeiten machbar (HEC, 2022d). Im Wehr-Bearbeitungsfenster sind die folgenden, weiteren Schaltflächen verfügbar:

- *Gate*: Verschiedene bewegliche Wehröffnungen (s. Tabelle 8-4)
- *Outlet RC (Rating Curve)*: Abflusskurve zur Bestimmung des Wehrdurchflusses
 - Durchfluss am Auslass abhängig vom Oberwasser Wasserstand
 - Durchfluss am Auslass abhängig vom Durchfluss am Oberwasser
- *Outlet TS (Time Series)*: Abflussganglinie zur Bestimmung des Wehrdurchflusses (Zeit-Durchfluss). Die Ganglinie kann über das Bearbeitungsfenster nur benannt werden und später über die Randbedingungen im *Unsteady Flow Data* Fenster mit Werten verknüpft werden (s. Abschnitt 9.2.3).

(HEC, 2022d)

Für bewegliche Wehröffnungen muss analog zu Durchlässen zunächst eine Mittellinie für die Öffnung gezeichnet oder importiert werden (*Unterlayer Gate Openings*). Diese kann im Wehr-Bearbeitungsfenster über die Schaltfläche *Gate* spezifiziert werden. Die verschiedenen Möglichkeiten beweglicher Wehröffnungen sind in Tabelle 8-4 zusammengefasst. Anders als bei den Durchlässen können bei der Definition der Randbedingungen im *Unsteady Flow Data* Fenster (s. Abschnitt 9.2.3) Zeitreihen, Regeln oder Öffnungs- und Schließbewegung der Wehre abhängig vom Wasserstand angegeben werden.

Tabelle 8-4: Möglichkeiten zur Modellierung beweglicher Wehröffnungen (HEC, 2022g)

Bezeichnung	Bezeichnung (deutsch)	Seite im „Hydraulic Reference Manual“	Bild (HEC, 2022g)
<i>Sluice Gate</i>	Unterströmtes Schütz	245	
<i>Radial Gate</i>	Segmentwehr	243 ff.	
<i>Overflow (closed top)</i>	Überfall, je nach Wasserstand/ Durchfluss durch eine Blende und/oder über ein Wehr (Goodell, 2011)	246	
<i>Overflow (open air)</i>	Überfall über ein Wehr (Goodell, 2011) (Berechnung scharfkantiger Wehre nach verschiedenen Formeln möglich (HEC, 2022g))		

Im Beispielprojekt wird ein Wehr mit einem beweglichen, unterströmten Schütz modelliert. Hierfür wird zunächst im *RAS-Mapper* im Bearbeitungsmodus des Unterlayers *Gate Openings* eine Mittellinie für das Schütz gezeichnet, welche das zuvor erstellte Wehr kreuzt. Anschließend wird im *Geometric Data* Fenster im Wehr-Bearbeitungsfensters des entsprechenden Wehres die Schaltfläche *Gate* ausgewählt (s. Abbildung 8-6 links). Im Bearbeitungsfenster für die Wehrröffnung (s. Abbildung 8-6 rechts) wird im Dropdown Menü hinter *Gate type* *Sluice* gewählt und die in Abbildung 8-6 rechts dargestellten Angaben für *Sluice Discharge Coefficient*, *Weir Coefficient*, *Orifice Coefficient*, *Height*, *Width* und *Station* getroffen. Das modellierte Schütz ist grafisch in Abbildung 8-6 links dargestellt.

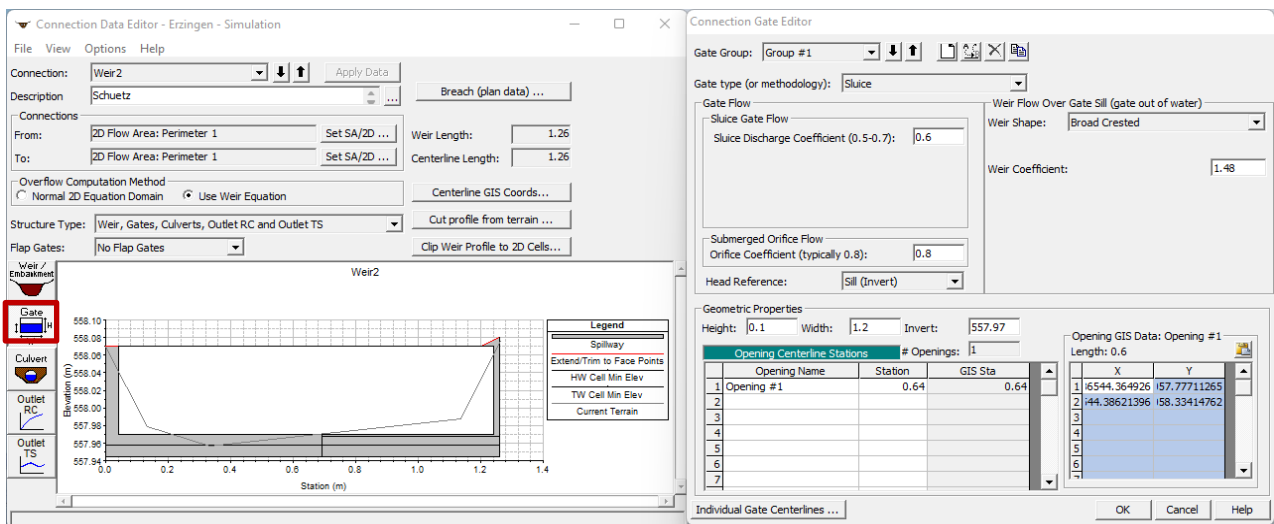


Abbildung 8-6: Links: Bearbeitungsfenster zur Erstellung eines Wehres, rechts: Bearbeitungsfenster zur Erstellung einer Wehrröffnung

8.2 Brücken

Die ersten zwei Schritte zur Modellierung einer Brücke in HEC-RAS geschehen analog zur Modellierung eines Wehres (s. Abschnitt 8.1):

- Es wird eine Mittellinie entweder im *RAS-Mapper* oder im *Geometric Data* Fenster gezeichnet. Diese muss nach Unterstrom schauend von links nach rechts gezeichnet werden. Im *RAS-Mapper* muss der Unterlayer *SA/2D Connections* ausgewählt sein und nach dem Zeichnen der Linie im Fenster aus Abbildung 8-1 links *Bridges (Internal to 2D Flow Area)* ausgewählt werden. Das Zeichnen im *Geometric Data* Fenster geschieht ebenso wie bei Wehren über die Schaltfläche *SA/2D Conn* unter *Tools* (s. Abbildung 8-2 oben). Anders als bei einem Wehr kann eine Brücke das Gelände schneiden. Das bedeutet, dass Anfangs- und Endpunkt der Mittellinie höher liegen können als die Brücke. Die Punkte der Mittellinie sollten jedoch trotzdem in etwa auf derselben Höhe wie die Brücke liegen, um einen Höhenversatz zu vermeiden. (HEC RAS, 2021a)
- Der zweite Schritt ist das Festlegen der Mittellinie als Bruchkante. Dies geschieht erneut analog zu Abschnitt 8.1: Im *RAS-Mapper* über das Fenster in Abbildung 8-1 rechts Auswahl von *Edit 2D Connection Breakline Properties* und anschließend *Enforce 2D Connection as Breakline*. Im *Geometric Data* Fenster über Linksklick und Auswahl von *Edit Internal Connection (Break Line) Cell Spacing* sowie *Enforce Internal Connection as Breakline in 2D Flow Area*. (HEC RAS, 2021a)

Die weitere Modellierung geschieht auch bei Brücken über das Bearbeitungsfenster im *Geometric Data* Fenster (s. Abbildung 8-7), welches entweder über die Schaltfläche *SA/2D Conn* unter *Editors* oder per Linksklick auf das Feature und Auswahl von *Edit Connection* geöffnet wird. Der obere Bereich des Fensters ist derselbe wie bei der Erstellung eines Wehres, jedoch muss hier im Dropdown Menü hinter *Structure Type* die Option *Bridges (Internal to 2D Flow Area)* ausgewählt werden.

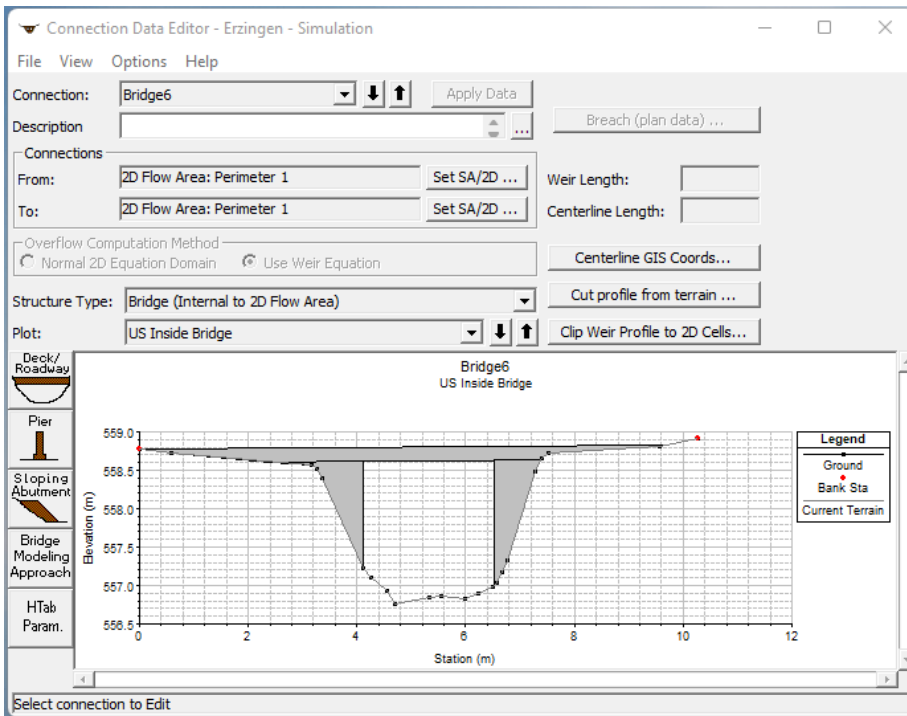


Abbildung 8-7: Bearbeitungsfenster zur Erstellung einer Brücke im *Geometric Data* Fenster

Über die erste Schaltfläche auf der linken Seite *Deck/Roadway* wird zunächst eine Fahrbahn bzw. ein Übergang für die Brücke erstellt. Im sich öffnenden Fenster (s. Abbildung 8-8) wird unter *Distance* eine Entfernung von der Brücke angegeben, in der HEC-RAS automatisch *Cross Sections* erzeugt, welche für die 1D-Berechnung der Brückenhraulik benötigt werden. Die Distanz (gemessen ab der Außenkante der Brückenquerung) sollte in etwa am Fuß der Straßenböschung liegen oder, falls diese nicht vorhanden ist, mindestens genug Platz lassen, um Druckabfluss unter der Brücke abfließen zu lassen (HEC, 2022g). Die beiden erzeugten Querschnitte werden im *Geometric Data* Fenster mit gestrichelten roten Linien dargestellt (s. Abbildung 8-8 rechts). Im Feld *Width* wird die Breite der Brückenquerung angegeben. Innerhalb dieser vier durch den Nutzer vorgegebenen Querschnitte (außerhalb der Brücke im Ober- und Unterstrom in der Entfernung aus *Distance* sowie innerhalb der Brücke im Ober- und Unterstrom in der Entfernung aus *Width*) erzeugt HEC-RAS für die 1D-Berechnung eine Wasserstand-Durchfluss-Kurvenschar zur Modellierung der Strömung im Brückenbereich. Die vier Querschnitte sowie die Mittellinie der Brücke können im Bearbeitungsfenster aus Abbildung 8-7 im Dropdown Menü hinter *Plot* ausgewählt werden. Im weiteren Verlauf der Brückenmodellierung können diese Querschnitte eingeblendet werden, um die verschiedenen Bauwerkselemente im umliegenden Gelände grafisch zu überprüfen. (HEC RAS, 2021a)

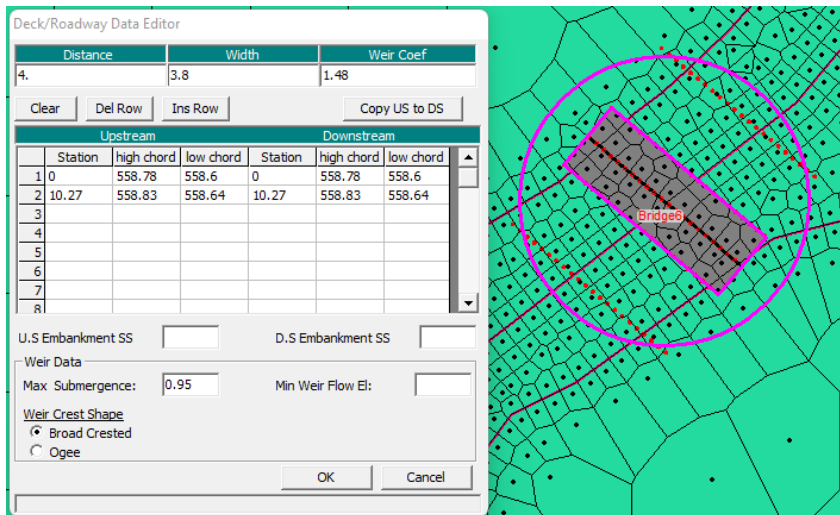


Abbildung 8-8: Definition des Übergangs einer Brücke

In der Tabelle in Abbildung 8-8 wird die eigentliche Brückenquerung definiert. Hierbei steht *Station* für die Lage im Querschnitt sowie *high chord* für die Bauwerksoberkante und *low chord* für die Bauwerksunterkante. Diese Daten werden für die Querschnitte an der ober- und unterstromigen Seite der Brückenquerung angegeben. Die Brückenquerung wird automatisch mit dem Gelände verschnitten, sollte sie in dieses hineinragen. Je nach Gelände und Lage der Brücke können die Angaben für Ober- und Unterstrom gleich sein. In diesem Fall kann die Option *Copy US to DS* verwendet werden. Die Felder *U.S./D.S. Embankment SS* (*Upstream/Downstream Embankment side slope*) geben das Gefälle der Straßenböschung an, welche für die Berechnung jedoch nicht verwendet werden und daher nicht ausgefüllt werden müssen (HEC, 2022d).

Im Feld *Weir Coef* wird der Wehrkoeffizient C angegeben (s. Tabelle 8-1), für den Fall, dass die Brücke überströmt wird. Hierzu sollte im unteren Bereich des Fensters unter *Weir Crest Shape* die Option *Broad Crested* ausgewählt sein, da dies für Brücken die zutreffende Form ist. Die beiden Felder darüber sind nur optional zu füllen. *Max Submergence* gibt das maximale Verhältnis bei unvollständigem Abfluss an, ab dem nicht mehr Wehr- und Druckabfluss unter bzw. über die Brücke berechnet wird, sondern wieder die normale 2D-Berechnung verwendet wird. Wird das Feld freigelassen, wird als Standardwert 0,95 verwendet. *Min Weir Flow El.* gibt den Wasserstand an, ab dem Wehrabfluss stattfindet. Wird das Feld frei gelassen, findet Wehrabfluss ab dem kleinsten Wert der Bauwerksoberkante statt. (HEC RAS, 2021a), (HEC, 2022d)

Als nächster Schritt werden Pfeiler (Schaltfläche *Pier*) und Widerlager (Schaltfläche *Sloping Abutment*) ergänzt. (HEC RAS, 2021a)

- Für Pfeiler öffnet sich das Fenster in Abbildung 8-9 links. Die Lage der Pfeilermitte muss für die ober- sowie unterstromige Seite der Brücke unter *Centerline Station Upstream/Downstream* angegeben werden. In der Tabelle wird die Breite des Pfeilers für verschiedene Höhen angegeben. Hierbei werden die Höhen von unten nach oben gelistet. Wird ein Pfeiler an einer Stelle abrupt schmaler oder breiter, wird dieselbe Höhe zweimal mit unterschiedlichen Breiten angegeben. Die niedrigste Höhe eines Pfeilers sollte unterhalb des Geländes liegen sowie die höchste Höhe innerhalb der Brückenquerung. Der Pfeiler wird mit beidem automatisch

verschnitten. Zudem kann optional mittels Aktivieren von *Apply floating debris to this pier* der Fließwiderstand durch Treibgut modelliert werden. (HEC, 2022d)

- Für seitliche Widerlager öffnet sich das Fenster in Abbildung 8-9 rechts. Die Geometrie der Widerlager kann in der Tabelle angegeben werden. Anders als beim Pfeiler können hier Höhen (*Elevation*) für verschiedene Lagen im Querprofil (*Station*) angegeben werden, wodurch das Lager nicht zwangsweise senkrecht sein muss. Es wird ebenfalls mit dem umliegenden Gelände verschnitten, nicht jedoch mit der Brückenquerung. Auch hier werden Angaben für die ober- sowie unterstromige Seite der Brücke getroffen. (HEC, 2022d)

Sowohl die Lage der Pfeiler als auch der Widerlager kann im *Plot* des ober- sowie unterstromigen Teils der Brücke in Abbildung 8-7 geprüft werden. Pfeiler und Lager können über die Schaltflächen *Add*, *Copy* und *Delete* hinzugefügt, kopiert oder gelöscht werden.

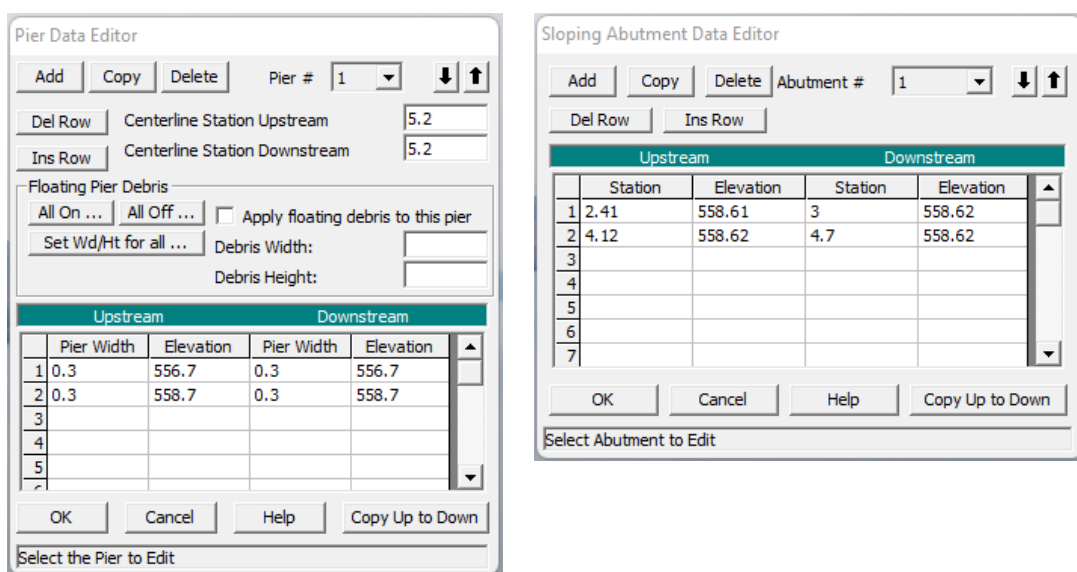


Abbildung 8-9: Erstellen von Brückenpfeilern (links) sowie seitlichen Widerlagern (rechts)

Weiterhin besteht die Möglichkeit, wie bereits in Abschnitt 6.2.2 beschrieben, Brückenpfeiler im 3D-Geländemodell zu integrieren. Hierzu kann einer der Unterlayer von *Terrain – Modifications – Shapes* eines Terrainlayers verwendet werden, um unterschiedlich geformte Pfeiler zu erstellen. Dies kann für alle Pfeiler einer Brücke genutzt werden oder mit den oben beschriebenen 1D-Optionen für Pfeiler und Widerlager verkoppelt werden.

Der nächste Schritt ist das Festlegen von Rauheitsbeiwerten für die 1D-Berechnung der Brücke. Die Manning's-n-Werte werden nicht aus einem möglicherweise verknüpften *Land Cover* Layer übernommen, sondern müssen manuell eingegeben werden. Dazu wird der Reiter *Options – External and Internal Bridge Cross Sections* ausgewählt. Hier muss für alle vier oben beschriebenen Querprofile mindestens je ein Wert in der ersten Zeile angegeben werden (s. Abbildung 8-10). Ist nur ein Manning's-n-Wert angegeben, gilt dieser für das gesamte Querprofil. Da es eine Maximalanzahl pro *Cross Section* gibt, sollten nur dort, wo eine Änderung der Rauheit vorliegt, Beiwerte eingetragen werden. (HEC, 2022e), (HEC RAS, 2021a)

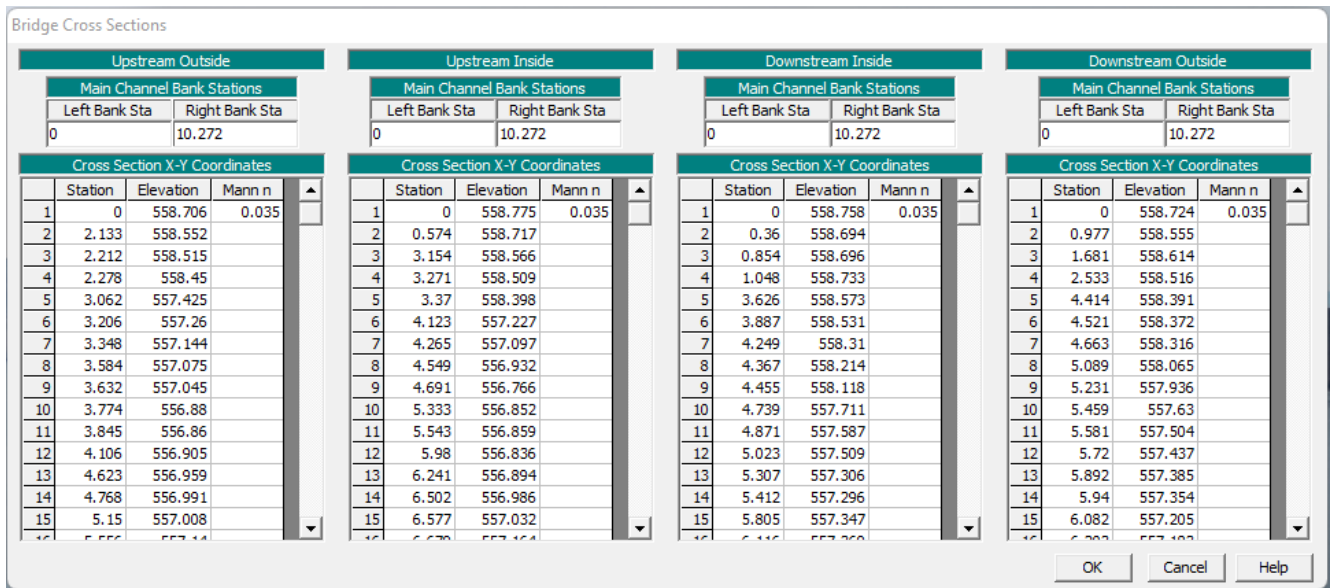


Abbildung 8-10: Festlegen von Rauheitsbeiwerten für eine Brücke

Anschließend kann über die Schaltfläche *Bridge Modeling Approach* (s. Abbildung 8-7) das Vorgehen zur Berechnung der Brücke festgelegt werden. Hierbei wird zwischen *Low Flow* und *High Flow* unterschieden (s. Abbildung 8-11 links). *Low Flow* findet statt, solange der Wasserspiegel unterhalb der Bauwerksunterkante liegt. Hier kann zwischen drei Berechnungsmethoden gewählt werden: (HEC, 2022e)

- *Energy*: Normale 2D-Gleichungen (Empfohlen bei geringen Verlusten durch Pfeiler und überwiegenden Reibungsverlusten)
 - *Momentum*: Gleichgewicht der Momente zwischen Ober- und Unterstrom der Brücke (Empfohlen für vorherrschende Pfeilverluste und Wasserspiegelunterschiede)
 - *Yarnell*: Empirische Gleichung zur Berechnung der Wasserstände im Ober- und Unterstrom der Brücke (Empfohlen für vorherrschende Pfeilverluste und Wasserspiegelunterschiede, jedoch nur strömender Abfluss möglich)
- (HEC, 2022g)

Es können auch mehrere Berechnungsmethoden ausgewählt und das Ergebnis mit dem höchsten Energiewert verwendet werden (*Highest Energy Answer*). (HEC, 2022e)

Für *High Flow* (Wasserstand oberhalb der Bauwerksunterkante) gibt es zwei Berechnungsmethoden:

- *Energy*: Normale 2D-Gleichungen
 - *Pressure and/or Weir*: Druckabfluss unter der Brücke und/oder Wehrüberfall über die Brücke (sobald der Wasserstand oberhalb der Bauwerksunter- bzw. -oberkante liegt)
- (HEC, 2022e)

Generell wird für *High Flow* empfohlen, Druckabfluss bzw. Wehrüberfall zu wählen, wenn die Brückenquerung einen signifikanten Teil des Querprofils bedeckt, was zu einem Unterschied in den Wasserständen zwischen Ober- und Unterwasser führen kann (HEC, 2022e). Ist dies nicht der Fall, kann

die normale Berechnungsmethode gewählt werden. Details der verschiedenen Berechnungsmethoden können im „HEC-RAS Hydraulic Reference Manual“ nachgelesen werden (HEC, 2022g, pp. 173-189).

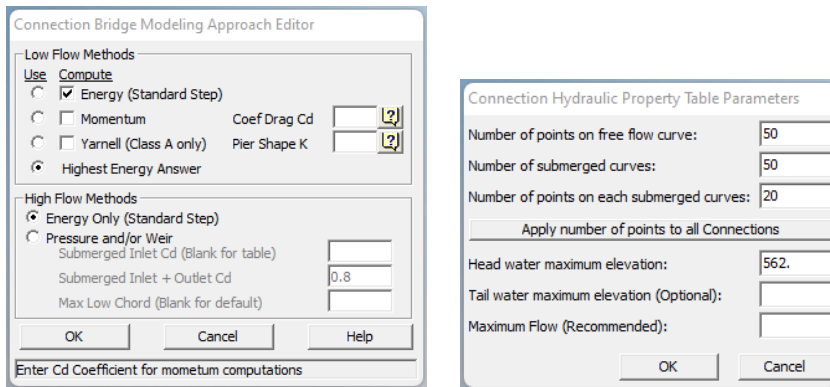


Abbildung 8-11: FormelAuswahl zur Brückenberechnung (links) sowie Parameter zur Wasserstand-Durchfluss-Kurvenschar (rechts)

Zuletzt müssen Parameter für die Erstellung der Wasserstand-Durchfluss-Kurvenschar festgelegt werden (s. Abbildung 8-11 rechts). Das Fenster öffnet sich über die Schaltfläche *HTab Param.* im Bearbeitungsfenster (s. Abbildung 8-7). Die oberen drei Felder geben die Anzahl der zu erstellenden Kurven bzw. Punkte je Kurve an. Diese Werte können für eine höhere/niedrigere Genauigkeit verändert werden. Die unteren drei Felder geben die maximalen Wertebereiche an, bis zu denen die Kurven berechnet werden sollen. Der maximale Oberwasserstand (englisch: *Head water maximum elevation*) muss definiert werden. Hierbei sollte ein Wasserspiegel gewählt werden, der im Falle der Überströmung der Brücke oberhalb des Bauwerks liegt. Der Wert sollte jedoch nicht zu hoch liegen, da aufgrund der begrenzten Anzahl der Punkte je Kurve, diese im relevanten Bereich sonst ungenau wird. Wurde der *Preprocessor* ausgeführt (s. Kapitel 10), können die Kurven über die markierte Schaltfläche im HEC-RAS Hauptfenster (s. Abbildung 8-12) eingesehen und kontrolliert werden. (HEC, 2022d), (HEC RAS, 2021a)

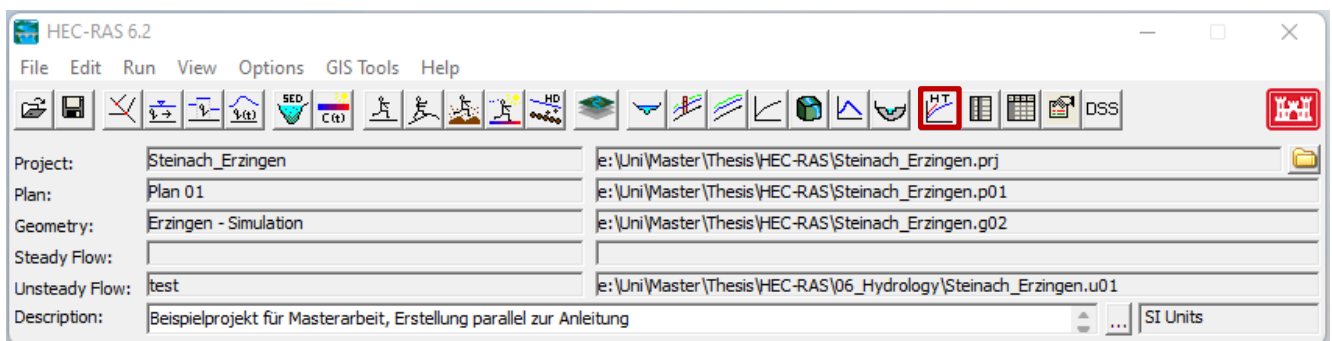


Abbildung 8-12: *Hydraulic Table* Schaltfläche im Hauptfenster von HEC-RAS

Zudem sind weitere Brückenoptionen in HEC-RAS verfügbar, die nach Bedarf angepasst werden können:

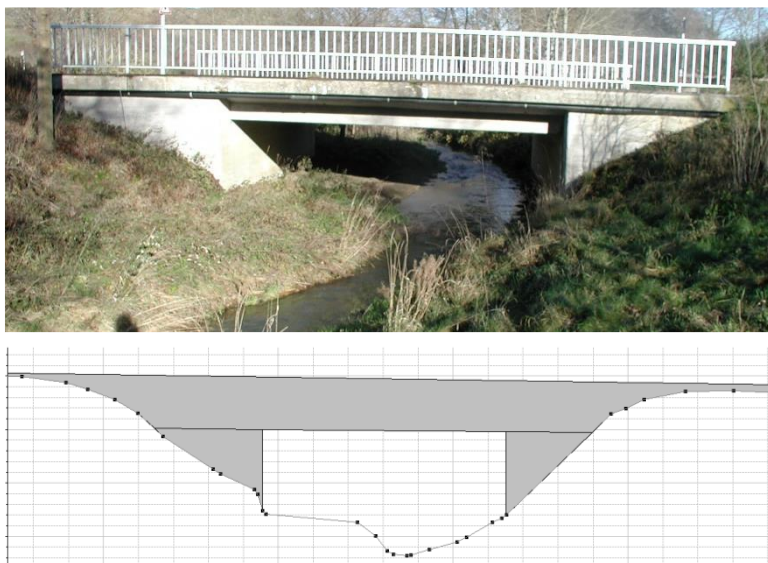
- Im Reiter *Options – Contr and Expan Coef for Bridge Cross Sections* können die Kontraktions- und Expansionsverlustkoeffizienten im Ober- und Unterstrom der Brücke angepasst werden. (HEC, 2022g, pp. 171-173)
- Im Reiter *Options – Bridge Ineffective Regions* können für die beiden Profile vor und nach der Brücke, welche für die 1D-Brückenberechnung verwendet werden, unwirksame

Strömungsbereiche definiert werden. Dies ist z. B. notwendig, wenn die Böschung der Straße mit seitlichen Lagern modelliert wird. Dann kann die Einengung der Strömung durch das Bauwerk, welches in den beiden außenliegenden Querschnitten nicht berücksichtigt wird, nur durch unwirksame Bereiche gekennzeichnet werden. Ist die Böschung im Gelände abgebildet, ist dieser Schritt hinfällig, da die beiden Querschnitte auf das Gelände zugreifen. (HEC, 2022e, p. 117), (HEC, 2022g, pp. 168-171)

- Im Reiter *Options – Momentum Equation* können die Komponenten Gewichtskraft und Reibungskraft der Momentengleichung aktiviert oder deaktiviert werden. Als Standard ist die Reibungskraft aktiv und die Gewichtskraft inaktiv. Eine Aktivierung der Gewichtskraft wird nur empfohlen, wenn das Sohlgefälle im Brückenbereich repräsentativ ist. (HEC, 2022g, pp. 34-38, 177)
- Im Reiter *Options – Class B defaults* wird vorgegeben, an welcher Stelle, falls vorhanden, ein Fließwechsel auftritt (am oberen oder unteren Ende der Brücke). Dabei ist *Class A flow* strömender Abfluss, *Class B flow* Abfluss mit einem Fließwechsel von strömend zu schießend und *Class C flow* schießender Abfluss. (HEC, 2022d, p. 95), (HEC, 2022g, pp. 180-181)
- Im Reiter *– Pressure flow criteria* wird festgelegt, wann in der Berechnung geprüft wird, ob Druckabfluss vorliegt (abhängig vom Energieliniengefälle oder vom Wasserspiegel). (HEC, 2022d, p. 95)

Im Beispielprojekt in Erzingen werden insgesamt sechs Brücken (zwei Querungen von Straßen, vier Fußgängerbrücken) modelliert. Zur Veranschaulichung werden im Folgenden drei davon exemplarisch dargestellt (s. Tabelle 8-5). Nicht aufgeführte Optionen werden bei den Standardeinstellungen belassen. Zudem wird eine Testsimulation erstellt, um Fehler frühzeitig erkennen und beheben zu können, die nach den jeweiligen Abschnitten der Modellierung der Wasserbauwerke durchgeführt wird.

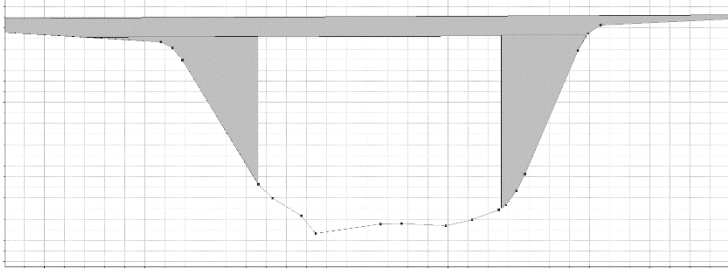
Tabelle 8-5: Im Beispielprojekt modellierte Brücken im Vergleich zu Bildern der Bauwerke



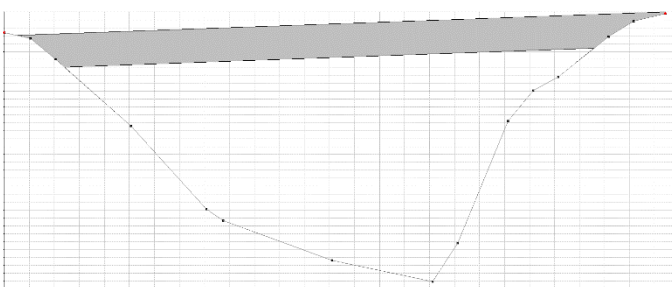
- Breite: 10,6 m
- Distanz zu außerhalb liegenden Profilen: 7 m
- Modellierung von Lagern mittels *Sloping Abutments* und unwirksamen Strömungsbereichen
- *Low Flow: Energie*
- *High Flow: Pressure and/or Weir*
- Zellgrößen: *Near/Far Spacing: 1 m* (wie umliegendes Gewässer)
- *Head water maximum elevation: 2 m* oberhalb der Fahrbahn



- Breite: 3,8 m
- Distanz zu außerhalb liegenden Profilen: 4 m
- Modellierung von Lagern mittels *Sloping Abutments* und unwirksamen Strömungsbereichen
- *Low Flow: Energie, High Flow: Energy Only*
- Zellgrößen: *Near/Far Spacing*: 1 m (wie umliegendes Gewässer)
- *Head water maximum elevation*: 2 m oberhalb der Fahrbahn



- Breite: 1,2 m
- Distanz zu außerhalb liegenden Profilen: 2 m
- *Low Flow: Energie*
- *High Flow: Energy Only*
- Zellgrößen: *Near/Far Spacing*: 1 m (wie umliegendes Gewässer)
- *Head water maximum elevation*: 3 m oberhalb der Querung



Nutzer sollten jedoch trotz der vielen Modellierungsmöglichkeiten von Wasserbauwerken berücksichtigen, dass diese eindimensional berechnet werden. Sie stellen also immer eine Verbindung zwischen einer 1D-Berechnung in dem sonst zweidimensional berechneten Gebiet dar. Solche Übergangsstellen können besonders bei Änderungen des Modells Ursprung von Fehlermeldungen sein. Beeinflusst ein Bauwerk die Strömung nicht oder gibt es die Möglichkeit, dieses auch zweidimensional im DGM abzubilden, sollte auf die eindimensionale Abbildung verzichtet werden.

9 Rand- und Anfangsbedingungen

Für das Festlegen von Randbedingungen (englisch: *Boundary Conditions*), müssen zunächst Linien gezeichnet werden, die festlegen, wo Wasser in das Untersuchungsgebiet eintreten kann, bzw. dieses verlassen kann. Anschließend werden Durchfluss- oder Wasserstandsvorgaben für die Randbedingungslinien angegeben. Zudem können Wasserstände zu Beginn einer Simulation als Anfangsbedingungen (englisch: *Initial Conditions*) festgelegt werden. Im Folgenden wird das Vorgehen für die Erstellung von Rand- sowie Anfangsbedingungen erläutert.

9.1 Randbedingungslinien

Die Linien für die Randbedingungen werden im *RAS-Mapper* Unterlayer *Boundary Condition Lines* gezeichnet und anschließend benannt. Randbedingungslinien können ebenso im *Geometric Data* Fenster über die Schaltfläche *BC Lines* unter *Tools* gezeichnet werden. Es wird zwischen *Internal Boundary Conditions*, die innerhalb des Untersuchungsgebietes liegen (s. Abbildung 9-1 links) und *External Boundary Conditions*, die außerhalb des Untersuchungsgebietes liegen (s. Abbildung 9-1 rechts), unterschieden. Diese Zuordnung geschieht je nach Lage der Linie automatisch. Randbedingungslinien werden von Ober- nach Unterstrom schauend von links nach rechts gezeichnet. Je nachdem ob es sich um eine innen oder außen liegende Linie handelt, können unterschiedliche Vorgaben für die Randbedingung getroffen werden. Hierfür stehen die in Tabelle 9-1 dargestellten Möglichkeiten zur Verfügung. (HEC, 2022e)

Tabelle 9-1: Arten von Randbedingungen, je nach Lage der Randbedingungslinie (HEC, 2022e)

Lage der Linie	Randbedingungsart	Zu- oder Abfluss
<i>External Boundary Condition</i>	<i>Flow Hydrograph</i> (Durchflussganglinie)	Zu- und Abfluss
	<i>Stage Hydrograph</i> (Wasserstandsganglinie)	Zu- und Abfluss
	<i>Normal Depth</i> (Normalabfluss)	Abfluss
	<i>Rating Curve</i> (Wasserstand-Durchfluss-Beziehung)	Abfluss
<i>Internal Boundary Condition</i>	<i>Flow Hydrograph</i>	Zu- und Abfluss

Bei dem Randbedingungstyp *Flow Hydrograph* wird eine Durchflussganglinie und ein Energieliniengefälle angegeben. Positive Durchflusswerte stellen einen Zufluss dar, negative einen Abfluss. Bei dem Randbedingungstyp *Stage Hydrograph* kann eine Ganglinie der Wasserstände angegeben werden. Liegt der Wert niedriger als der Wasserstand einer Zelle, wird Wasser ins Gebiet hinzugegeben. Ist der Wert höher als der Wasserstand einer Zelle, tritt Wasser aus dem Gebiet aus. Wird *Normal Depth* gewählt, wird ein Energieliniengefälle angegeben. Diese Option kann nur einen Abfluss aus einem Gebiet berechnen. Bei der Option *Rating Curve* wird eine Wasserstand-Durchfluss-Beziehung angegeben. Auch diese Option kann nur einen Abfluss aus dem Untersuchungsgebiet darstellen. (HEC, 2022e)

Es ist sinnvoll, *Internal Boundary Conditions* so zu zeichnen, dass sie auf eine gerade Reihe von Zellen zugreift. Alternativ ist für die Randbedingung eine *Breakline* zu erstellen. Ziel ist es jeweils, dass der Zufluss entlang einer geraden Zellkante verläuft (s. Abbildung 9-1 links). Besonders wichtig ist auch, dass ausreichend Fließweg von allen Randbedingung bis zu untersuchungsrelevanten Flächen und andersherum eingeplant wird, um eine Beeinflussung beispielsweise durch einen Rückstau ausgehend von der Randbedingung auszuschließen (HEC, 2022g). Es dürfen zudem nicht mehrere *External Boundary Conditions* auf dieselbe Zelle zugreifen. Sie dürfen sich also nicht überlappen. Sie sollten weiterhin lang genug sein, um an allen potenziell überfluteten Zellen Wasser ableiten zu können, da sich dieses sonst an der undurchlässigen Gebietsaußenkante staut (s. Abbildung 9-1 rechts). (HEC, 2022e)

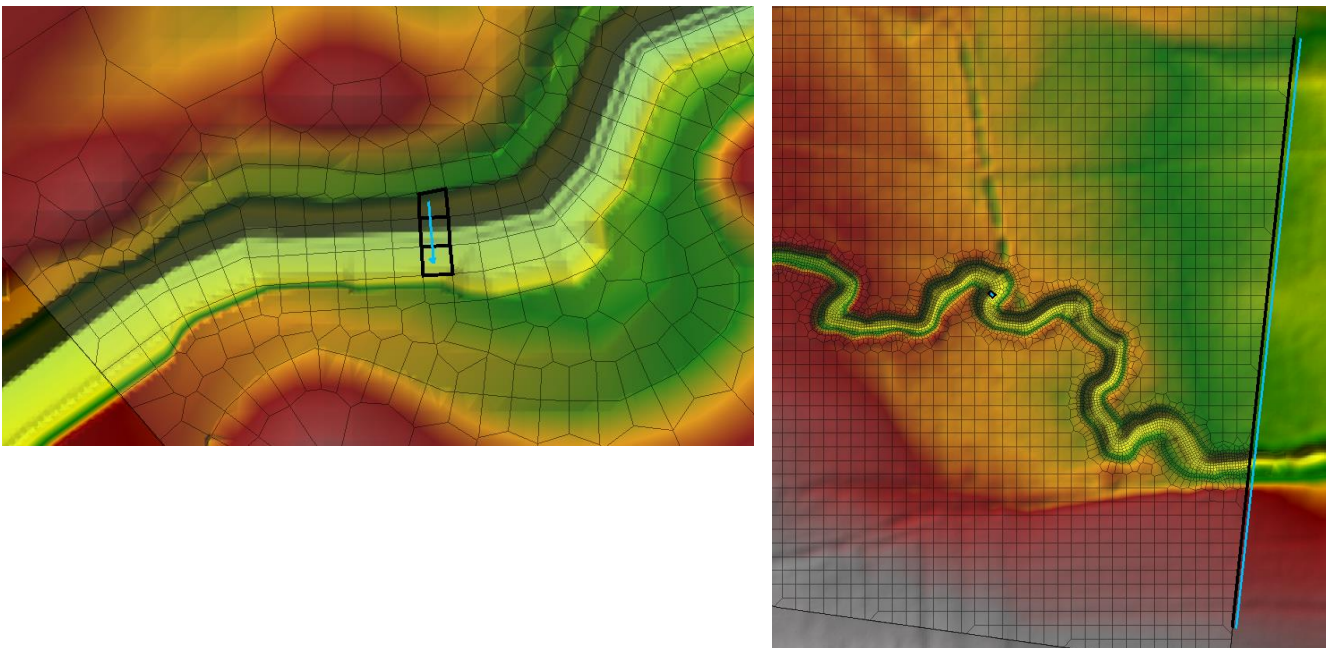


Abbildung 9-1: Beispielhafte Randbedingungslinien: *Internal* (links), *External* (rechts)

Im Untersuchungsgebiet Erzingen werden 8 *Internal Boundary* Linien und eine *External Boundary* Linie gezeichnet (s. Abbildung 9-2). Die außenliegende Randbedingungsline ist in Abbildung 9-1 rechts abgebildet und stellt den einzigen Abfluss aus dem Gebiet dar. Sie ist großzügig gezeichnet, um die gesamte, bei einem Hochwasser potenziell überflutete Fläche, rechts- und linksseitig des Gewässers Steinach abzudecken. Die innenliegenden Zuflüsse sind der Zufluss durch die Steinach selbst im Süden des Gebiets (s. Abbildung 9-2, 1) sowie die Zuflüsse durch die Einmündungen Riedbach (s. Abbildung 9-2, 2), Bontalbach (s. Abbildung 9-2, 3) und Haugenbach (s. Abbildung 9-2, 5). Die Zuflüsse 4, 7 und 8 stellen Zunahmen des Durchflusses durch Oberflächenabfluss dar, der örtlich nicht exakt festgelegt ist. Daher werden die Linien in den Gewässerlauf der Steinach gelegt. Zufluss 6 liegt ebenfalls im Gewässerlauf des Haugenbachs, da an dieser Stelle eine Rohrleitung ins Hauptgewässer mündet. Für keine der innenliegenden Randbedingungsline wird eine zusätzliche Bruchkante definiert. Das erstellte Berechnungsnetz beinhaltet bereits Zellen, die der Richtung der Gewässerläufe folgen. Daher liegen die Kanten der Zellen, die Wasser in das Untersuchungsgebiet leiten, bereits senkrecht zur Strömung (s. Abbildung 9-2 unten rechts).

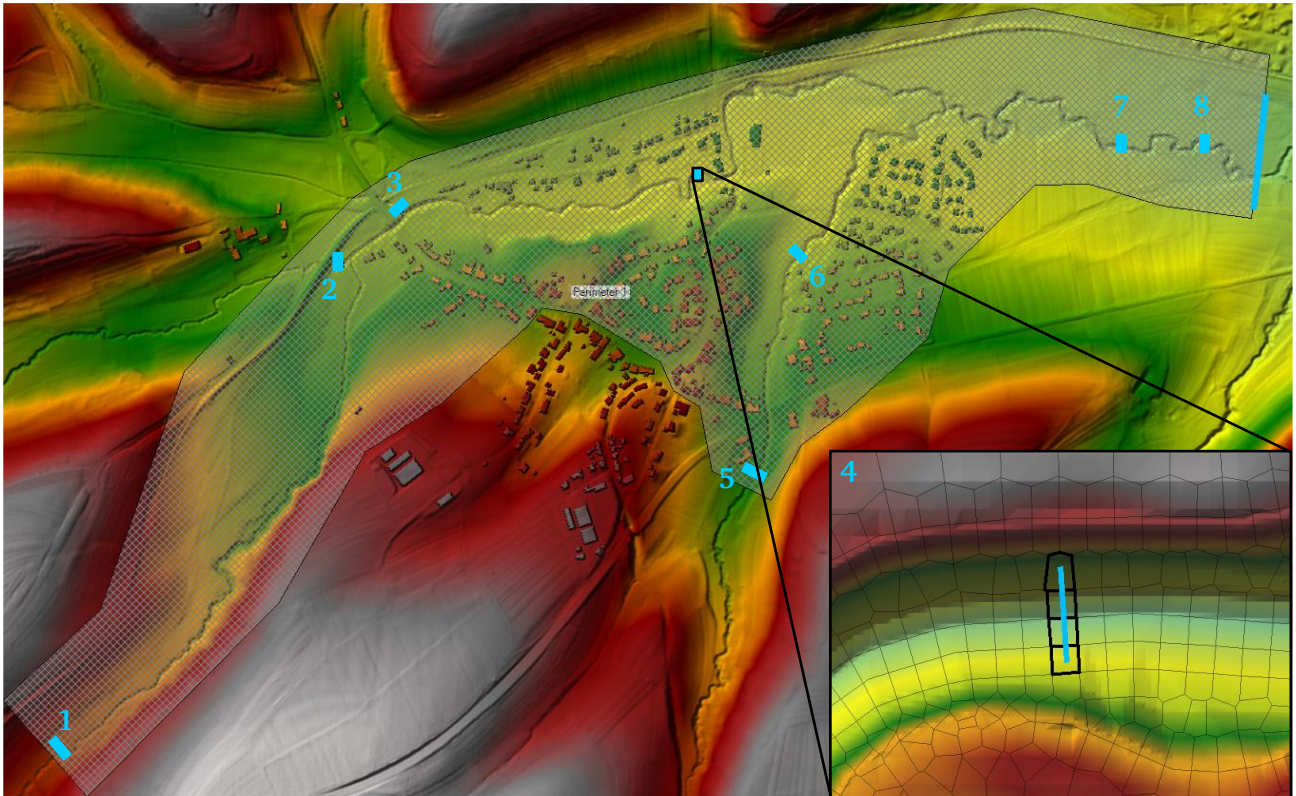


Abbildung 9-2: Randbedingungslinien im Beispielprojekt

9.2 Randbedingungen in der *Unsteady Flow* Datei

Sind die Linien gezeichnet, müssen die eigentlichen Randbedingungen entlang dieser vorgegeben werden. Diese werden im *Unsteady Flow Data* Fenster definiert, welches über das HEC-RAS Hauptfenster geöffnet wird (s. Abbildung 9-3). Eine neue *Unsteady Flow* Datei kann über den Reiter *File – New Unsteady Flow Data* benannt und im Ordner „06_Hydrology“ gespeichert werden. Alle Änderungen sollten über den Reiter *File – Save Unsteady Flow Data* manuell gespeichert werden.

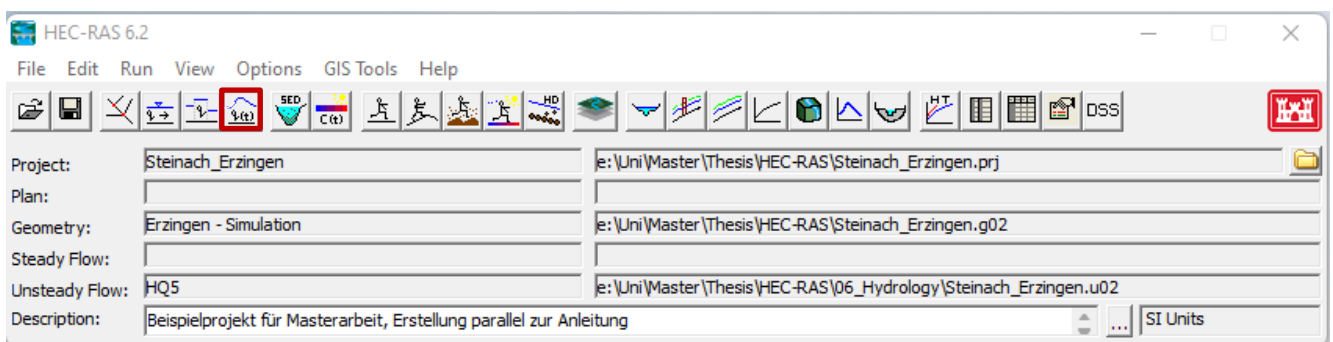


Abbildung 9-3: *Unsteady Flow Data* Schaltfläche im Hauptfenster von HEC-RAS

Im *Unsteady Flow Data* Fenster (s. Abbildung 9-4) werden alle bisher hinzugefügten Randbedingungslinien, sowie Bauwerke, die eine Randbedingung benötigen, im unteren Bereich aufgelistet. Es müssen nun für jeden Ort in der Liste Randbedingungsarten festgelegt und entsprechende Randbedingungen definiert werden. Für die gewünschte Zeile können die zur Verfügung stehenden

Optionen für diese Randbedingungsart im oberen Bereich ausgewählt werden. Alle nicht zur Verfügung stehenden Optionen werden ausgegraut.

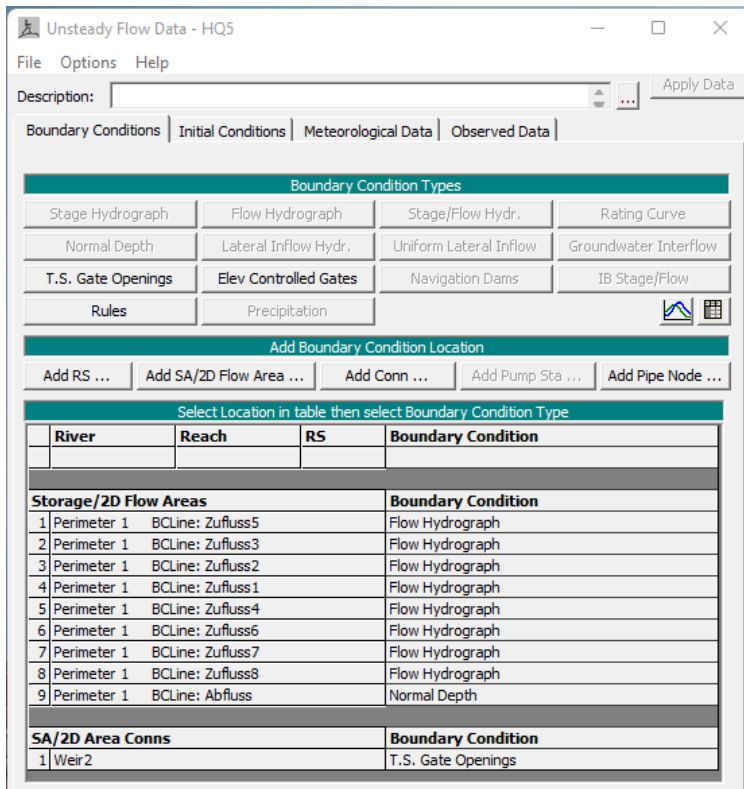


Abbildung 9-4: *Unsteady Flow Data* Fenster

9.2.1 Innere Randbedingungen

Flow Hydrograph

Für innere Randbedingungen ist wie in Tabelle 9-1 dargestellt nur der Randbedingungstyp *Flow Hydrograph* möglich. Dieser wird, nachdem eine Randbedingungsline gewählt wurde, durch Linksklick auf die entsprechende Schaltfläche im oberen Bereich des *Unsteady Flow Data* Fensters ausgewählt und damit die Bearbeitung geöffnet (s. Abbildung 9-5). Später kann das Bearbeitungsfenster durch Doppelklick auf die *Boundary Condition* in der Tabelle im unteren Bereich des *Unsteady Flow Data* Fensters geöffnet werden.

Ist die oberste Option *Read from DSS before simulation* ausgewählt, können Zuflussinformationen importiert werden. Für diese Option müssen Zeitreihen im HEC internen Format *.dss (*Data Storage System*) vorliegen, welche mithilfe der Software HEC-DSS erstellt werden können (HEC, 2022e). Ist die darunterliegende Option *Enter Table* ausgewählt, werden Zuflussdaten manuell eingegeben. Hier kann zunächst im Dropdown Menü hinter *Data time interval* ein Zeitschritt angegeben werden, in dem die Daten vorliegen und eingetragen werden sollen. Anschließend kann eine Startzeit für die Zeitreihe entweder angegeben werden (*Fixed Start Time*) oder von der *Plan* Datei, die später für die Simulation erstellt wird (s. Kapitel 10), übernommen werden (*Use Simulation Time*). Wird die Startzeit von der Simulation übernommen, muss die in der Tabelle darunter angegebene Zeitreihe länger sein als die Dauer der Simulation. Wird die Startzeit manuell eingegeben, muss die Simulationsdauer innerhalb der Zeitreihe aus der *Unsteady Flow* Datei liegen. (HEC, 2022d)

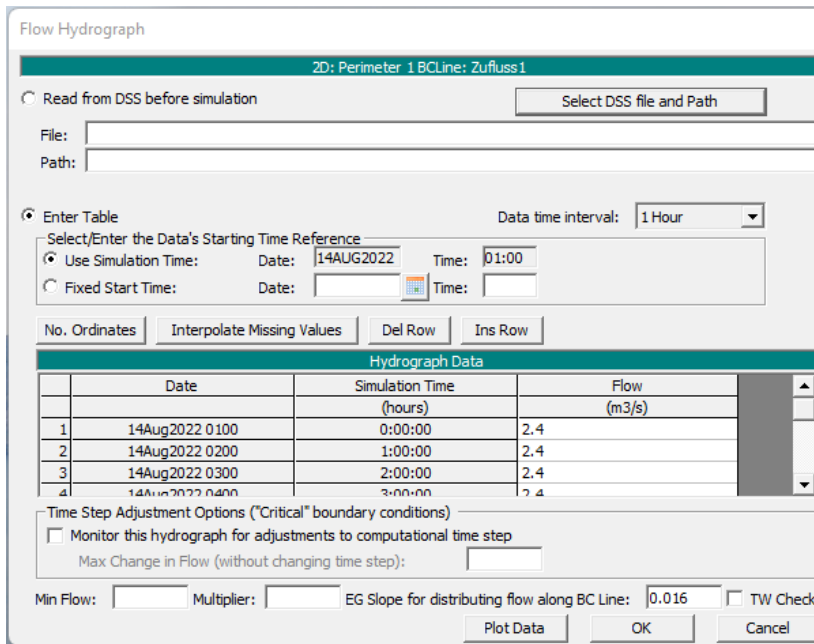


Abbildung 9-5: Bearbeitungsfenster der Randbedingung *Flow Hydrograph*

In der Tabelle wird die eigentliche Durchflusszeitreihe angegeben. Wie zuvor bereits erwähnt, stellen positive Durchflusswerte in der Tabelle einen Zufluss dar, negative einen Abfluss. Über die Schaltfläche *No. Ordinates* kann die Anzahl der Zeilen verändert werden. Die Schaltfläche *Interpolate Missing Values* interpoliert Lücken in der Spalte *Flow* linear. Über *Del Row* und *Ins Row* können Zeilen gelöscht oder hinzugefügt werden. (HEC, 2022d)

Ist die Option *Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step* ausgewählt, kann der Nutzer eine maximale Durchflussänderung von einem zum nächsten Zeitschritt festlegen. Wird dieser überschritten, halbiert das Programm die Zeitschritte, um eine stabilere Simulation zu erreichen (HEC, 2022d). Diese Option ist besonders bei einer instationären Simulation sinnvoll, bei der beispielsweise nur Stunden- oder Tageswerte vorliegen. Die Optionen *Min Flow* und *Multiplier* sind sinnvoll, werden Zuflussdaten importiert. So werden alle Werte, die unter den minimalen Durchfluss fallen, auf denselben angehoben, bzw. alle Werte der Zeitreihe mit demselben Faktor multipliziert (HEC, 2022d). Diese drei Angaben sind jedoch optional.

Hinter *EG Slope for distributing flow along BC Line* wird das Energieliniengefälle im Bereich der Randbedingung angegeben. Diese Angabe ist obligatorisch. Für das Energieliniengefälle kann auch das Gefälle des Geländes angegeben werden, wird die Annahme getroffen, dass dort Normalabfluss vorliegt und Wasserspiegel- sowie Energieliniengefälle parallel verlaufen (Zanke, 2013). Das Sohlgefälle kann im *RAS-Mapper* über das *Tool Measure distance* berechnet werden. Hierzu muss eine temporäre Linie mit dem *Tool* gezeichnet werden. Das Messen wird per Doppelklick beendet, wodurch sich ein Fenster öffnet, in dem in der ersten Zeile Länge und Gefälle der Linie angegeben werden. Alternativ kann das Gefälle im *Geometric Data* Fenster ausgelesen werden, indem die Geometrie Datei geöffnet wird, welche zur Gewässerlaufmodellierung verwendet wurde. Dort wird per Linksklick auf eine Gewässermittellinie *Plot Profile* ausgewählt und im sich öffnenden *Plot* durch gedrückt Halten der STRG-Taste das Gefälle an einer beliebigen Stelle gemessen. (The RAS Solution, 2018c)

9.2.2 Äußere Randbedingungen

Flow Hydrograph

Auch für äußere Randbedingung kann eine Durchflussganglinie analog zu Abschnitt 9.2.1 angegeben werden. Das Bearbeitungsfenster ist dasselbe wie in Abbildung 9-5. Auch hier kann mit positiven Durchflusswerten ein Zufluss dargestellt werden und mit negativen einen Abfluss. (HEC, 2022d)

Stage Hydrograph

Für äußere Randbedingungen ist zudem der Randbedingungstyp *Stage Hydrograph* wählbar. Hier wird eine Wasserstandsganglinie angegeben. Das Bearbeitungsfenster ist in Abbildung 9-6 links zu sehen. Ein Import bzw. die manuelle Eingabe der Wasserstände erfolgt analog zur Durchflussganglinie. Liegt ein Wert niedriger als der Wasserstand einer Zelle, wird Wasser ins Gebiet hinzugegeben, ist der Wert höher als der Wasserstand einer Zelle, tritt Wasser aus dem Gebiet aus. So ist dieser Randbedingungstyp entweder Zu- oder Abfluss. (HEC, 2022e)

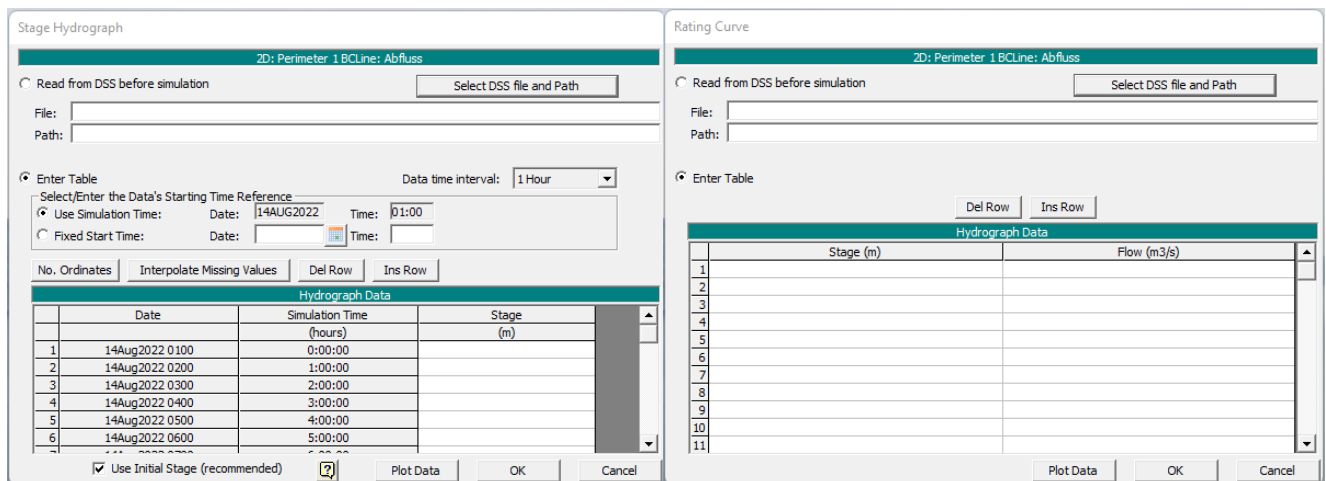


Abbildung 9-6: Bearbeitungsfenster der Randbedingungen *Stage Hydrograph* (links) und *Rating Curve* (rechts)

Rating Curve

Der Randbedingungstyp *Rating Curve* ist ebenfalls für äußere Randbedingungen wählbar. Das Bearbeitungsfenster ist in Abbildung 9-6 rechts dargestellt. Hier wird eine Wasserstand-Durchfluss-Beziehung angegeben. Auch hier können Daten manuell eingegeben oder importiert werden. Jedoch ist für diesen Randbedingungstyp ausschließlich ein Abfluss aus einem Gebiet möglich. Abhängig vom Wasserstand entlang der Randbedingungslinie wird der in der Tabelle vorgegebene Durchfluss aus dem Untersuchungsgebiet entnommen. Bei diesem Randbedingungstyp sollte besonders auf ausreichend Abstand zum eigentlichen Untersuchungsgebiet geachtet werden, um dortige Beeinflussungen des Strömungsgeschehens durch die Randbedingung auszuschließen (HEC, 2022d). (HEC, 2022e)

Normal Depth

Die letzte Randbedingungsoption für *External Boundary Conditions* ist die Option *Normal Depth*. Hierbei wird der Abfluss aus dem Gebiet anhand des Energieliniengefälles berechnet. Das Bearbeitungsfenster ist in Abbildung 9-7 zu sehen. Für das Energieliniengefälle kann erneut das Sohlgefälle unter der Annahme von Normalabfluss angegeben werden, welches, wie zuvor beschrieben (s. Abschnitt 9.2.1), bestimmt werden kann. Jedoch sollte auch hier auf ausreichend Abstand zum eigentlichen Untersuchungsgebiet geachtet werden. (HEC, 2022d)

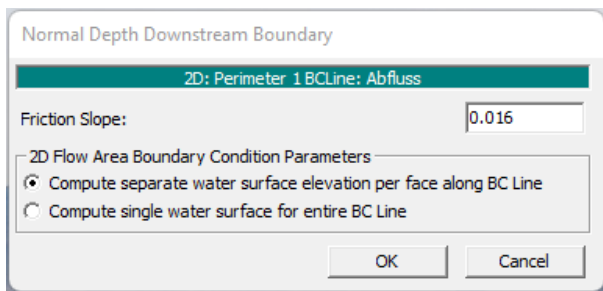


Abbildung 9-7: Bearbeitungsfenster der Randbedingungen *Normal Depth*

Im Beispielprojekt wird für alle Zuflüsse (s. Abbildung 9-2, 1-8) der Randbedingungstyp *Flow Hydrograph* gewählt. Da die Linien innerhalb des Untersuchungsgebietes liegen, ist dies die einzige zur Verfügung stehende Option. Die vorliegenden Randbedingungsdaten sind konstante Durchflusswerte für verschiedene Hochwasserereignisse (HQ5, HQ10, HQ50, HQ100 und HQextrem) an den gezeichneten Linien. Ausgehend von den Zuflusswerten, die bereits durch die Anfangsbedingungen der Simulationen gegeben sind (s. Abschnitt 9.3), müssen diese konstanten Durchflüsse für die Hochwasserszenarien zunächst mit angemessener Steigerungsrate erreicht werden. Abhängig von der Differenz der Werte aus der Anfangsbedingung und der Durchflüsse für ein Hochwasser, wird je nach Simulation und Randbedingungsanlage ein Zeitschritt zwischen 5 Minuten und 1 Stunde verwendet. Der Zeitschritt wird so gewählt, dass die Steigerung von einem zum nächsten Schritt moderat ist, um Instabilitäten vorzubeugen. Die Werte werden manuell in die Tabelle eingetragen (s. Abbildung 9-5). Es wird die Option *Use Simulation Time* verwendet, da keine Zeitreihe für einen bestimmten Zeitabschnitt verwendet wird. Für das Energieliniengefälle wird unter der Annahme von Normalabfluss das Sohlgefälle angenommen. Da es sich um ein kleines Untersuchungsgebiet handelt, wird das Gefälle im gesamten Gebiet konstant angenommen. Dieses wird mithilfe der Geometrie Datei „Erzingen - River“ und der darin enthaltenen Gewässermittellinien im *Geometry Data* Fenster wie beschrieben zu 0,016 ermittelt. Für die Zufluss-Randbedingungen werden keine zusätzlichen Optionen ausgewählt. Da am Ausstromrand keine Wasserstandsdaten vorliegen, wird als Abfluss-Randbedingung *Normal Depth* gewählt und ebenfalls das ermittelte Sohlgefälle angegeben (s. Abbildung 9-7). Für jedes der Hochwasserereignisse wird eine eigene *Unsteady Flow* Datei mit den jeweiligen Durchflüssen erstellt.

9.2.3 Randbedingungen für bewegliche Wehröffnungen

Für Wehröffnungen stehen drei verschiedene Randbedingungstypen im *Unsteady Flow Data* Fenster zur Verfügung (s. Abbildung 9-4).

Time Series (T.S.) Gate Openings

Das Bearbeitungsfenster für den Randbedingungstyp *Time Series (T.S.) Gate Openings* ist in Abbildung 9-8 links zu sehen. Hier kann analog zu den Zeitreihen in Abschnitt 9.2.1 und 9.2.2 eine Zeitreihe für die Öffnungshöhe des *Gates* importiert (*Read from DSS before simulation*) oder manuell eingegeben werden (*Enter Table*). Auch die Eingabeoptionen für Zeitschritt und Zeitfenster sind analog zum *Flow Hydrograph*. In der Tabelle können die Öffnungshöhen für das ausgewählte *Gate* je Zeitschritt angegeben werden. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass die Änderungsrate für die Öffnung von Zeitschritt zu Zeitschritt nicht zu groß ist, da dies zu Instabilitäten in der Simulation führen kann. Ist dies in der Nähe einer Wehröffnung der Fall, müssen gegebenenfalls die Werte in der Tabelle angepasst oder der Zeitschritt für die Berechnung verringert werden (s. Abschnitt 10.1). (HEC, 2022d)

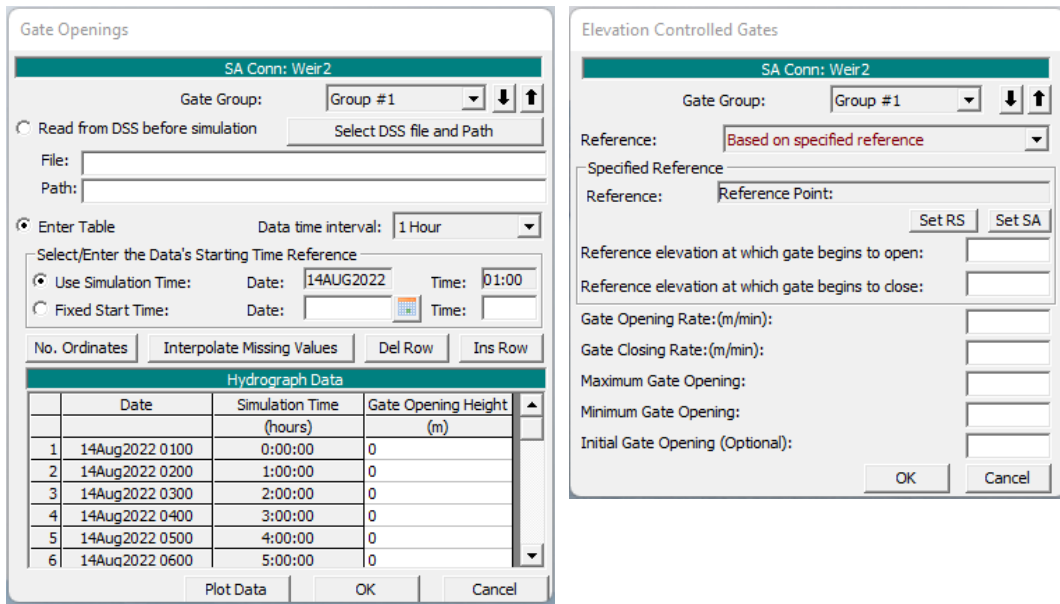


Abbildung 9-8: Randbedingungen für Wehröffnungen: *T.S. Gate Openings* (links), *Elev Controlled Gates* (rechts)

Elevation (Elev) Controlled Gates

Das Bearbeitungsfenster für den Randbedingungstyp *Elevation (Elev) Controlled Gates* ist in Abbildung 9-8 rechts zu sehen. Hier besteht die Möglichkeit, dass das *Gate* sich abhängig von bestimmten Wasserständen an einem definierten Ort öffnet und schließt. Um diesen Ort festzulegen, gibt es im Dropdown Menü hinter *Reference* drei Möglichkeiten:

- *Based on upstream WS*: Für diese Option verwendet das Programm den Wasserstand im Oberstrom der Öffnung als Referenz.
- *Based on specified reference*: Für diese Option verwendet das Programm den Wasserstand an einem vom Nutzer festgelegten Punkt (*Reference Point*). Dieser Punkt kann im *RAS-Mapper* im *Geometry* Unterlayer *Reference Point* gezeichnet werden. Anschließend kann der gewünschte Punkt im Fenster in Abbildung 9-8 rechts als Referenz ausgewählt werden.
- *Based on difference in stage*: Für diese Option verwendet das Programm die Wasserstandsdifferenz zwischen zwei Punkten (*Reference Points*). Diese Punkte können ebenfalls im *RAS-Mapper* im *Geometry* Unterlayer *Reference Point* gezeichnet und anschließend ausgewählt werden.

In den darunter befindlichen Feldern wird der Wasserstand bzw. die Wasserstandsdifferenz angegeben, bei dem das Tor öffnen (*elevation/difference at which gate begins to open*) und schließen soll (*elevation/difference at which gate begins to close*). Ebenfalls obligatorische Eingaben sind die Geschwindigkeit, mit der das Tor öffnen und schließen soll (*Gate Opening/Closing Rate*), sowie die maximale und minimale Öffnungshöhe (*Maximum/Minimum Gate Opening*). Optional kann zudem eine Anfangsöffnungshöhe (*Initial Gate Opening*) angegeben werden.

Rules

Die komplexeste Randbedingung für die Öffnungsbewegung von Wehren ist der Typ *Rules*. Es öffnet sich zunächst das Fenster in Abbildung 9-9 oben. Hier kann eine Beschreibung der Regeln unter *Description* angegeben werden. Auch bei dieser Randbedingung müssen die Öffnungs- und Schließgeschwindigkeiten (*Open/Close Rate*), die maximale und minimale Öffnungshöhe (*Max/Min*

Opening) sowie die Anfangsöffnungshöhe (*Initial Opening*) angegeben werden (s. Abbildung 9-9 Markierung oben).

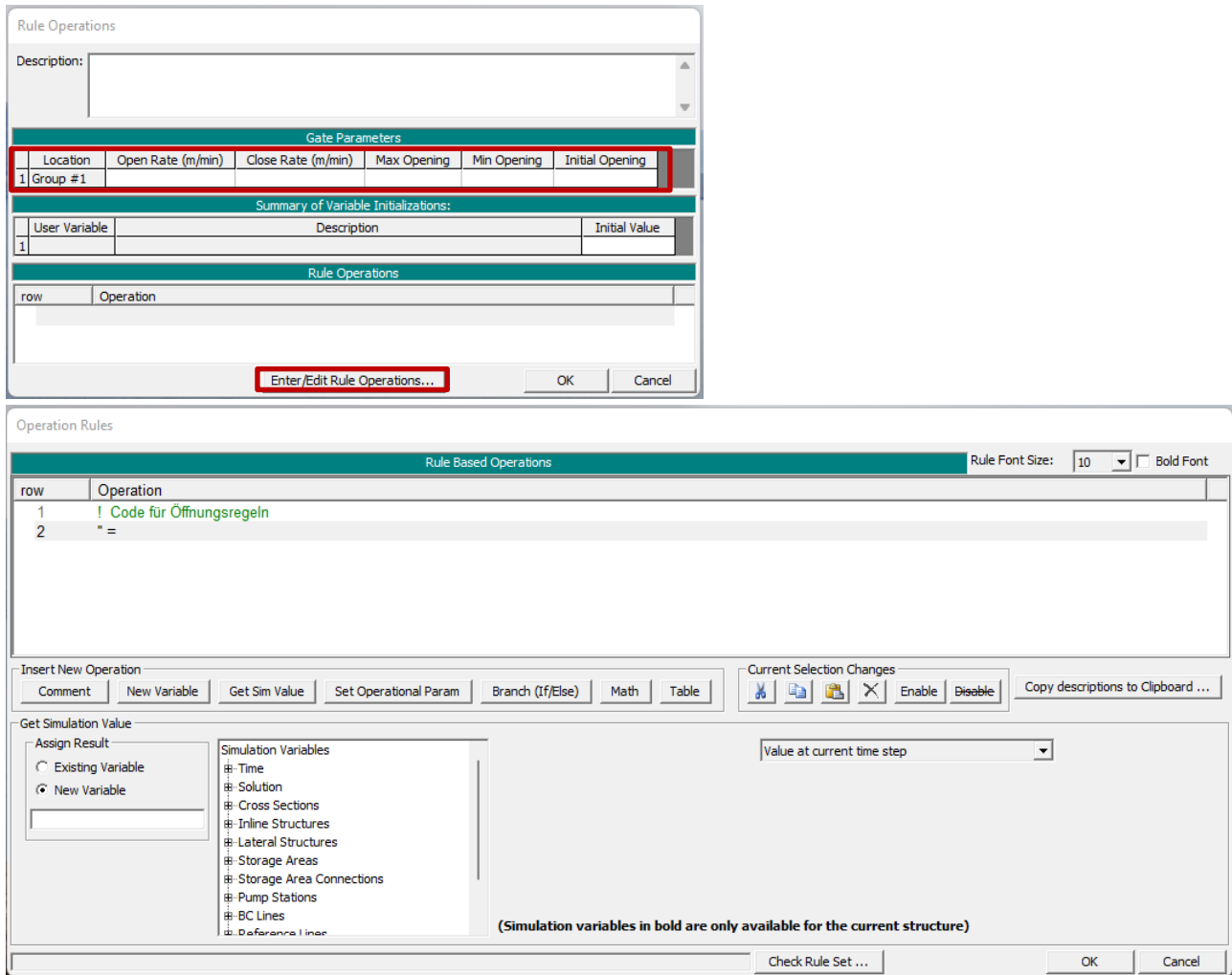


Abbildung 9-9: Randbedingung *Rules* für Wehröffnungen

Über die Schaltfläche *Enter/Edit Rule Operations* öffnet sich das Fenster in Abbildung 9-9 unten, über welches die eigentlichen Regeln eingegeben werden. Im Textfeld oben erscheint der Code für die Öffnungsregeln, welcher über die Schaltflächen unterhalb des Textfeldes mithilfe von simplen Operatoren erstellt werden kann. Eine detaillierte Anleitung zur Erstellung des Codes ist im „HEC-RAS User’s Manual“ im Abschnitt „Advanced Features for Unsteady Flow Routing – User Defined Rules for Hydraulic Structures and Pumps“ zu finden (HEC, 2022d, pp. 625-667). Ein kurzes Anwendungsbeispiel ist im YouTube Video „HEC-RAS Operational Rules Demo“ auf dem Kanal des HEC-RAS Mitentwicklers Stanford Gibson zu finden (Stanford Gibson, 2022a).

Für die Wehröffnung im Beispielprojekt wird die Randbedingung *T.S. Gate Openings* gewählt, da diese die simpelste Eingabemöglichkeit bietet. Da das Schütz nur der Anschauung dient und keine Daten zur Öffnung vorliegen, wird eine konstante Öffnungshöhe von Null angegeben, die ohne viel Aufwand verändert werden kann (s. Abbildung 9-8 links).

9.2.4 Niederschlag und Verdunstung als Randbedingung

Für die Modellierung von Niederschlag (englisch: *Precipitation*) gibt es in HEC-RAS zwei Möglichkeiten:

- Das gesamte Untersuchungsgebiet kann als globale Randbedingung hinzugefügt und dem Randbedingungstyp *Precipitation* zugeordnet werden. So wird für jede Zelle des Gebiets dieselbe Niederschlag-Zeitreihe simuliert. (The RAS Solution, 2018c), (HEC, 2022d)
- Unter Verwendung der Option *Meteorological Data* ist die Modellierung eines realen Niederschlagsereignisses mit räumlicher und zeitlicher Verteilung möglich. Zudem kann Verdunstung und Windkraft simuliert werden. (HEC RAS, 2022a), (HEC, 2022d)

Niederschlag als globale Randbedingung

Für die erste Option der Niederschlagssimulation muss zunächst das Untersuchungsgebiet als Randbedingungsort hinzugefügt werden. Dazu wird im *Unsteady Flow Data* Fenster die Schaltfläche *Add SA/2D Flow Area* gewählt (s. Abbildung 9-10 Markierung links). Es öffnet sich das Fenster in Abbildung 9-10 rechts, wo das gewünschte Gebiet ausgewählt und über die Pfeil Schaltfläche hinzugefügt wird. Nach Schließen des Fensters mittels OK wird das Gebiet bei den Randbedingungen aufgelistet und der Randbedingungstyp *Precipitation* wird als einzige zur Verfügung stehende Option ausgewählt. (HEC, 2022e), (The RAS Solution, 2018c)

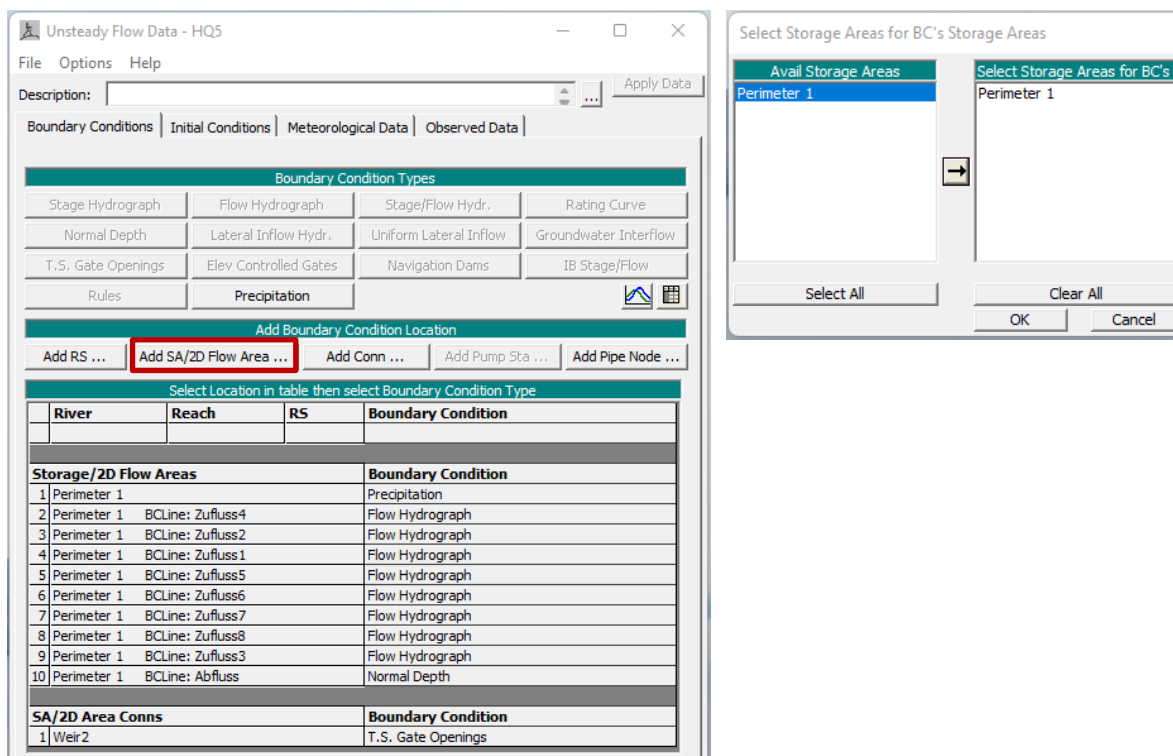


Abbildung 9-10: Hinzufügen eines 2D-Untersuchungsgebietes als Randbedingung

Im Bearbeitungsfenster der Randbedingung kann analog zu den vorherigen Zeitreihen (s. Abschnitt 9.2.1) ein Zeitschritt und ein Zeitfenster gewählt sowie in der Tabelle eine Zeitreihe für Niederschlagshöhen angegeben werden (s. Abbildung 9-11). (HEC, 2022e), (The RAS Solution, 2018c)

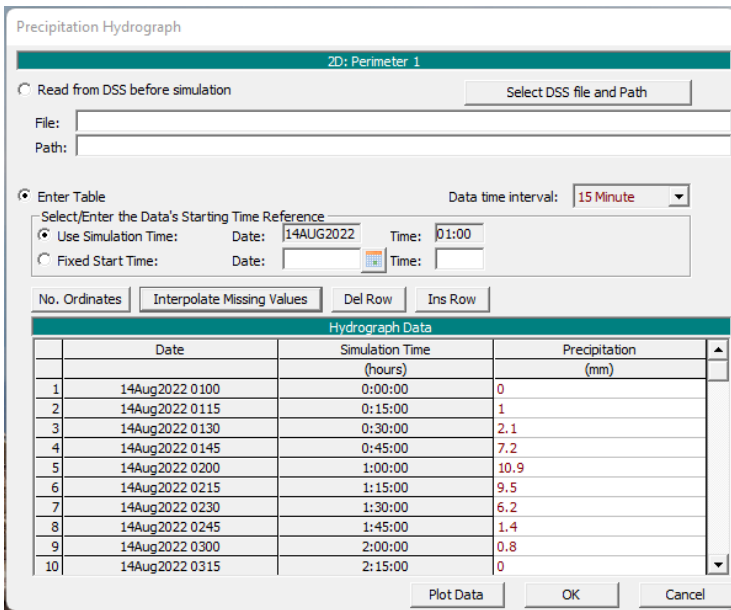


Abbildung 9-11: Randbedingung *Precipitation* für *2D Flow Area*

Niederschlag und Verdunstung aus meteorologischen Daten

Für die zweite Option der Niederschlagssimulation wird im *Unsteady Flow Data* Fenster der Reiter *Meteorological Data* ausgewählt (s. Abbildung 9-12 links oben). Soll nun räumlich verteilter Niederschlag und Verdunstung modelliert werden, müssen diese zunächst aktiviert werden, indem im markierten Dropdown Menü *Enable* ausgewählt wird (s. Abbildung 9-12 links Mitte). Für die Eingabe von Niederschlagswerten im Bereich *Precipitation* gibt es drei verschiedene Modi. (HEC, 2022e)

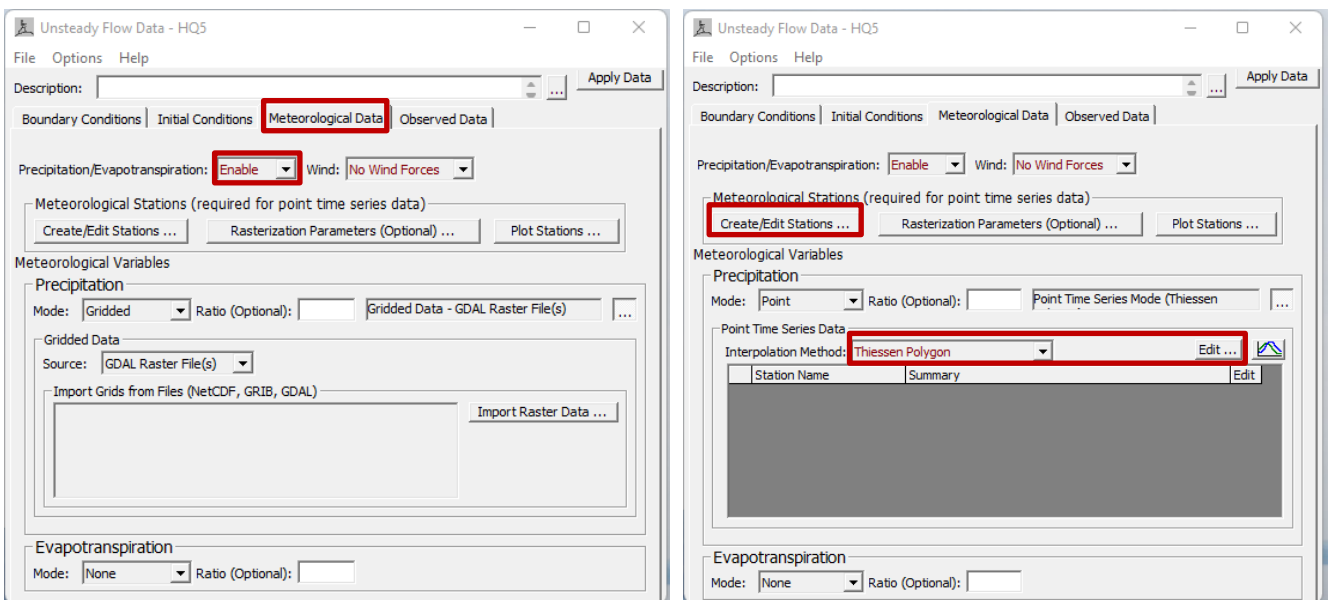


Abbildung 9-12: Eingabe meteorologischer Daten

- Im ersten Modus *Points* können Niederschlagsdaten an Messstationen, also an festgelegten Punkten, angegeben werden. Diese werden interpoliert, um eine räumliche Niederschlagsverteilung zu erhalten. Für diese Interpolation stehen vier Methoden unter anderem die *Thiessen Polygon* Methode zur Verfügung. Die Stationen, für die

Niederschlagszeitreihen zur Verfügung stehen, werden im Bereich *Meteorological Stations* über die Schaltfläche *Create/Edit Stations* erstellt (s. Abbildung 9-12 rechts oben). Im Bereich *Precipitation* wird im Dropdown Menü hinter *Interpolation Method* zunächst die Methode gewählt und über die Schaltfläche *Edit* rechts daneben die erstellten Stationen hinzugefügt (s. Abbildung 9-12 rechts Mitte). Um Stationen hinzuzufügen, müssen Niederschlagswerte entweder als Konstante, als Zeitreihe oder mittels Import hinzugefügt werden. (HEC, 2022e, pp. 145-151)

- Der zweite Modus, in dem Niederschlagswerte im Bereich *Precipitation* angegeben werden können, ist der Modus *Gridded* also per importierter Rasterdatei mit räumlich und zeitlich verteilten Niederschlagshöhen (s. Abbildung 9-12 links). Die Rasterdatei muss entweder im HEC internen *.dss-Format oder im *.gdal-Format (Geospatial Data Abstraction Library) vorliegen. Für letzteres sind die Formattypen *.nc (NetCDF) sowie *.bin (GRIB) zulässig. (HEC, 2022e, pp. 139-142)
- Im letzten Modus *Constant* kann eine konstante Niederschlagsintensität für das gesamte Untersuchungsgebiet angegeben werden.

Für die Modellierung von Evapotranspiration stehen dieselben drei Eingabemodi wie für Niederschlag zur Verfügung. Jedoch ist das Implementieren von Verdunstungswerten nur notwendig (und auch dann nur optional), wenn die Infiltrationsmethode *Deficit and Constant* oder *Green and Ampt* gewählt wurde (s. Abschnitt 5.4.2). (HEC, 2022e)

Im Dropdown Menü rechts von der Aktivierung des Niederschlags ist zudem die Aktivierung von Windkräften über verschiedene Eingabemöglichkeiten wählbar. Wurde Windkraft aktiviert, kann diese entweder als Windgeschwindigkeit in X- und Y-Richtung oder per Windgeschwindigkeit und Windrichtung angegeben werden. In beiden Fällen stehen dieselben Eingabemodi wie zuvor zur Verfügung (*Point, Gridded, Constant*). (HEC, 2022e, pp. 154-156)

Um beispielhaft ein Niederschlagsereignis zu simulieren, wird im Projektgebiet Erzingen eine fiktive Zeitreihe von Niederschlagshöhen als globale Randbedingung angegeben (s. Abbildung 9-11). Es liegen keine meteorologischen Daten zur räumlichen Niederschlagsverteilung vor, weshalb die Option der globalen Randbedingung die simpelste Lösung bietet. Das Niederschlagsereignis wird in einer separaten Simulation mit moderaten Durchflüssen an den Gewässern modelliert. Zusätzlich wird in dieser Simulation Infiltration durch Verknüpfen des entsprechenden Layers mit der Geometrie aktiviert (s. Abschnitt 7.1).

9.3 Anfangsbedingungen in der *Unsteady Flow Data*

Anfangsbedingungen (englisch: *Initial Conditions*) sind die Parameter (bspw. Wasserstand), die zum Zeitpunkt Null einer Simulation je Zelle gelten. Sie werden im *Unsteady Flow Data* Fenster über den Reiter *Initial Conditions* festgelegt (s. Abbildung 9-13 oben). Es gibt in HEC-RAS unterschiedliche Optionen, Anfangsbedingungen zu definieren. Welche Art der Anfangsbedingungen die sinnvollste ist, hängt von dem Modell sowie den geplanten Simulationen ab.

- Werden keinerlei Anfangsbedingungen definiert, startet das 2D-Modell trocken und für alle Zellen ist die anfängliche Wassertiefe Null. Hierfür ist im *Unsteady Flow Data* Fenster die Option *Enter Initial flow distribution* ausgewählt und die Spalte *Initial Elevation* leer.

- Es kann eine Höhe in m ü. NN. angegeben werden, damit alle Zellen, die eine niedrigere Geländehöhe als die angegebene aufweisen, als Anfangsbedingung mit diesem Wasserlevel starten.
 - Eine vorherige Simulation kann verwendet werden, um eine Neustart-Datei (englisch: *Restart File*) zu erzeugen, die die Anfangsbedingungen für alle Zellen vorgibt.
 - Es kann die *.hdf-Datei einer vorherigen Simulation verwendet werden, um die Ergebnisse eines beliebigen Zeitschrittes als Anfangsbedingung zu nutzen.
 - Eine Vorlaufzeit kann der eigentlichen Simulationszeit vorgeschaltet werden. Diese Option wird in Abschnitt 10.2.1 erläutert, da die Anlaufzeit erst in der *Plan* Datei aktiviert werden kann.
- (HEC, 2022e)

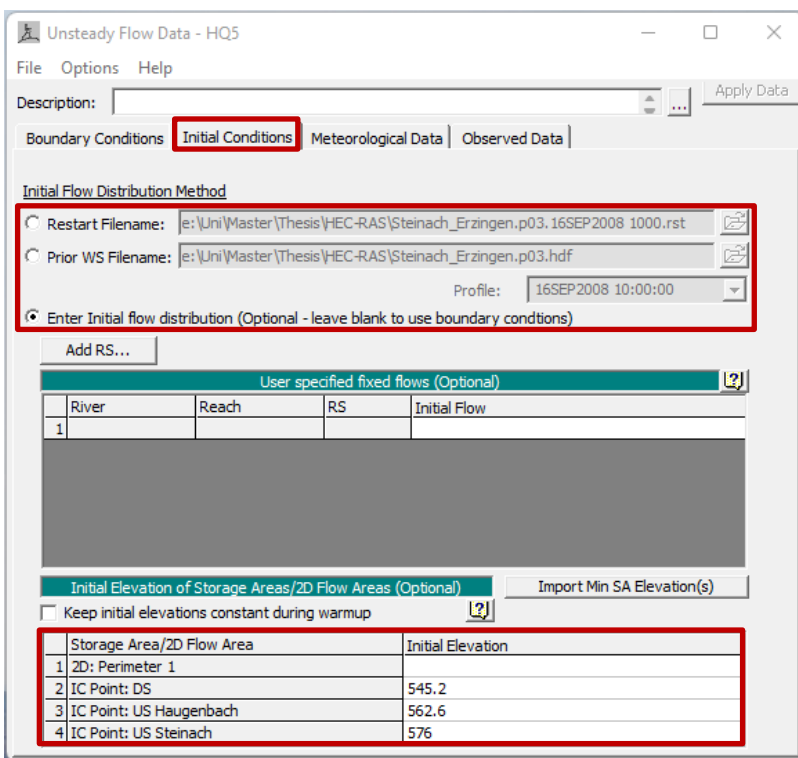


Abbildung 9-13: Eingabe von Anfangsbedingungen im *Unsteady Flow Data* Fenster

9.3.1 Anfangswasserlevel

Um einen bestimmten Wasserstand als Anfangsbedingung festzulegen, wird im *Unsteady Flow Data* Fenster die Option *Enter Initial flow distribution* ausgewählt (s. Abbildung 9-13 Mitte). In der unteren Liste (s. Abbildung 9-13 unten) ist das Untersuchungsgebiet automatisch gelistet. In der zweiten Spalte (*Initial Elevation*) wird der gewünschte, anfängliche Wasserstand für das Gebiet eingetragen. Es ist zudem möglich, zusätzlich zum 2D-Untersuchungsgebiet einen anfänglichen Wasserstand an bestimmten Punkten zu definieren. Diese Punkte können im *RAS-Mapper* im *Geometry* Unterlayer *Initial Condition Points* gezeichnet werden. Anschließend werden die Punkte in der unteren Tabelle des Fensters in Abbildung 9-13 gelistet. Der dort angegebene Wasserstand für den ersten Zeitschritt wird sich von den Punkten so weit ausbreiten, bis er auf den Rand des Untersuchungsgebietes oder auf höher liegendes Gelände stößt. Hierzu zählen auch höher liegende, eindimensionale Bauwerke wie Wehre. Demnach wird empfohlen, *Initial Condition Points* im Unterstrom nahe des Ausstromrandes zu setzen und im Oberstrom nur dort, wo das Wasser durch Dämme o. ä. gestaut wird. Diese Option der

Anfangsbedingung ist also sinnvoll, soll zum Beispiel ein Becken gefüllt werden. Liegt jedoch ein längerer, ununterbrochener Gewässerabschnitt vor, kann bei dieser Option aufgrund des Gefälles nicht der gesamte Gewässerlauf gefüllt werden. (HEC, 2022e), (HEC, 2022h)

9.3.2 Restart File

Möchte der Nutzer die Wasserspiegel je Zelle aus einem *Restart File* als Anfangsbedingung verwenden, muss eine solche Datei zunächst als Ausgabeoption bei einer vorherigen Simulation erzeugt werden (s. Abschnitt 10.3). Dabei kann ein beliebige Zeitschritt als Ausgabe für die *Restart* Datei angegeben werden. Existiert solch eine Datei, muss im *Unsteady Flow Data* Fenster die Option *Restart Filename* ausgewählt werden (s. Abbildung 9-13 Mitte). Anschließend kann über die Ordner Schaltfläche der Dateipfad des *Restart Files* hinterlegt werden. Die Datei ist über denselben Pfad gespeichert, wie die *Plan* Datei, der die *Restart* Datei zugrunde liegt und besitzt das Format *.rst. Der Dateiname beinhaltet zudem den Namen des Projektes, die *Plan* Nummer sowie den Zeitschritt (*Projekt.p##.Zeitschritt.rst*). (HEC, 2022e), (HEC, 2022d)

9.3.3 Ergebnisse einer vorherigen Simulation

Sollen als Anfangsbedingung die Wasserstände je Zelle für einen wählbaren Zeitschritt aus einer vorherigen Simulation festgelegt werden, muss im *Unsteady Flow Data* Fenster die Option *Prior WS Filename* ausgewählt werden (s. Abbildung 9-13 Mitte). Anschließend kann über die Ordner Schaltfläche der Dateipfad der *Plan* Datei der gewünschten Simulation angegeben und die automatisch erzeugte *.hdf-Datei gewählt werden. Der Dateiname beinhaltet zudem den Projektnamen und die *Plan* Nummer (*Projekt.p##.hdf*). Anschließend wird im *Unsteady Flow Data* Fenster im darunterliegenden Dropdown Menü (*Profile*) der Zeitschritt gewählt, der als Anfangsbedingung verwendet werden soll. Der Vorteil dieser Option der Anfangsbedingung im Vergleich zum *Restart File* ist, dass der Zeitschritt flexibel gewählt werden kann. So können beispielsweise die Ergebnisse eine einzelne Simulation als Anfangsbedingung für verschiedene weitere Simulationen genutzt werden, indem unterschiedliche Zeitschritte angegeben werden. Dahingegen müssten hierfür mehrere *Restart* Dateien erzeugt werden. Zudem kann die Geometrie Datei der Simulation, die als Anfangsbedingung genutzt wurde, im Vergleich zur Geometrie Datei der eigentlichen Simulation verändert worden sein, was bei einem *Restart File* nicht möglich ist. (HEC, 2022e)

Für die Simulationen der Hochwasserszenarien in Erzingen wird die Option der Anfangsbedingungen aus einem *Restart File* sowie die Option der Vorlaufzeit verwendet. Für die erste Simulation mit dem niedrigsten Hochwasser („HQ5“) wird als Anfangsbedingung eine Vorlaufzeit von 3 Stunden gewählt, um das Modell zu fluten sowie alle Zuflüsse langsam auf die Werte des Hochwasserereignisses zu steigern (s. Abschnitt 10.2.1). Anschließend wird die Simulation weitere 4 Stunden mit konstanten Werten fortgesetzt, bis sich stationäre Verhältnisse einstellen. Am Ende der Simulationszeit wird ein *Restart File* erstellt. Dieses *Restart File* wird als Anfangsbedingung für die nächste Simulation („HQ10“) verwendet, um die Simulationszeit bis zu diesem Wasserstand nicht noch einmal rechnen zu müssen. In den Randbedingungen von „HQ10“ werden in den ersten 2 Stunden alle Zuflüsse linear von „HQ5“ auf „HQ10“ gesteigert, erneut gefolgt von weiteren 2 Stunden mit den konstanten Zuflusswerten. Zum Schluss wird erneut ein *Restart File* erstellt, welches als Anfangsbedingung für die nächste Simulation verwendet wird. Analog wird für die Hochwasserszenarien „HQ50“, „HQ100“ sowie „HQextrem“ vorgegangen. Auf diese Weise wird Berechnungszeit eingespart.

10 2D-Strömungssimulation

Das Festlegen aller Simulationsparameter sowie die Verknüpfung von Geometrie Datei und *Unsteady Flow* Datei in einer *Plan* Datei (s. Abschnitt 2.3) geschieht über die Schaltfläche *Unsteady Flow Analysis* über das HEC-RAS Hauptfenster (s. Abbildung 10-1).

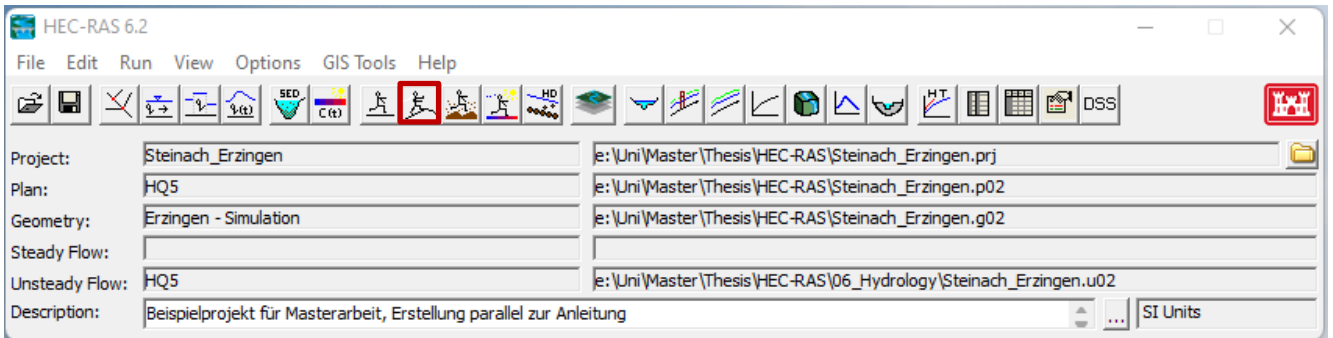


Abbildung 10-1: *Unsteady Flow Analysis* Schaltfläche im Hauptfenster von HEC-RAS

Im *Unsteady Flow Analysis* Fenster (s. Abbildung 10-2) wird zunächst über den Reiter *File* – *New Plan* eine neue *Plan* Datei erstellt. Diese sollte eingängig benannt und im Ordner „07_Results“ gespeichert werden. Anschließend muss eine *Short ID* angegeben werden, welche später der Titel der Simulationsergebnisse ist. Die *Plan* Datei sollte vor und nach einer Simulation manuell über *File* – *Save Plan* gespeichert werden. In den Dropdown Menüs hinter *Geometry File* und *Unsteady Flow File* werden die in den Kapiteln 7 und 0 erstellen Geometrie bzw. *Unsteady Flow* Dateien ausgewählt, die für die Simulation verwendet werden sollen. Die ausgewählte Geometrie Datei sollte zuvor mit den gewünschten Layern im *RAS-Mapper* verknüpft worden sein (s. Abschnitt 7.1). Im Feld *Plan Description* kann eine Beschreibung angegeben werden.

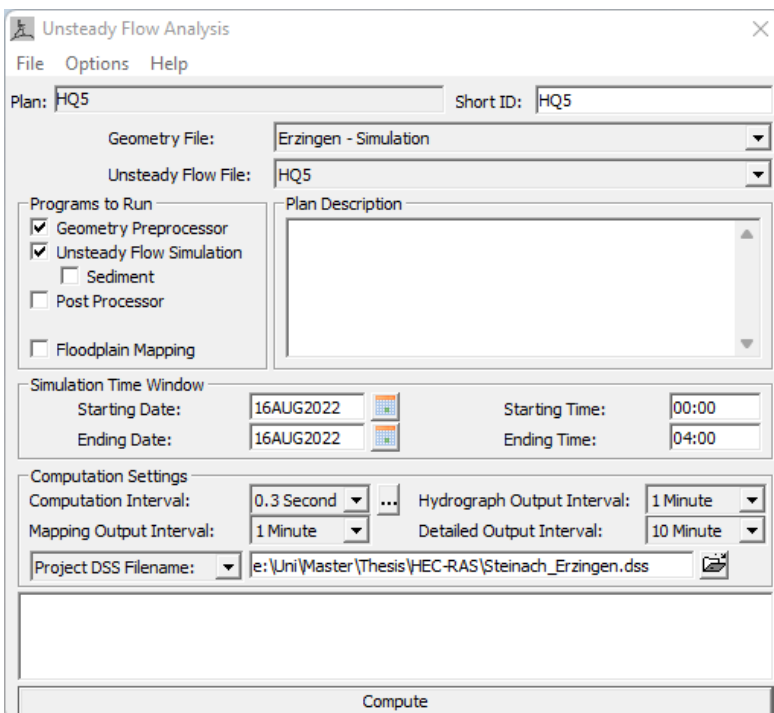


Abbildung 10-2: *Unsteady Flow Analysis* Fenster

Im Bereich *Programs to Run* (s. Abbildung 10-2) müssen die gewünschten Berechnungen ausgewählt werden. Für eine 2D-Strömungssimulation sollten der *Geometry Preprocessor* sowie die *Unsteady Flow Simulation* aktiviert sein:

- Der *Geometry Preprocessor* berechnet die Eigenschaften-Tabellen aller Netzzellen (s. Abschnitt 7.2.1) sowie die Wasserstand-Durchfluss-Beziehungen der 1D-Bauwerke, die in der Geometrie Datei hinterlegt sind (s. Abschnitt 8.2). Dieser kann einzeln ausgeführt werden, wenn nur Elemente der Geometrie Datei überprüft werden sollen. Für eine 2D-Simulation muss der *Geometry Preprocessor* mindestens einmal ausgeführt werden, danach nur bei einer Änderung der Geometrie Datei. Wurde er bereits ausgeführt und wurde nichts verändert, wird der *Preprocessor* auch wenn er in der *Plan* Datei ausgewählt ist, bei einer erneuten Simulation automatisch übersprungen. Es ist demnach sinnvoll, diese Auswahl immer zu aktivieren.
 - Die eigentliche instationäre Berechnung wird mit der Option *Unsteady Flow Simulation* aktiviert. Bei einer Simulation von Feststofftransport kann zusätzlich die Option *Sediment* aktiviert werden (s. Abschnitt 11.4). Diese Berechnung beinhaltet erstens das optionale Auslesen von *.dss-Dateien, zweitens die Strömungssimulation sowie drittens das Schreiben von Ergebnisdateien für Wasserstand und Durchfluss für alle Zellen.
 - Der *Post Processor* berechnet eine Reihe weiterer hydraulischer Parameter, die über die Berechnung von Wasserständen sowie Durchflüssen hinausgehen. Diese Option ist jedoch nur für die 1D- und gemischte 1D/2D-Simulation verfügbar. (HEC, 2022e)
 - Die Option *Floodplain Mapping* existiert hauptsächlich für die automatisierte Erstellung von Überflutungskarten für zusätzliche HEC interne Programme und ist für die alleinige Verwendung von HEC-RAS nicht notwendig. Alle gewünschten Karten können auch ohne diese Option nach der Simulation im *RAS-Mapper* erstellt werden. (HEC, 2022e)
- (HEC, 2022d)

Im Bereich *Simulation Time Window* (s. Abbildung 10-2) wird der Zeitraum ausgewählt, für den die Simulation berechnet werden soll. Dieser Zeitraum muss kürzer sein als die im *Unsteady Flow Data* Fenster angegebene Zeitreihe bzw. muss sich innerhalb dieser bewegen (s. Abschnitt 9.2.1). Das Datum kann aus einem Kalender gewählt werden. Die Uhrzeit muss im Format *hh:mm* angegeben werden, da sonst eine Fehlermeldung auftritt.

Im Bereich *Computation Settings* (s. Abbildung 10-2) können verschiedene Zeitintervalle ausgewählt werden. Die *Output* Zeitschritte dienen dem Zweck, dass bei einem niedrigen Berechnungszeitschritt nicht unnötig viele Daten gespeichert werden müssen, sondern nur so viel, wie für die Ergebnisdarstellung notwendig ist. Alle *Output Intervals* müssen größer oder gleich dem *Computation Interval* sein. (HEC, 2022d)

- *Computation Interval*: In diesem Zeitschritt werden die Strömungsparameter je Zelle während der 2D-Simulation berechnet. Bei der Wahl dieses Zeitschritts muss die Courant-Bedingung beachtet werden (s. Abschnitt 10.1).
- *Hydrograph Output Interval*: In diesem Zeitschritt werden Wasserstands- und Durchfluss-Ganglinien an 1D-Bauwerken ausgegeben. (HEC, 2022d)
- *Mapping Output Interval*: In diesem Zeitschritt können die dynamischen Überflutungskarten im *RAS-Mapper* in der Ergebnisdarstellung das Überflutungsgeschehen als Sequenz darstellen (s. Abschnitt 12.1.1). (HEC, 2022e)

- *Detailed Output Interval*: In diesem Zeitschritt werden die zusätzlichen Parameter an 1D-Querschnitten oder Bauwerken im Zuge des *Post Processors* bei 1D- und gemischten 1D/2D-Simulation ausgegeben. (HEC, 2022d), (HEC, 2022e)

10.1 Wahl des Berechnungszeitschrittes anhand der Courant-Bedingung

Ein bedeutender Parameter in der numerischen Strömungsberechnung ist die Courant-Zahl Cr [-]. Sie ist für die Wahl eines passenden Zeitschrittes das wichtigste Kriterium und wird wie folgt definiert: (Ferziger, et al., 2020)

$$Cr = \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta x} = \frac{\Delta t}{\Delta x/v} \quad (10-1)$$

Hierbei ist v [m/s] die Fließgeschwindigkeit, Δt [s] der Zeitschritt und Δx [m] die Zellgröße. Damit gibt der Nenner die Zeit an, die ein Teilchen braucht, um mit der Fließgeschwindigkeit v eine Zelle der Größe Δx zu durchströmen. Diese Zeit wird auch charakteristische Konvektionszeit genannt. Die Courant-Zahl als Verhältnis aus Zeitschritt und charakteristischer Konvektionszeit gibt somit an, wie viele Zellen in einem Zeitschritt durchströmt werden. Die Courant-Bedingung sagt aus, dass die Courant-Zahl $Cr \leq 1$ sein muss, also nicht mehr als eine Zelle pro Zeitschritt durchströmt wird. Die Einhaltung dieses Kriteriums ist essenziell für eine stabile numerische Berechnung. Die Courant-Bedingung setzt demnach eine Obergrenze für den Berechnungszeitschritt. Eine Untergrenze wird in erster Linie durch die Berechnungsdauer gesetzt, da ein doppelt so großer Zeitschritt eine halbierte Simulationsdauer bedeutet. (Ferziger, et al., 2020), (Ghaib, 2019)

In HEC-RAS gibt es vier unterschiedliche Gleichungssätze (s. Abschnitt 10.2.2), die für eine Simulation ausgewählt werden können. Je nach Gleichungssatz sollte eine spezifische, maximale Courant-Zahl nicht überschritten werden. Diese sind für die verschiedenen Gleichungssätze in Tabelle 10-1 aufgelistet. Die unterschiedlichen Maximalwerte, die zum Teil > 1 sind, resultieren daraus, dass die Gleichungen numerisch unterschiedlich stabil laufen und unterschiedlich sensibel auf hohe Courant-Zahlen reagieren. Tendenziell ist es jedoch bei instationären Strömungen empfehlenswert, für alle Gleichungssätze $Cr \leq 1$ zu erreichen. In Fällen, in denen andere Parameter hohe Schwankungen aufweisen (z. B. bei starker Durchflusssteigerung einer Randbedingung oder starker Wasserstandssteigerung insbesondere bei der Flutung eines trockenen Bereichs), ist die Einhaltung der Courant-Bedingung auch bei den weniger sensiblen Gleichungen notwendig. (HEC, 2022e)

Tabelle 10-1: Maximale Courant-Zahlen je nach verwendetem Gleichungssatz (HEC, 2022d), (HEC, 2022i)

Gleichungssatz (englisch)	Gleichungssatz (deutsch)	Maximale Courant-Zahl
<i>Diffusion Wave Equations</i>	Diffusionswellengleichung	5
<i>Shallow Water Equations (Local Inertial Approximation)</i>	Flachwassergleichung (Lokale Trägheitsapproximation)	5
<i>Shallow Water Equations (Eulerian-Lagrangian Method)</i>	Flachwassergleichung (Euler-Lagrange'sche Methode)	3
<i>Shallow Water Equations (Eulerian Method)</i>	Flachwassergleichung (Euler'sche Methode)	1

Die Wahl eines angemessenen Zeitschrittes kann beruhend auf der Courant-Bedingung in der Praxis folgendermaßen angegangen werden: (HEC, 2022e)

1. Ermittlung der mittleren Zellgröße Δx im Berechnungsnetz des Gewässerlaufs (s. Kapitel 7).
2. Ermittlung der maximalen Fließgeschwindigkeit v .
 - a. Für den Fall, dass noch keine vorherige Simulation stattgefunden hat: Schätzung der maximalen Fließgeschwindigkeit v .
 - b. Für den Fall, dass bereits eine Simulation durchgeführt wurde: Ermittlung der maximalen Fließgeschwindigkeit v im *RAS-Mapper* (s. Abschnitt 12.1.1).
3. Berechnung des Zeitschritts Δt , sodass $Cr = 1$ für die maximale Fließgeschwindigkeit gilt.

Nach einer ersten Simulation sollten Fließgeschwindigkeit und Courant-Zahl kontrolliert (s. Abschnitt 12.1.1) und der Zeitschritt gegebenenfalls angepasst werden. (HEC, 2022g)

Es besteht zudem die Möglichkeit, den Zeitschritt automatisch vom Programm wählen zu lassen, anhand vom Nutzer angegebener minimaler und maximaler Courant-Zahlen. Diese Option ist im Reiter *Options – Computation Options and Tolerances – Advanced Time Step Control* des *Unsteady Flow Analysis* Fenster zu finden (s. Abbildung 10-2). Es öffnet sich das Fenster in Abbildung 10-3. Hier muss die Option *Adjust Time Step Based on Courant* gewählt werden. Die ersten beiden Zellen geben die gewünschten Minimal- und Maximalwerte der Courant-Zahl an. Hierbei wird empfohlen, das Minimum etwas niedriger als das halbierte Maximum zu setzen, um unerwünscht Oszillationen zu vermeiden (HEC RAS, 2022b). Die letzten beiden Werte (*Maximum number of doubling/halving base time step*) geben den maximal und minimal zu erreichenden Zeitschritt durch die Anpassung wieder. Die Werte sollten in etwa zwischen 2 und 8 liegen und so angepasst werden, sodass die dahinter eingblendeten Werte für die Extremwerte des Zeitschritts angemessen erscheinen (HEC RAS, 2022b). Der mittlere Wert (*Number of steps below Minimum before doubling*) gibt die Anzahl an Zeitschritten an, bei denen die minimale Courant-Zahl unterschritten werden darf, bevor der Zeitschritt verdoppelt wird. So sollen ebenfalls unnötige Oszillationen vermieden werden. Der Wert sollte ebenfalls zwischen 2 und 8 liegen (HEC RAS, 2022b). (HEC, 2022e)

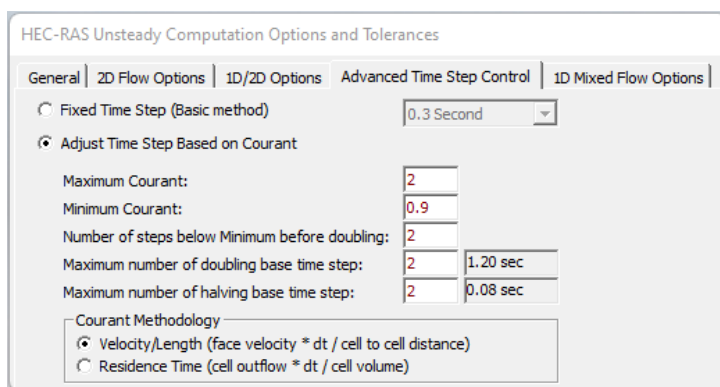


Abbildung 10-3: Optionen zur automatischen Anpassung des Zeitschrittes

Für das Beispielprojekt werden verschiedene Hochwasserereignisse simuliert, für die jeweils einzelne *Plan* Dateien erstellt werden. Die Einstellungen der *Plan* Datei für die Durchflüsse eines Hochwasserereignisses mit einer Jährlichkeit von 5 Jahren sind in Abbildung 10-2 exemplarisch dargestellt. Diese sind jedoch für alle Simulationen identisch. Die Datei wird „HQ5“ benannt und es

werden die Geometrie Datei „Erzingen-Simulation“, die das Berechnungsnetz sowie die 1D-Bauwerke beinhaltet, und die dem 5-jährigen Hochwasser zuzuordnende *Unsteady Flow* Datei „HQ5“ ausgewählt. Es werden die Berechnungen *Geometry Preprocessor* sowie die *Unsteady Flow Simulation* aktiviert. Der Simulationszeitraum wird beliebig gewählt, da nur konstante Durchflusswerte vorliegen bzw. simuliert werden, die keinem spezifischem Zeitfenster zuzuordnen sind. Es wird über einen Zeitraum von 4 Stunden simuliert, da aufgrund der Anfangsbedingungen (s. Abschnitt 10.2) die gewünschten Durchflüsse zum Simulationsbeginn bereits erreicht sind. So muss lediglich lang genug simuliert werden, um einen stationären Zustand zu erreichen. Als anfänglicher Berechnungszeitschritt wird 0,3 Sekunden eingestellt, da sich dieser mit einer maximalen Fließgeschwindigkeit von 6 m/s, einer Zellgröße im Gewässerlauf von 1 m und einer maximalen Courant-Zahl von 2 (*SWE-ELM*) wie folgt berechnet:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{v_{max}} \cdot Cr_{max} = \frac{1 \text{ m}}{6 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \cdot 2 = 0,33 \text{ s}$$

Zusätzlich wird die automatische Zeitschrittanpassung anhand der Courant-Zahl mit den Angaben aus Abbildung 10-3 aktiviert. Als Ausgabezeitschritt für Ganglinien und Überflutungskarten werden jeweils Zeitschritte von 1 Minute eingestellt. Der Ausgabezeitschritt *Detailed Output Interval* ist aufgrund der 2D-Simulation nicht relevant.

10.2 Berechnungsparameter

Eine Reihe weiterer Berechnungsparameter, unter anderem die Auswahl der Gleichungssätze geschieht im *Unsteady Flow Analysis* Fenster über den Reiter *Options – Computation Options and Tolerances*. Es öffnet sich das Fenster in Abbildung 10-4. Für eine 2D-Simulation wird der Reiter *2D Flow Options* ausgewählt. Im Folgenden werden die Parameter, welche in der Tabelle modifiziert werden können, erläutert sowie ihre Bedeutung für eine Simulation erklärt. Ausgegraute Felder werden nur bei einer Aktivierung bestimmter Funktionen in vorherigen Feldern verwendet:

- 1. *Theta*, 2. *Theta Warmup*: *Theta* ist ein Gewichtungsfaktor für die implizite Berechnung. Bei der impliziten numerischen Berechnung eines Wertes hängt dieser nicht nur von dem Wert des vorherigen Zeitschrittes ab, sondern auch vom neuen Wert selbst (Martin, 2011). *Theta* gibt an, mit wie viel Gewicht der neue Wert selbst in die Berechnung einfließt. Ein Wert von 0,5 bedeutet hierbei die präziseste Lösung, wohingegen ein *Theta* von 1 mit impliziter Berechnung die stabilste Lösung darstellt. Es kann für die Anlaufzeit (s. Abschnitt 10.2.1) ein anderes *Theta* gewählt werden (*Theta Warmup*) als für die eigentliche Simulation (*Theta*).
- 3. *Water Surface Tolerance*, 4. *Volume Tolerance*, 5. *Maximum Iterations*: Bei der iterativen Berechnung eines Wertes für den Wasserspiegel wird dieser zunächst geschätzt, in die Gleichung, die vom Wasserspiegel selbst abhängt, eingesetzt und ein neuer Wert für den Wasserspiegel berechnet. Im nächsten Iterationsschritt wird das vorherige Ergebnis eingesetzt und der Wasserspiegel neu berechnet. Dies geschieht so lange, bis entweder *Maximum Iterations* erreicht ist oder die Differenz der Ergebnisse von einer zur nächsten Iteration unter der *Water Surface Tolerance* liegt. Instabilität in einer Berechnung liegt dann vor, wenn diese Differenz mit steigendem Iterationsschritt steigt, anstatt zu sinken. *Volume Tolerance* funktioniert analog zu *Water Surface Tolerance*, nur dass das Volumen über die *Property Tables* des Berechnungsnetzes

- abhängig vom Wasserspiegel berechnet wird. Es wird empfohlen, diese Werte nicht zu verändern, da dies nicht die Ursache von möglichen Instabilitäten behebt.
- 6. *Equation Sets*: Die Bedeutung der verschiedenen Gleichungssätze wird in Abschnitt 10.2.2 ausführlich erläutert.
 - 7. *Initial Condition Time*, 8. *Initial Conditions Ramp Up Fraction*: Die beiden Optionen zur Anlaufzeit werden in Abschnitt 10.2.1 erläutert.
 - 9. *Number of Time Slices*: Der Wert aus *Computation Internal* (s. Abschnitt 10 sowie 10.1) wird durch diesen ganzzahligen Wert geteilt. Existieren mehrerer *Perimeter*, die miteinander verknüpft sind, können für diese so unterschiedliche Zeitschritte verwendet werden.
 - 10. *Turbulence Model*: Hier wird die Berechnung der Wirbelviskosität (s. Abschnitt 10.2.2) eingestellt, wenn als Gleichungssatz *SWE-EM* oder *SWE-ELM* gewählt wurde. Bei *None* ist die Turbulenzmodellierung ausgeschaltet. Bei *Conservative* gibt es wenig bis keinen Impulsverlust aufgrund der Berechnung. Daher ist dies die empfohlene Einstellung. Die konservative Berechnung hält sich strikt an die Impulserhaltung. Eine Impulsänderung ist nur durch Quellen oder Senken möglich (Ferziger, et al., 2020). Bei *Non-Conservative* (nur bei *SWE-ELM* möglich) ist ein numerischer Impulsverlust abhängig von Zellgröße und Zeitschrittgröße möglich. Für die Auswahl *Conservative* sind niedrigere Mischungskoeffizienten (s. Zeile 11./12.) notwendig als bei *Non-Conservative* (HEC RAS, 2021b).
 - 11./12. *Longitudinal/Transverse Mixing Coefficient*: Die beiden Koeffizienten geben die Intensität der vertikalen Turbulenz in Strömungsrichtung (*Longitudinal*) und quer zur Strömungsrichtung (*Transverse*) an (s. Abschnitt 10.2.2). Empfohlene Wertebereiche sind dem „HEC-RAS 2D User's Manual“ zu entnehmen (HEC, 2022e, p. 181). Der longitudinale Koeffizient sollte ca. 2- bis 4-mal größer sein als der transversale (HEC RAS, 2022b). Diese Parameter sollten mit Messungen der Fließgeschwindigkeit kalibriert werden.
 - 13. *Smagorinsky Coefficient*: Der Parameter zur Berechnung der horizontalen Turbulenz (s. Abschnitt 10.2.2) sollte laut HEC zwischen 0,05 und 0,2 gewählt werden (HEC, 2022g). Andere Quellen geben einen Wertebereich von 0,065 bis 0,3 an (Ghaib, 2019). Dieser Parameter sollte mithilfe von Fließgeschwindigkeitsmessungen kalibriert werden.
 - 14. *Boundary Condition Volume Check*: Diese Funktion kontrolliert an 1D-2D-Verbindungen (also z. B. Wehre, Durchlässe, Brücken), ob in den verbundenen 2D-Zellen ausreichend Durchfluss für die 1D-Berechnung der Bauwerke zur Verfügung steht und reduziert diesen wenn nötig.
 - 15. *Latitude for Coriolis*: Wurde im oberen Bereich des Fensters der Coriolis-Effekt (also der Einfluss der Erdrotation auf die Strömung) aktiviert, muss hier der Breitengrad des Untersuchungsgebietes angegeben werden. Der Coriolis-Effekt kann nur bei der Verwendung einer der Flachwassergleichungssätze (*SWE*) berücksichtigt werden.
 - 16. *Solver Cores*: Hier kann angegeben werden, auf wie vielen Rechenkernen der Hardware eine Simulation laufen soll. Da HEC-RAS für die parallele Verwendung mehrerer Kerne vorgesehen ist, wird empfohlen diese Zeile bei der Standardeinstellung *All Available* (alle Verfügbaren) zu belassen.
 - 17. *Matrix Solver*: In diesem Feld kann zwischen direkter und iterativer Matrixberechnungen gewählt werden. Die Standardeinstellung *PARDISO* ist eine direkte Berechnung und daher präzise und stabil, weshalb es sinnvoll ist, diese Auswahl nicht zu ändern. Es stehen zwei weitere iterative Rechner zur Verfügung, für die in den folgenden Zeilen (18. – 23.) weitere Einstellungen getroffen werden können. Iterative Rechner können bei großen Modellen eine geringere Rechendauer aufweisen.
- (HEC, 2022e), (The RAS Solution, 2022)

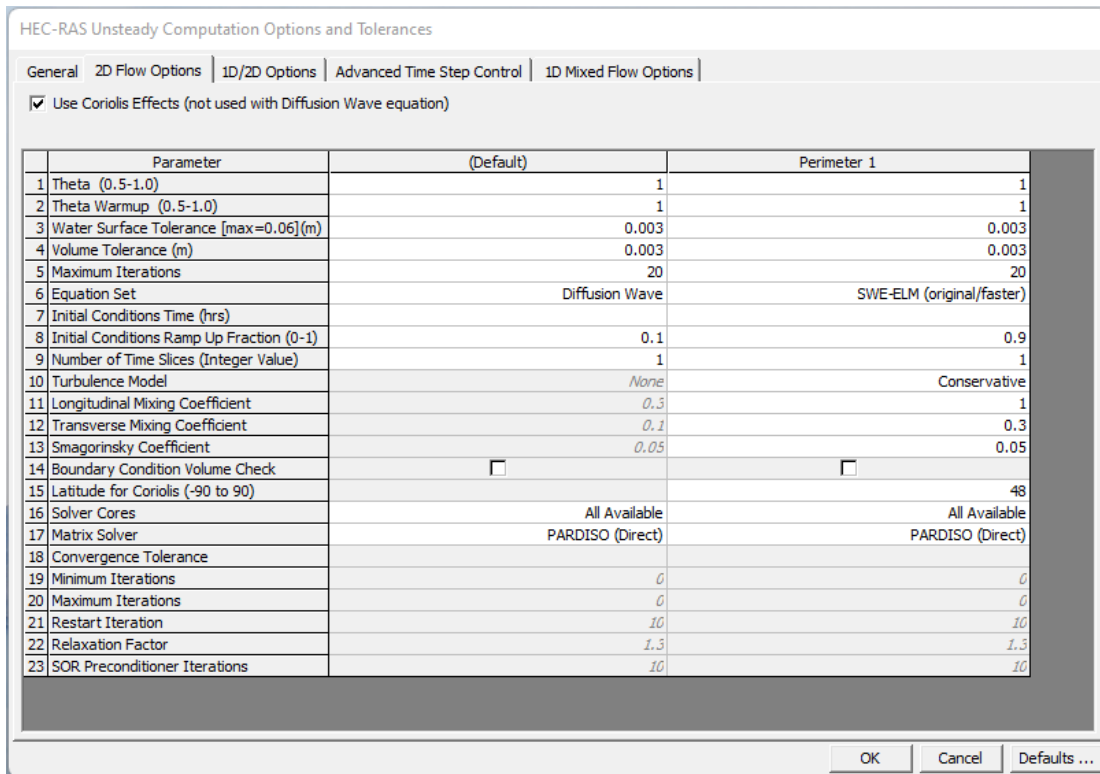


Abbildung 10-4: Berechnungsoptionen für eine 2D-Strömungssimulation

10.2.1 Vorlaufzeit als Anfangsbedingung

Die vierte Option zur Implementierung von Anfangsbedingungen (englisch: *Initial Conditions*) ist die Vorlaufzeit (englisch: *Warmup Time*). Diese kann in den Zeilen 7. und 8. eingestellt werden. 7. *Initial Conditions Time* ist hierbei die gesamte Vorlaufzeit, in der die in den Randbedingungen eingestellten Durchflüsse oder Wasserstände das Untersuchungsgebiet über die eingestellte Dauer fluten, um vor der eigentlichen Simulationszeit einen stabilen Zustand zu erreichen (s. Abbildung 10-5). Hierbei wird der erste Wert der Randbedingungsganglinie als Konstante verwendet. Da auf diese Weise jedoch immer noch das trockene Gebiet plötzlich geflutet wird, gibt es die Option einer Anlaufzeit (englisch: *Ramp Up Time*), die in Zeile 8. *Initial Conditions Ramp Up Fraction* als Anteil der Vorlaufzeit definiert werden kann (s. Abbildung 10-5). In der Anlaufzeit wird der Durchfluss oder Wasserstand von Null linear bis zum ersten Wert der Ganglinien erhöht. Der Standardwert 0,1 bedeutet beispielsweise, dass 10 % der Vorlaufzeit als Anlaufzeit verwendet werden. (HEC, 2022e), (Stanford Gibson, 2022b)

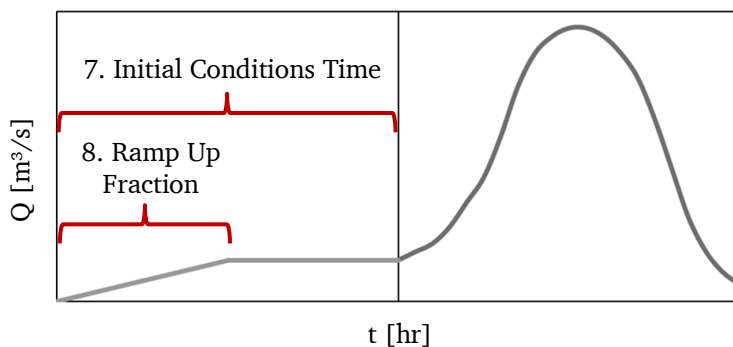


Abbildung 10-5: Durchflussganglinie mit Vor- und Anlaufzeit nach Stanford Gibson (2022b)

10.2.2 Gleichungssätze

Flachwassergleichungen

Für die zweidimensionale Berechnung von Fluidbewegung können in HEC-RAS vier verschiedene Gleichungssätze ausgewählt werden. Alle vier Gleichungssätze basieren auf den 3D-Navier-Stokes-Gleichungen, die die Gleichung zum Massenerhalt sowie die drei Gleichungen zur Impulserhaltung in die drei Raumrichtungen beinhaltet. Für die Modellierung von Überflutungsflächen und Wasserbewegung in einem Gewässerlauf werden zusätzliche Annahmen getroffen, um die 3D-Formeln in eine 2D-Form umzuwandeln. Diese hier verwendeten 2D-Gleichungen werden Flachwassergleichungen (englisch: *Shallow water equations*) genannt. Folgende Annahmen werden dafür getroffen: (HEC, 2022g)

- Konstante Dichte: Diese Annahme besagt, dass das betrachtete Fluid, in diesem Fall Wasser, sowohl inkompressible ist, als auch eine homogene Dichte ausweist. Die Dichte ist also zeitlich und räumlich konstant. (HEC, 2022g)
- Vernachlässigbare vertikale Geschwindigkeit w : Es wird angenommen, dass die horizontale, räumliche Ausbreitung (x - und y -Richtung) deutlich größer ist als die vertikale, räumliche Ausbreitung (z -Richtung). Daraus resultiert, dass die Fließgeschwindigkeitskomponente w in z -Richtung sehr klein ist und vernachlässigt werden kann. (HEC, 2022g)
- Hydrostatische Druckverteilung: Aufgrund der Annahme, dass die Fließgeschwindigkeit w in z -Richtung zu vernachlässigen ist, vereinfacht sich die Navier-Stokes-Gleichung zum Impulserhalt in z -Richtung so weit, dass sich die Gleichung zur hydrostatischen Druckverteilung mit dem Druck p [N/m^2], der Erdbeschleunigung g [m/s^2], der Wassertiefe h [m] und der Dichte von Wasser ρ [kg/m^3] ergibt: (Mewis, 2002)

$$p(z) = -\rho \cdot g \cdot h \quad (10-2)$$

- Reynolds gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen (englisch: *Reynold's-Averaged-Navier-Stokes*, RANS) mithilfe der Wirbelviskosität (englisch: *Eddy viscosity*): Die Annahme des RANS-Modells spaltet die Strömungsparameter, die aufgrund von Turbulenz Schwankungen unterliegen, in einen Mittelwert und einen davon abweichende Schwankungsanteil auf. Dadurch entstehen zusätzliche, unbekannte Terme in den Navier-Stokes-Gleichungen, die mithilfe der Wirbelviskositätstheorie gelöst werden. Diese Theorie wiederum führt zusätzlich zu der Viskosität von Wasser die Wirbelviskosität als weitere Größe ein, die die Reibungsverluste aufgrund von Turbulenz modelliert. Hierfür wird das *Parabolic-Smagorinsky* Modell genutzt. Dieses enthält unterschiedliche Koeffizienten für die longitudinale und transversale Turbulenz, um vertikale Turbulenz abzubilden, was das Modell anisotrop macht. Zudem ist der *Smagorinsky*-Term enthalten, der horizontale Turbulenz abbildet. (HEC RAS, 2021b), (HEC, 2022g), (Martin, 2011), (HEC RAS, 2022b)

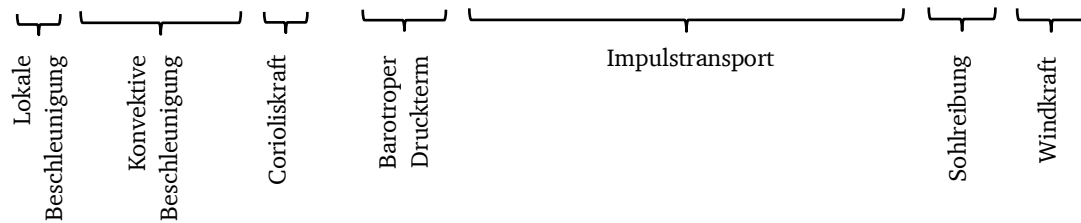
Basierend auf diesen Annahmen ergeben sich die 2D-Flachwassergleichungen. Der tiefengemittelte Massenerhalt ist in Gleichung (10-3) dargestellt (Martin, 2011), der Impulserhaltungssatz in x -Richtung in Gleichung (10-4) und in y -Richtung in Gleichung (10-5) (HEC, 2022g). Auf der linken Seite der Impulsgleichungen stehen die Terme der Beschleunigungen in x - und y -Richtung: lokale, instationäre Beschleunigung, zwei Terme der konvektiven Beschleunigung und die Corioliskraft durch die Erdrotation. Der Term der Corioliskraft kann im Fenster in Abbildung 10-4 aktiviert werden, sollte eine

der drei Flachwassergleichungen (*SWE-LIA*, *SWE-ELM* oder *SWE-EM*) verwendet werden. Die rechte Seite der Impulsgleichungen beinhaltet die wirkenden Kräfte: Druck, zwei Terme für den Impulstransport, Sohlreibung und Windkraft. Die Windkraft kann über die meteorologischen Randbedingungen (s. Abbildung 9-12) aktiviert werden. (HEC, 2022g)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q \quad (10-3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f_c v = -g \frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{t,x} h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{t,y} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,x}}{\rho r_{hy}} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho h} \quad (10-4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - f_c u = -g \frac{\partial z_s}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{t,x} h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{t,y} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,y}}{\rho r_{hy}} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho h} \quad (10-5)$$



h : Wassertiefe [m]

u : Fließgeschwindigkeitskomponente in x-Richtung [m/s]

v : Fließgeschwindigkeitskomponente in y-Richtung [m/s]

q : Quelle (positives Vorzeichen), Senke (negatives Vorzeichen) [m/s]

f_c : Coriolis-Parameter [1/s]

g : Erdbeschleunigung [m/s²]

z_s : Wasserspiegelhöhe [m ü. NN.]

$v_{t,x}$ bzw. $v_{t,y}$: Horizontale Wirbelviskosität in x- bzw. y-Richtung [m²/s]

$\tau_{b,x}$ bzw. $\tau_{b,y}$: Sohlschubspannung in x- bzw. y-Richtung [N/m²]

$\tau_{s,x}$ bzw. $\tau_{s,y}$: Oberflächenschubspannung durch Wind in x- bzw. y-Richtung [N/m²]

ρ : Dichte [kg/m³]

r_{hy} : Hydraulischer Radius [m]

Die Gleichungen (10-3) bis (10-5) bilden den Gleichungssatz, der bei den Optionen *SWE-LIA*, *SWE-ELM* sowie *SWE-EM* verwendet wird. Über die Annahmen zur Herleitung der Gleichungen hinaus, werden zudem zwei unterschiedliche numerische Berechnungsmethoden, also die Diskretisierung der Gleichungen für einen bestimmten Zeitschritt in einer bestimmten Zelle, angeboten. Es stehen die Euler-Lagrange'sche Methode (*ELM*) sowie die Euler'sche Methode (*EM*) zur Verfügung. Allgemein werden bei der Euler'schen Betrachtungsweise die Strömungsparameter für die verschiedenen Zeitschritte an einem festen Ort berechnet. Es werden also unterschiedliche Fluidpartikel betrachtet, die ein ortsfestes Kontrollvolumen durchströmen. Bei der Lagrange'schen Betrachtungsweise dagegen ist das Kontrollvolumen nicht ortsfest, sondern bewegt sich mit einem einzelnen Partikel, sodass die Strömungsparameter für die verschiedenen Zeitschritte an unterschiedlichen Orten berechnet werden. Bezogen auf die angebotenen Berechnungsmethoden wird bei der Berechnung der Beschleunigungsterme nach der Euler-Lagrange'schen Methode die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen

zwei Zeitschritten nicht innerhalb einer Zelle berechnet. Es wird stattdessen die Geschwindigkeit zurückverfolgt zur Zelle des vorherigen Zeitschrittes. Dahingegen werden nach der Euler'schen Methode die Beschleunigungsterme innerhalb eines ortsfesten Kontrollvolumens berechnet. Damit ist die Impulserhaltung nach der Euler'schen Methode etwas präziser, wohingegen sich die Euler-Lagrange'sche Methode auch bei größeren Zeitschritten als stabiler herausgestellt hat. Bei der lokalen Trägheitsapproximation (*LIA*), werden dagegen die Terme der konvektiven Beschleunigung und des Impulstransports vernachlässigt, was die Gleichungen zwar etwas ungenauer macht, aber auch eine deutlich schnellere Berechnungszeit sowie höhere Courant-Zahlen ermöglicht (HEC, 2022i). (HEC, 2022g), (HEC RAS, 2021b), (Laurien & Oertel jr., 2018)

Diffusionswellengleichung

Um die Diffusionswellengleichungen zu erhalten, wird eine weitere, vereinfachte Annahme getroffen: Die dominierenden Terme in den Impulsgleichungen (10-4) und (10-5) sind der Druckterm mit der Erdbeschleunigung sowie die Sohlreibung. Die übrigen Terme sind im Vergleich vernachlässigbar klein. Die Wasserbewegung wird also nur durch das Sohlgefälle angetrieben und durch die Sohlreibung gebremst. Wird diese stark vereinfachte Impulsgleichung in die Gleichung des Massenerhalts (10-3) eingesetzt und der Term für die Berechnung der Sohl Schubspannung τ_s substituiert, werden die Flachwassergleichungen zu einer einzigen Gleichung in Vektorschreibweise reduziert: (HEC, 2022g)

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{r_{hy}^{2/3} \cdot h}{n |\nabla z_s|^{1/2}} \cdot \nabla z_s \right) + q \quad (10-6)$$

Gleichung (10-6) stellt also den Gleichungssatz der *Diffusion Wave Equations* dar. Hierbei ist n [s/ m^{1/3}] der Rauheitsbeiwert nach Manning und ∇ der Nabla-Operator (HEC, 2022g), (Laurien & Oertel jr., 2018):

$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (10-7)$$

Empfehlung zur Auswahl eines Gleichungssatzes

Prinzipiell wird empfohlen zunächst die Diffusionswellengleichungen für eine Simulation zu verwenden, bis das Modell einwandfrei läuft und mögliche Probleme behoben sind. Dies ist von Vorteil, da bei mehreren Testläufen der Zeitschritt größer gewählt werden kann und die Simulationsdauer deutlich reduziert wird. Anschließend sollte die Simulation mit den Flachwassergleichungen wiederholt und die Ergebnisse verglichen werden. Weichen die Ergebnisse voneinander ab, liefern die Flachwassergleichungen die präziseren Werte. Weichen die Ergebnisse nicht voneinander ab, können für weitere Modellvarianten die Diffusionswellengleichungen verwendet werden. Im Vergleich der Berechnungsmethoden der Flachwassergleichungen kann die Euler'sche Methode in Fällen mit kleinem Maßstab präziser sein als die Euler-Lagrange'sche Methode (HEC, 2022g). Sollen also Labormaßstäbe modelliert werden, wird die Euler'sche Methode empfohlen. Die lokale Trägheitsapproximation der Flachwassergleichung ist, was die Präzision angeht, zwischen Diffusionswellengleichung und den beiden anderen Flachwassergleichungen einzuordnen und kann für leicht ansteigende Ganglinien und die Berücksichtigung von Wind verwendet werden (HEC, 2022i). (HEC, 2022e)

Allgemein existieren einige Fälle, die aufgrund der Vereinfachungen in den Diffusionswellengleichungen und der lokalen Trägheitsapproximation nur mit den Flachwassergleichungen gerechnet werden sollten:

- Dynamische Hochwasserwellen: Beschleunigungsterme, die in den Diffusionswellengleichungen und der lokalen Trägheitsapproximation vernachlässigt werden, spielen hier eine große Rolle.
- Abrupte Kontraktionen und Ausdehnungen: Auch hier sind die Beschleunigungsterme relevant.
- Gewässerlauf mit flachem Gefälle (weniger als 0,2 ‰): Hier sind Sohlgefälle und Sohlreibung nicht mehr die dominierenden Kräfte, weshalb die Annahmen der Diffusionswellengleichungen nicht zulässig sind.
- Beeinflussung durch Gezeiten in Buchten oder Ästuaren: Langstreckige Wellenausbreitung ist aufgrund der fehlenden Beschleunigungsterme mit den Diffusionswellengleichungen und der lokalen Trägheitsapproximation nicht möglich.
- Weitere Phänomene mit Wellenausbreitung
- Querneigung des Wasserspiegels in Flusskurven: Für die Modellierung dieses Phänomens werden alle Terme des Impulserhaltungssatzes benötigt.
- Detaillierte Abbildung von Wasserspiegel und Fließgeschwindigkeit um Bauwerke: Es sind nicht nur alle Terme des Impulserhaltungssatzes, sondern auch kleine Zellgrößen und ein kleiner Zeitschritt nötig.
- Fließwechsel: Für die Modellierung des Übergangs zwischen schießendem und strömendem Fließzustand oder andersherum liefern die Flachwassergleichungen präzisere Ergebnisse als die Diffusionswellengleichungen oder die lokale Trägheitsapproximation.

(HEC, 2022e)

Eine Zusammenfassung der für die vier Gleichungssätze getroffenen Annahmen ist Tabelle 10-2 zu entnehmen:

Tabelle 10-2: Zugrundeliegende Annahmen für die zur Verfügung stehenden Gleichungssätze (HEC, 2022g)

Gleichungssatz (englisch)	Gleichungssatz (deutsch)	Annahmen
<i>Shallow Water Equations (Eulerian-Lagrangian Method)</i> SWE-ELM	Flachwassergleichung (Euler-Lagrange'sche Methode)	<ul style="list-style-type: none"> – konstante Dichte – $w = 0$ – hydrostatischer Druck – Wirbelviskosität – Gemischte Euler-Lagrange'sche Betrachtungsweise
<i>Shallow Water Equations (Eulerian Method)</i> SWE-EM	Flachwassergleichung (Euler'sche Methode)	<ul style="list-style-type: none"> – konstante Dichte – $w = 0$ – hydrostatischer Druck – Wirbelviskosität – Euler'sche Betrachtungsweise
<i>Shallow Water Equations (Local Inertial Approximation)</i> SWE-LIA	Flachwassergleichung (Lokale Trägheitsapproximation)	<ul style="list-style-type: none"> – konstante Dichte – $w = 0$ – hydrostatischer Druck – Wirbelviskosität – Vernachlässigung von konvektiver Beschleunigung und Impulstransport

<i>Diffusion Wave Equations</i>	Diffusionswellengleichung	<ul style="list-style-type: none"> – konstante Dichte – $w = 0$ – hydrostatischer Druck – Druckterm und Sohlreibung sind dominierende Kräfte
---------------------------------	---------------------------	---

Für das Beispielmmodell wird zunächst eine vereinfachte Simulation mit nur zwei niedrigen Zuflüssen an der Steinach und am Haugenbach erstellt. Für diese Simulation werden die von HEC-RAS vorgeschlagenen Standardeinstellungen zur Berechnung verwendet, einschließlich der Diffusionswellengleichung (s. Abbildung 10-4, Spalte „Default“). Zudem wird ein deutlich größerer Zeitschritt von 3 Sekunden gewählt. Diese Testsimulation dient lediglich der Kontrolle des Modells sowie dem frühzeitigen Erkennen grober Fehler. Für die anderen Simulationen werden die Parameter aus Abbildung 10-4, Spalte „Perimeter“ gewählt. Nur für die erste Simulation „HQ5“ wird eine Anlaufzeit (*7. Initial Condition Time*) von 3 Stunden mit einer *Ramp Up Fraction* von 0,8 gewählt. Der Vergleich zweier Simulationen durchgeführt mit der Diffusionswellengleichung sowie den Flachwassergleichungen liefert abweichende Ergebnisse. Daher werden für alle Simulationen die Flachwassergleichungen mit gemischter Euler-Lagrange’schen Betrachtungsweise (*SWE-ELM*) gewählt. Es wird das konservative Turbulenzmodell mit den in Abbildung 10-4 in der Spalte „Perimeter“ dargestellten Koeffizienten aktiviert. Die Wahl der Koeffizienten wird beruhend auf den Empfehlungen für mäßig bis stark mäandrierende Gewässer im „HEC-RAS 2D User's Manual“ getroffen (HEC, 2022e, p. 181). Zudem wird der Coriolis-Effekt aktiviert. Das Untersuchungsgebiet liegt auf dem 48. Breitengrad, was ebenfalls angegeben wird. Die übrigen Parameter werden bei ihren Standardeinstellungen belassen. Mit diesen Berechnungseinstellungen wird zunächst testweise gerechnet und das Berechnungsnetz optimiert, um ein stabil laufendes Modell zu erlangen. Erst dann werden die Hochwasserszenarien simuliert.

10.3 Ausgabeoptionen

Weiterhin gibt es einige nützliche Ausgabeoptionen, die im *Unsteady Flow Analysis* Fenster (s. Abbildung 10-2) über den Reiter *Options – Output Options* eingestellt werden können.

10.3.1 Ausgabeprotokoll

Besonders sinnvoll ist es, im Reiter *Detailed Log Output* die Ausgabe eines detaillierten Protokolls (englisch: *Log*) zu aktivieren. Speziell bei den ersten Simulationsläufen kann dieses Protokoll im Falle eines Abbruchs Aufschluss über die Ursache geben. Die Ausgabe wird über die Option *Write detailed log output for debugging* (s. Abbildung 10-6) aktiviert. Wird kein spezifisches Zeitfenster angegeben, wird das Protokoll für die gesamte Simulationszeit ausgegeben. Eingesehen werden kann das Protokoll nach einer Simulation im *Unsteady Flow Analysis* Fenster (s. Abbildung 10-2) über den Reiter *Options – View Computation Log File*. (HEC, 2022d)

Zudem können im *Unsteady Flow Analysis* Fenster (s. Abbildung 10-2) über den Reiter *Options – View Runtime Messages* jederzeit nach einer Simulation die Benachrichtigungen, die während der Berechnungen eingeblendet werden, erneut angezeigt werden. Dies ist hilfreich, da dort beispielsweise

Zellen gelistet werden, für die die maximale Iterationszahl erreicht wird. Diese können im Nachgang im Berechnungsnetz gesucht und gegebenenfalls optimiert werden.

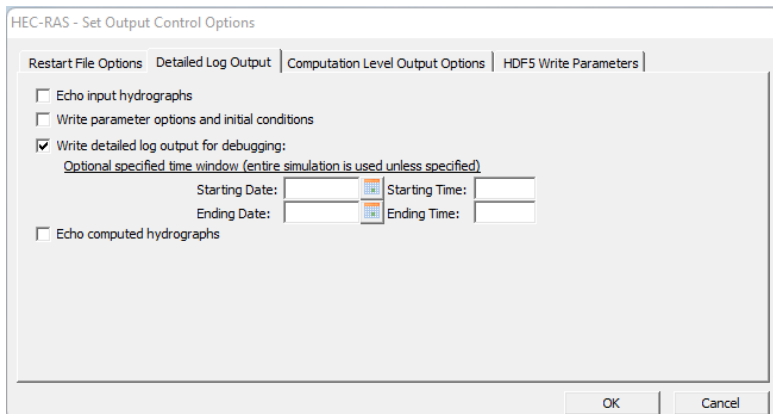


Abbildung 10-6: Aktivierung eines Ausgabeprotokolls

10.3.2 *Restart File* erstellen

Soll ein *Restart File* aus einer Simulation erstellt werden, welches anschließend für eine andere Simulation als Anfangsbedingung verwendet werden kann (s. Abschnitt 9.3.2), muss dies vor Beginn der auszugebenden Simulation festgelegt werden. Dies geschieht im Reiter *Restart File Options* des *Output Options* Fensters (s. Abbildung 10-7). Hier können die Wasserstände je Zelle, die als Anfangsbedingung gelten sollen, entweder zu einem beliebigen Zeitschritt während der Simulation (*Write Initial Condition file(s) during simulation*) oder am Ende der Simulation (*Write Initial Condition file at the end of the simulation*) exportiert werden. Für die erste Option besteht die Möglichkeit, zwei *Restart Files* zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten zu generieren. Der Dateiname der *Restart* Datei beinhaltet den Namen des Projektes, die *Plan* Nummer sowie den Zeitschritt (*Projekt.p##.Zeitschritt.rst*). (HEC, 2022d)

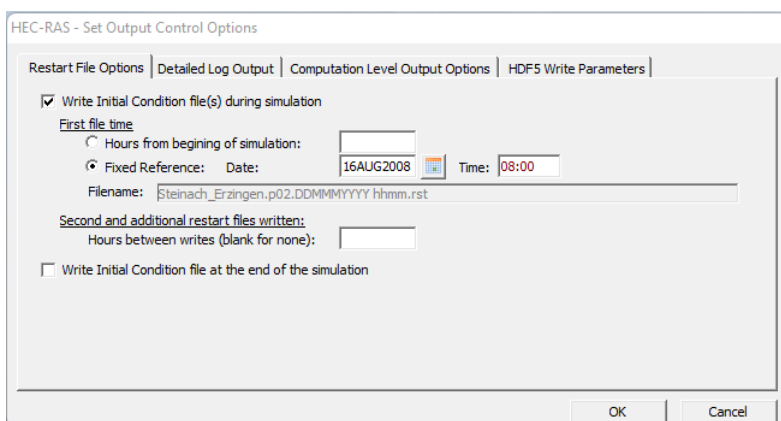


Abbildung 10-7: Generieren eines *Restart Files*

Das Ausgabeprotokoll wird für alle Simulationen des Beispielprojektes aktiviert, um mögliche Fehlerursachen finden zu können. Es wird jeweils ein Protokoll für die gesamte Simulationszeit erstellt. Für alle Simulationen bis auf die letzte („HQextrem“) wird am Ende der Simulationszeit ein *Restart File* erzeugt.

11 Simulation von Feststofftransport im 2D-Modell

Für die zusätzliche Simulation von Feststofftransport während einer 2D-Strömungssimulation mit HEC-RAS sind einige Änderungen und weitere Angaben notwendig. Diese werden im folgenden Kapitel erläutert.

11.1 Zugrundeliegendes Dateimanagement einer Sedimentsimulation

Das zugrundeliegende Dateimanagement für eine 2D-Sedimentsimulation (s. Abbildung 11-1) ist dem für eine alleinige 2D-Strömungssimulation (s. Abbildung 2-1) sehr ähnlich. Verwendet der Nutzer eine kombinierte 1D-2D-Simulation, steht zusätzlich die Option einer *Sediment Plan* Datei mit einer *Quasi-Unsteady Flow* Datei zur Verfügung. Hier wird jedoch nur die Option für eine 2D-Simulation erläutert.

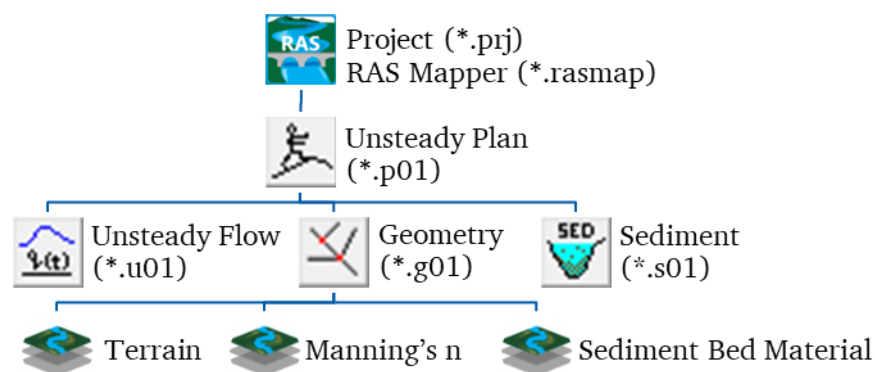


Abbildung 11-1: Dateimanagement einer 2D-Sedimentsimulation in HEC-RAS (HEC, o. J.)

Ausgehend von einem HEC-RAS Projekt (s. Abbildung 11-1, 1. Ebene) benötigt der Nutzer eine *Unsteady Plan* Datei (s. Kapitel 10) wie bei einer normalen 2D-Strömungssimulation (2. Ebene). Soll zusätzlich der Feststofftransport modelliert werden, muss bei der *Unsteady Plan* Datei *Sediment* aktiviert sein (s. Abschnitt 11.4). Die *Plan* Datei ist wiederum in der 3. Ebene, analog zur alleinigen Strömungssimulation, mit einer *Unsteady Flow* Datei (s. Abschnitt 9.2) und einer *Geometry* Datei verknüpft. Zusätzlich ist in Ebene drei eine *Sediment* Datei notwendig, die die Kornverteilung des Sediments festlegt und die Transportberechnungsmethode vorgibt. In Ebene vier sind die Layer zu finden, mit denen die *Geometry* Datei assoziiert ist. Für eine 2D-Feststofftransportsimulation ist mindestens ein *Terrain* Layer mit dem Geländemodell und ein *Sediment Bed Material* Layer (Sediment Material an der Sohle) für die räumlich Zuordnung unterschiedlicher Sedimente notwendig. Es können jedoch auch weitere Layer wie etwa Manning's-n oder Infiltration verknüpft werden. (HEC, o. J.), (Hydrologic Engineering Center, 2021)

11.2 Sedimentmaterial Layer im *RAS-Mapper*

Der erste Schritt der Modellierung von Sediment ist das Erstellen eines *Sediment Bed Material* Layers im *RAS-Mapper*. Hier werden zunächst Gebiete definiert, die unterschiedliche Sedimente aufweisen oder nicht erodierbar sind. Diese Gebiete werden nur benannt, ohne ihnen Eigenschaften zuzuordnen. Dies

geschieht in einem späteren Schritt in der *Sediment* Datei (s. Abschnitt 11.3). (Hydrologic Engineering Center, 2021)

Die Erstellung des *Sediment Bed Material Layers* geschieht im Bereich *Map Layers* analog zur Erstellung von beispielsweise einem Landnutzungslayer (s. Abschnitt 5.2). Über Rechtsklick auf *Map Layers* und Auswahl von *Create a New RAS Layer – Sediment Bed Material Layer* können *.shp-Dateien oder Rasterdateien importiert werden, um den gewünschten Layer zu erstellen. Über Auswahl von *Create Empty* im selben Fenster können Polygone selbst gezeichnet werden. Bei der ersten Option werden die verschiedenen Gebiete direkt beim Import einer Sedimentbenennung zugeordnet (s. Abschnitt 5.2). Bei der zweiten Option öffnet sich nach Beenden des Zeichnens eines Polygons das in Abbildung 11-2 dargestellte Fenster. Alternativ kann das Fenster auch über Rechtsklick auf das Polygon und Auswahl von *Edit Classification Value* geöffnet werden. Dort kann das Polygon entweder im Dropdown Menü einem vorhandenen Sediment zugeordnet werden oder ein neues Sediment für das Polygon erstellt werden, indem der Nutzer den neuen Namen in das Feld des Dropdown Menüs eingibt. (HEC, 2020a)

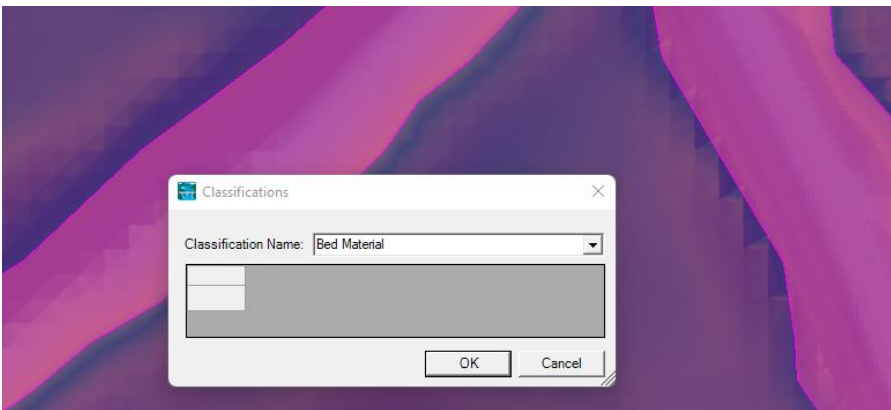


Abbildung 11-2: Zuordnung von Polygonen zur Klassifikationen eines Sediments

Es ist zudem möglich, dass sich Polygone überlagern. In diesem Fall gilt die Sedimentklassifikation des oben liegenden Polygons. Ein Polygon kann per Rechtsklick und Auswahl von *Send* in seiner Priorität geändert werden. Welches Polygon priorisiert wird, wird mit dem über der Karte schwebenden Mauszeiger angezeigt, wenn der Layer des *Sediment Bed Material* ausgewählt ist.

Zuletzt muss der *Sediment Bed Material Layer* mit der Geometrie Datei verknüpft werden, die für die Feststofftransportsimulation verwendet werden soll (analog zu Abschnitt 7.1). Hierfür wird über Rechtsklick auf *Geometries – Manage Geometry Associations* ausgewählt. Im Dropdown Menü der letzten Spalte *Sediment Bed Material Layer* der gewünschten Geometrie wird der neu erstellte Layer ausgewählt (s. Abbildung 11-3).

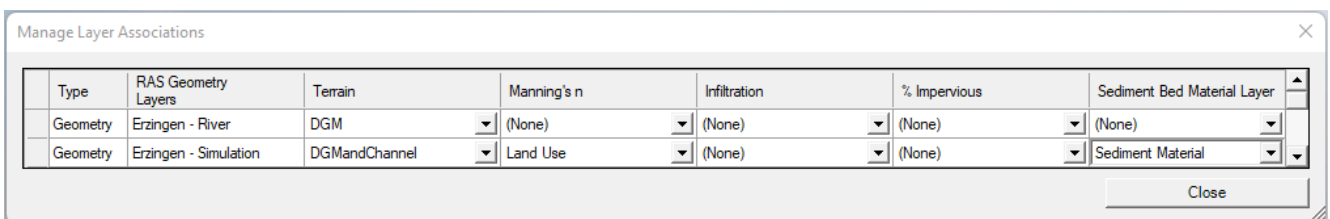


Abbildung 11-3: Verknüpfung von Geometrie mit *Sediment Bed Material* Layer

Im Beispielprojekt liegen keine Daten für Sedimente vor, weshalb die Sedimentsimulation nur zu Demonstrationszwecken erstellt wird. Daher wird die Option *Create a New RAS Layer – Sediment Bed Material Layer – Create Empty* ausgewählt und der neue Layer „Sediment Material“ genannt. Es wird ein Polygon gezeichnet, welches das gesamte Untersuchungsgebiet einschließt, und „Nicht erodierbar“ genannt. Zudem wird das Polygon importiert, welches bereits zur Klassifizierung des Gewässerlaufs im Landnutzungslayer verwendet wurde, und „Bed Material“ genannt. Letzteres wird priorisiert. Zuletzt wird der Layer „Sediment Material“ mit der Geometrie „Erzingen – Simulation“ assoziiert.

11.3 Sediment Datei

Zur Erstellung einer Sediment Datei wird die in Abbildung 11-4 dargestellte Schaltfläche ausgewählt. Es öffnet sich das in Abbildung 11-5 abgebildete Bearbeitungsfenster, wo über den Reiter *File – New Sediment Data* eine neue Sediment Datei erstellt wird. In dieser Datei werden die im Gebiet vorkommenden Sedimente definiert und Berechnungsmöglichkeiten für den Feststofftransport ausgewählt. (HEC, 2020a), (Hydrologic Engineering Center, 2021)

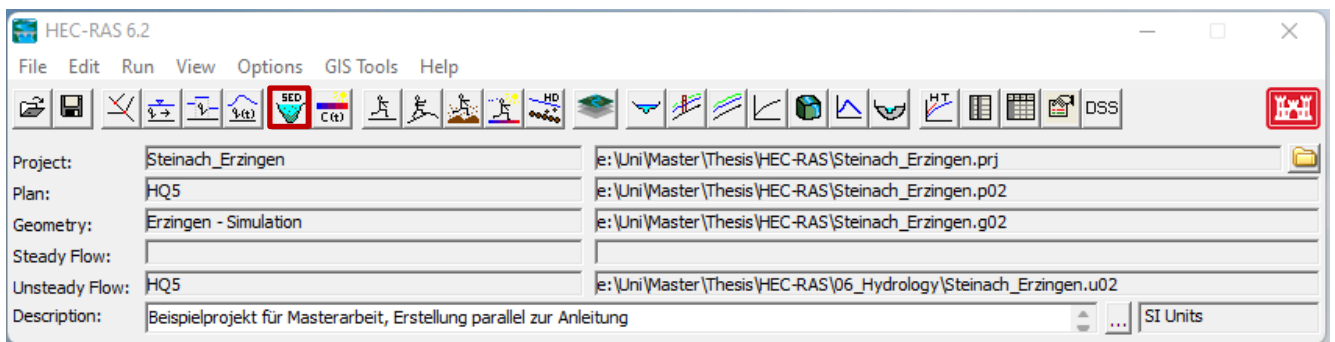


Abbildung 11-4: *Sediment Data* Schaltfläche im Hauptfenster von HEC-RAS

11.3.1 Kornverteilungskurven

Im ersten Reiter des Sediment Bearbeitungsfensters *Initial Conditions and Transport Parameters* werden über die Schaltfläche *Define/Edit Bed Gradation*, welche in Abbildung 11-5 markiert ist, die Kornverteilungskurven angegeben, die im Untersuchungsgebiet vorkommen. Über die zweite markierte Schaltfläche *Define Layers* kann optional eine Schichtung verschiedener Sedimente angegeben werden. (HEC, 2020a), (Hydrologic Engineering Center, 2021)

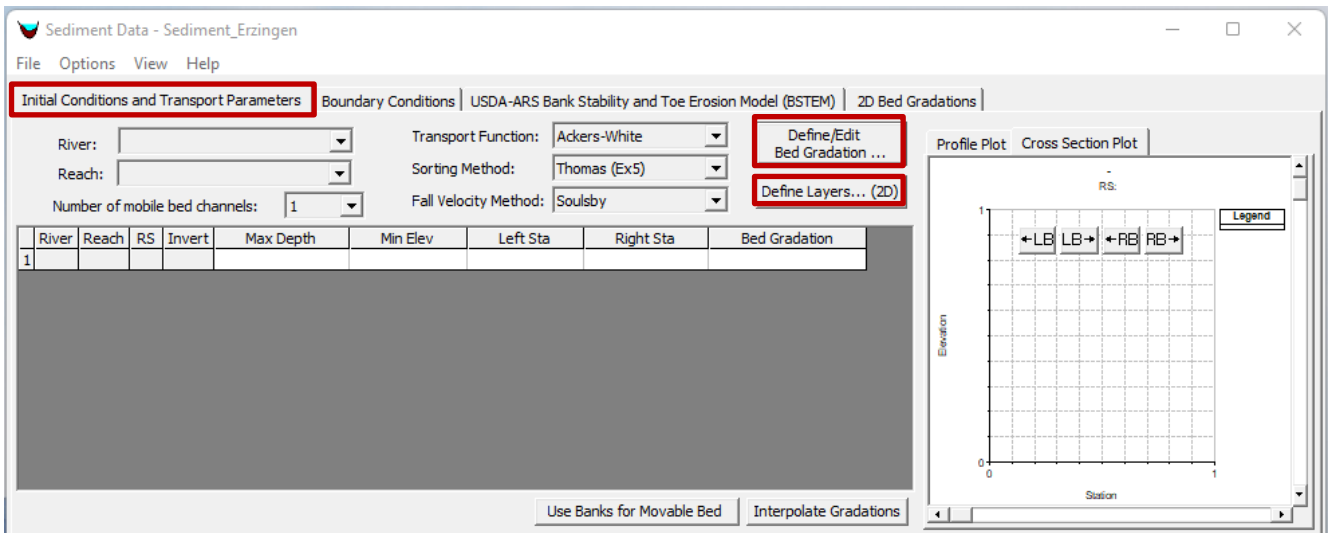


Abbildung 11-5: Sediment Bearbeitungsfenster: Erstellen von Kornverteilungskurven und Sedimentschichten

Über die Schaltfläche *Define/Edit Bed Gradation* öffnet sich das Fenster in Abbildung 11-6 links. Zum Hinterlegen einer Körnungslinie muss über die markierte Schaltfläche zunächst eine neue Körnung erstellt und benannt werden. Anschließend können in der Tabelle auf der linken Seite die Massenanteile je Korngröße bzw. je Maschenweite des Siebs eingegeben werden. Im rechten Bereich des Fensters wird automatisch eine Körnungslinie erzeugt. (HEC, 2020a), (Hydrologic Engineering Center, 2021)

Weiterhin können für bindige bzw. kohäsive Böden (Feinanteil > 40 %) durch Aktivieren der Option *Set Sample Specific Cohesive Parameters* weitere Parameter angegeben werden, die für diese Böden kennzeichnend sind (DIN EN ISO 14688-1, 2017). Die in Abschnitt 11.3.2 „Kohäsive Sedimente“ aufgelisteten und erläuterten Parameter können hier angegeben werden. (HEC, o. J., p. 307).

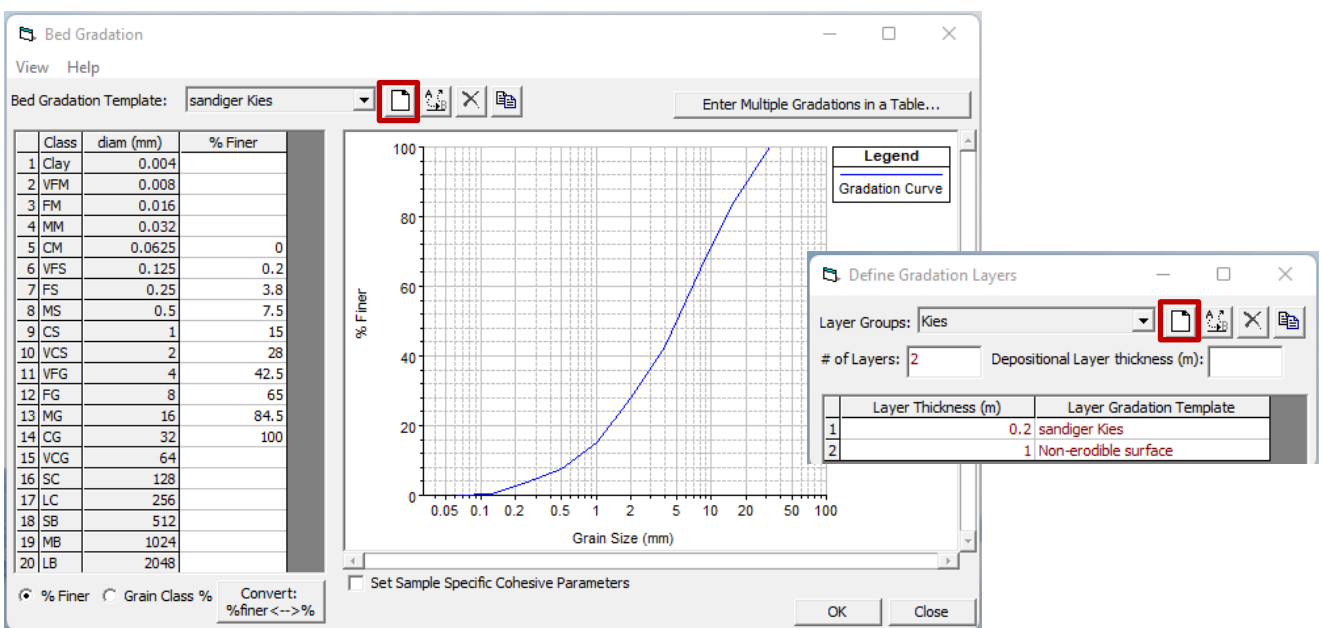


Abbildung 11-6: Erstellen einer Kornverteilungskurve (links) und einer Sedimentschichtung (rechts)

Über die Schaltfläche *Define Layers* (s. Abbildung 11-5) öffnet sich das Fenster in Abbildung 11-6 rechts. Dort können Schichtungen mit Schichtdicken der zuvor definierten Körnungen angegeben werden. Diese Angabe ist optional. Als erster Schritt muss auch hier zunächst eine neue Schichtung über die markierte Schaltfläche erstellt und benannt werden (s. Abbildung 11-6 rechts). Anschließend muss die Anzahl der Schichten hinter *# of Layers* angegeben werden, bevor die erstellten Körnungen mit ihrer Schichtdicke in der Tabelle darunter ausgewählt werden können. Das Eingabefenster *Depositional Layer thickness* wird nur für die 1D-Berechnung verwendet. (HEC, 2020a)

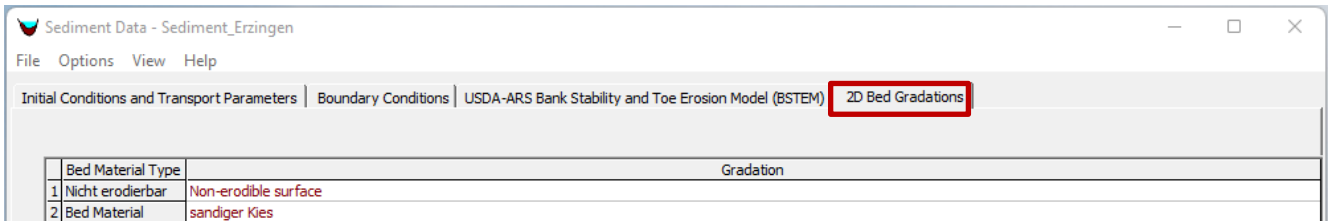


Abbildung 11-7: Sediment Bearbeitungsfenster: Verknüpfen von Körnungslinie mit Sedimentmaterial Layer

Zuletzt müssen die Kornverteilungskurven mit den Polygonen des Sedimentlayers aus Abschnitt 11.2 verknüpft werden. Dies geschieht über den Reiter *2D Bed Gradations* im Sediment Bearbeitungsfenster (s. Abbildung 11-7). Wurde der *Sediment Bed Material* Layer zuvor mit einer Geometrie assoziiert, werden die Bereiche unterschiedlicher Sedimente hier nun in der Spalte *Bed Material Type* aufgelistet. Aus den Dropdown Listen in der Spalte *Gradation* können die erstellten Körnungen sowie Sedimentschichtungen gewählt werden, um diese mit den Sedimentpolygonen zu verknüpfen. Soll eine Fläche nicht erodierbar sein, wird die Option *Non-erodible surface* gewählt, welche automatisch zur Verfügung steht. (HEC, 2020a)

Im Beispielprojekt wird die Sediment Datei „Sediment_Erzingen“ genannt. Da keine Daten zum Sohl sediment vorliegen, wird sich am Typensteckbrief der Steinach nach der Wasserrahmenrichtlinie orientiert. Die Steinach ist dem Gewässertyp Typ 9.1: „Karbonatische, fein- bis grobmaterialreiche Mittelgebirgsflüsse“ (LUBW, 2022) zugeordnet. Dieser Gewässertyp ist durch ein grobes Sohl sediment aus Schotter, Steinen oder Kies gekennzeichnet, in dem auch Sand vorkommen kann (Pottgiesser, 2018). Diese Beschreibung wird durch eine Körnungslinie für sandigen Kies abgeschätzt (DIN 18123). Die Massenanteile und die Kornverteilungskurve sind in Abbildung 11-6 links zu sehen. Da nur eine Kurve erstellt wird, wird keine Schichtung angegeben. Die Kornverteilungskurve „sandiger Kies“ wird anschließend dem Polygon „Bed Material“ zugeordnet (s. Abbildung 11-7). Für das Polygon „Nicht erodierbar“ wird *Non-erodible surface* ausgewählt.

11.3.2 Gleichungen

Transportgleichungen

Für die Berechnung des Sedimenttransports stehen elf verschiedene empirische Formeln zur Verfügung. Aufgrund ihres empirischen Ursprungs sind nicht alle Formeln für alle Modelle oder Sedimente gut geeignet. Der Transport hängt jedoch stark von der verwendeten Gleichung ab, weshalb diese sinnvoll gewählt werden sollte (HEC, 2020a). Es können alle der elf Transportgleichungen ausgewählt werden, jedoch stehen drei davon explizit für die 2D-Berechnung zur Verfügung: Soulsby-van Rijn, van Rijn und Wu et al. (Hydrologic Engineering Center, 2021). Die übrigen acht Gleichungen sind ursprünglich für die eindimensionale Berechnung vorgesehen (HEC, o. J.). Da in dieser Arbeit ausschließlich auf die

2D-Berechnung eingegangen wird, wird der Fokus lediglich auf diese drei Gleichungen gelegt. Alle drei Ansätze für die 2D-Berechnung betrachten den Geschiebetransport (englisch: *Bed load transport*) und den Schwebstofftransport (englisch: *Suspended load transport*) getrennt voneinander und berechnen den gesamten Feststofftransport letztlich als Summe der beiden (van der Scheer, et al., 2002). Für alle Formeln wurden Labor- wie auch Felddaten zum Feststofftransport mit unterschiedlichen Korngrößen als empirische Grundlage verwendet (s. Tabelle 11-1). In Tabelle 11-1 sind die verschiedenen Eignungsbereiche der Formeln zu finden, auf deren Basis die Auswahl für ein Modell geschehen sollte.

Tabelle 11-1: Besonderheiten und Eignungsbereiche der 2D-Feststofftransportformeln

Transportformel	d [mm] (Geschiebe)	d [mm] (Schwebstoffe)	Bewegungsbeginn (HEC, 2020a)	Besonderheit
Wu et al. (2000)	0,062 bis 128	0,01 bis 2,366	$\theta_{cr} = 0,03$ Kritischer Shields-Wert, abhängig von Körnungslinie und Schubspannung	Verwendung eines <i>Hiding and Exposure</i> Faktors (s. unten), der stochastisch von der Korngrößenverteilung des Sediments abhängt (Wu, et al., 2000). Daher besonders gut für ungleichförmige Sedimente geeignet (van der Scheer, et al., 2002).
van Rijn (2007)	0,2 bis 1,75	0,075 bis 0,8	Kritische Fließgeschwindigkeit abhängig von Körnungslinie und Wassertiefe	Berücksichtigung der Korngrößen von Schluff bis Kies (van Rijn, 2007a), jedoch insbesondere der Einfluss der feinen Korngrößen in Küstenregionen (van Rijn, 2007b). HEC-RAS verwendet einen <i>Hiding and Exposure</i> Korrektur-Faktor (HEC, 2020b).
Soulsby-van Rijn (1997)	0,063 bis 63 (Sand bis Kies)	0,063 bis 2 (Sand)	Kritische Fließgeschwindigkeit abhängig von Körnungslinie und Wassertiefe	Basiert auf der Gleichung von van Rijn. Vorgesehen für die Berechnung der Bewegung von Sand im Meer (Soulsby, 1997). Besonders gut geeignet bei Einfluss durch Wellen. HEC-RAS verwendet den <i>Hiding and Exposure</i> Faktor nach Wu et al (HEC, 2020b).

Da alle der drei aufgeführten Funktionen für ungleichförmige Sedimentmischungen verwendet werden können, ist die Berücksichtigung des in Tabelle 11-1 bereits erwähnten *Hiding and Exposure* Faktors besonders wichtig. Dieser je nach Formel unterschiedlich ermittelte empirische Faktor, berücksichtigt den Effekt, bei dem größere Körner der Sohlschubspannung mehr ausgesetzt sind als kleinere Körner (s. Abbildung 11-8).

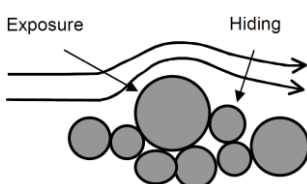


Abbildung 11-8: Darstellung des *Hiding and Exposure* Effektes (van der Scheer, et al., 2002)

Ebenfalls in Tabelle 11-1 erwähnt wird der Shields-Wert θ [-] (s. Gleichung (11-1)). Dies ist ein dimensionsloser Parameter, der die Schubspannung τ [N/m²] mit dem repräsentativen Korndurchmesser d_m [m] in Relation setzt und häufig auch als sedimentologische Froude-Zahl bezeichnet wird. Hierbei ist ρ [kg/m³] die Dichte von Wasser und ρ' [-] die relative Dichte, die sich nach Gleichung (11-2) ergibt. (Zanke, 2013), (Patt, 2018)

$$\theta = F\tau^* = \frac{\tau}{\rho' \cdot g \cdot d_m \cdot \rho} = \frac{\tau}{(\rho_{Sediment} - \rho) \cdot g \cdot d_m} \quad (11-1)$$

$$\rho' = \frac{\rho_{Sediment} - \rho}{\rho} \quad (11-2)$$

Für den Shields-Wert kann in Abhängigkeit des dimensionslosen, sedimentologischen Durchmessers d^* [-] (s. Gleichung (11-3)) ein Zusammenhang bezüglich des Bewegungsbeginns von Sediment aufgestellt werden. Hierbei ist ν [m²/s] die kinematische Viskosität von Wasser. (Zanke, 2013), (Patt, 2018)

$$d^* = \left(\frac{\rho' \cdot g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (11-3)$$

Dieser funktionale Zusammenhang $\theta_{cr} = f(d^*)$ für den Bewegungsbeginn wird je nach verwendeter Transportgleichung bzw. je nach empirischer Datengrundlage unterschiedlich angegeben. Drei Beispiele hierfür sind in Abbildung 11-9 dargestellt. Für einige der Gleichungen wird ein konstanter, kritischer Shields-Wert als Bewegungsbeginn festgelegt, wie beispielsweise bei der Gleichung nach Wu et al. Dieser ist exemplarisch als schwarze Linie in Abbildung 11-9 eingezeichnet. (HEC, 2020b), (Zanke, 2013), (van der Scheer, et al., 2002)

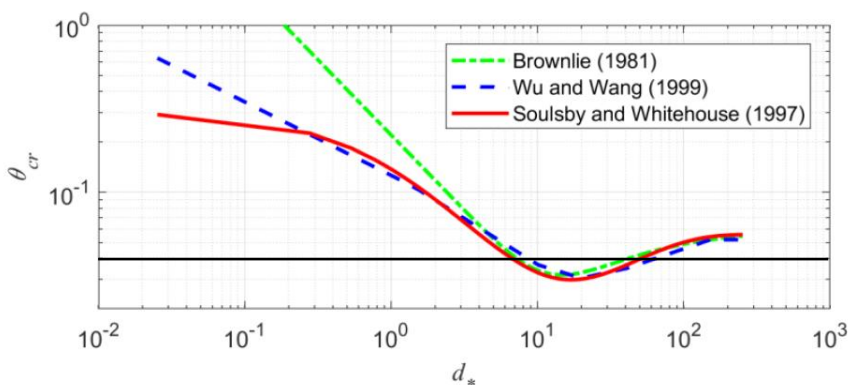


Abbildung 11-9: Beispiele für den funktionalen Zusammenhang des kritischen Shields-Wertes

Die Auswahl einer Transportformel geschieht im Dropdown Menü hinter *Transport Function* im Sediment Bearbeitungsfenster (s. Abbildung 11-10). Es ist jedoch anzumerken, dass aufgrund der empirischen Grundlage keine der Transportfunktionen eine exakte Aussage über die Sedimentbewegung garantiert. Es ist daher wichtig, zunächst mithilfe von Messdaten die besten Berechnungseinstellungen für jedes individuelle Modell zu kalibrieren. Weiterhin wird die Berechnung des Sedimenttransportes für kleine Shields-Werte von $\theta < 0,1$ mit allen Formeln ungenau (van der Scheer, et al., 2002). Es kann also

vorkommen, dass insbesondere bei niedrigen Schubspannungen und großen Korngrößen eine quantitativ realistische Berechnung des Feststofftransportes nicht möglich ist.

Sortierungsmethode

In Abbildung 11-10 kann im Dropdown Menü hinter *Sorting Method* zudem eine Sortierungsmethode gewählt, werden. Jedoch wird für eine 2D-Simulation immer die Option *Active Layer* verwendet. Damit ist die oberste, bewegliche Schicht des Sohlmaterial gemeint, die die Materialzusammensetzung bestimmt, direkt mit der Strömung interagiert und innerhalb derer sich Transportkörper bilden (van der Scheer, et al., 2002).

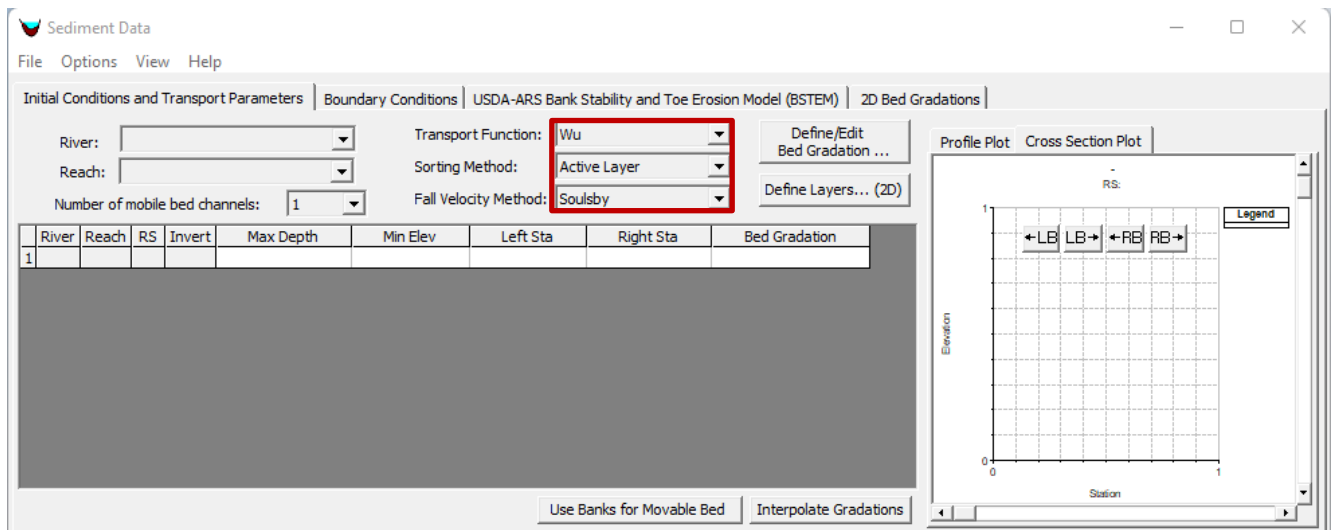


Abbildung 11-10: Sediment Bearbeitungsfenster: Erstellen von Transportfunktion, Sortierungsmethode und Methode zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit

Die Dicke dieser Schicht kann über den Reiter *Options – Bed Mixing Options* (s. Abbildung 11-11) im Bereich *Active Layer Options* eingestellt werden. Bei der Einstellung *d90* entspricht die Schichtdicke der Korngröße bei 90 Massenprozent der Körnungslinie. Bei *X d90* kann diese Dicke über einen Faktor *X* (englisch: *Multiplier*) verändert werden. Zudem kann eine minimale Schichtdicke im Feld hinter *Min Thickness* angegeben werden. (HEC, 2020a).

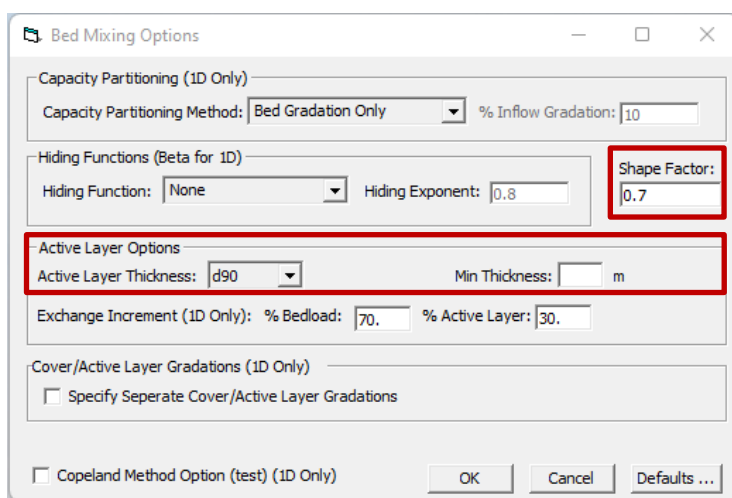


Abbildung 11-11: Einstellungsoptionen für die Sortierungsmethode sowie den Formfaktor

Sinkgeschwindigkeit

Im letzten Dropdown Menü in Abbildung 11-10, welches für die 2D-Sediment Modellierung benötigt wird, kann eine Methode zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit (englisch: *Fall Velocity*) von Partikeln ausgewählt werden (s. Abbildung 11-10, *Fall Velocity Method*). Es werden die in Tabelle 11-2 aufgeführten Formeln angeboten. Die Formeln haben verschiedene Ansätze und Eigenschaften, da die Sinkgeschwindigkeit iterativ bestimmt werden muss. Grund hierfür ist ihre Abhängigkeit von einem Widerstandsbeiwert, der wiederum von der Sinkgeschwindigkeit selbst abhängt (HEC, o. J.). Alternativ kann der Widerstandsbeiwert auch geschätzt werden. So ergeben sich verschiedene Ansätze.

Tabelle 11-2: Zur Verfügung stehende Methoden zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit von Partikeln und ihre Eigenschaften (HEC, 2020b), (HEC, o. J.)

Formel nach	Eigenschaften
Rubey	<ul style="list-style-type: none">– analytische Formel basierend auf dem Gesetz von Stokes– nur für Partikel < 1 mm bei einer Wassertemperatur von 10 bis 25 °C– Schätzung der Reynolds-Zahl zur Lösung der Gleichung
Toffaletti	<ul style="list-style-type: none">– Tabelle mit aus Versuchen ermittelten Sinkgeschwindigkeiten für verschiedene Wassertemperaturen und Korngrößen– fester Formfaktor von 0,9 und feste Wichte von $\gamma = \rho \cdot g = 2,65 \frac{kq}{m^2 \cdot s^2}$
van Rijn	<ul style="list-style-type: none">– drei empirische Formeln für Partikel verschiedener Größen beginnend ab 0,065 mm– verwendet die Gleichung nach Rubey als Anfangsannahme
Report 12	<ul style="list-style-type: none">– verwendet die Gleichungen nach van Rijn– berechnet die Sinkgeschwindigkeit iterativ– berücksichtigt Form der Partikel anhand des Form Faktors nach Corey
Dietrich	<ul style="list-style-type: none">– empirische Formel für nicht kohäsive Partikel– berücksichtigt Rundheit der Partikel anhand der Skala nach Powers– berücksichtigt Form der Partikel anhand des Form Faktors nach Corey
Soulsby	<ul style="list-style-type: none">– empirische Formel für nicht kohäsive Partikel– berücksichtigt Größe und Dichte der Partikel, die Viskosität von Wasser sowie die Sedimentkonzentration
Wu und Wang	<ul style="list-style-type: none">– berücksichtigt Form der Partikel anhand des Form Faktors nach Corey– kalibriert für Form Faktoren zwischen 0,3 und 1,0

Der in Tabelle 11-2 erwähnte Formfaktor S_F [-] nach Corey kann über den Reiter *Options – Bed Mixing Options* (s. Abbildung 11-11) im Bereich *Shape Factor* angegeben werden. Dieser berechnet sich nach Gleichung (11-4) und liegt für Sand bis Kiessedimente in etwa bei 0,7 (Williams, R. M. E. et al., 2013), (Zanke, 2013). Hierbei sind a, b und c [mm] die Achsenlängen eines Partikels in abnehmender Größe.

$$S_F = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (11-4)$$

Kohäsive Sedimente

Die bisher aufgeführten Gleichungen gelten überwiegend für den Feststofftransport von nicht kohäsiven Sedimenten. Da sich Schluff (englisch: *Silt*) und Ton (englisch: *Clay*) jedoch aufgrund kohäsiver Kräfte in Bezug auf Erosion und Sedimentation anders verhalten, gibt es hierfür separate

Berechnungsmöglichkeiten. Diese sind im Reiter *Options – Set Cohesive Options* zu finden (s. Abbildung 11-12). In der 2D-Sedimentsimulation stehen zwei von drei der 1D-Optionen zur Verfügung (HEC, 2020a):

- *Use Selected Transport Function for All Grain Sizes*: Bei dieser Option werden alle Kornfraktionen mit derselben Formel modelliert (s. Abschnitt 11.3.2 „Transportgleichungen“). Flockenbildung ist bei Korngrößen $< 0,0625$ mm möglich. HEC empfiehlt jedoch, diese Option nicht zu nutzen, wenn feinkörnige Fraktionen in der Kornverteilungskurve vertreten sind. Sollten diese nur gering sein, wird empfohlen, diese aus der Körnungslinie zu entfernen. (HEC, 2020a)
- *Use Krone/Partheniades for Clay and Silt Size Fractions*: Bei dieser Option werden die Schluff und Silt Fraktionen, also Korngrößen $< 0,0625$ mm, anders modelliert als die grobkörnigen Fraktionen. Flockenbildung ist ebenfalls bei Korngrößen $< 0,0625$ mm möglich. Für den Transport der feinen Fraktionen werden verschiedene Parameter benötigt (HEC, o. J., p. 307):
 - τ_c : Sohlschubspannung ab der Partikelerosion stattfindet (*Threshold – Particle Erosion* [Pa])
 - τ_{mw} : Sohlschubspannung ab der Massenerosion stattfindet (*Threshold – Mass Wasting Erosion* [Pa])
 - M oder K_d : Erosionsrate zwischen τ_c und τ_{mw} in der Phase der Partikel Erosion (*Slope of the Erosion Rate Curve – Particle Erosion* [N/(m²·hr)] oder [N/(m²·hr)/Pa])
 - M_{mw} oder $K_{d_{mw}}$: Erosionsrate ab τ_{mw} in der Phase der Massenerosion (*Slope of the Erosion Rate Curve – Mass Wasting Erosion* [N/(m²·hr)] oder [N/(m²·hr)/Pa])

Eine grafische Darstellung der Erosions- und Transportparameter ist in Abbildung 11-12 zu sehen. (HEC, 2020a)

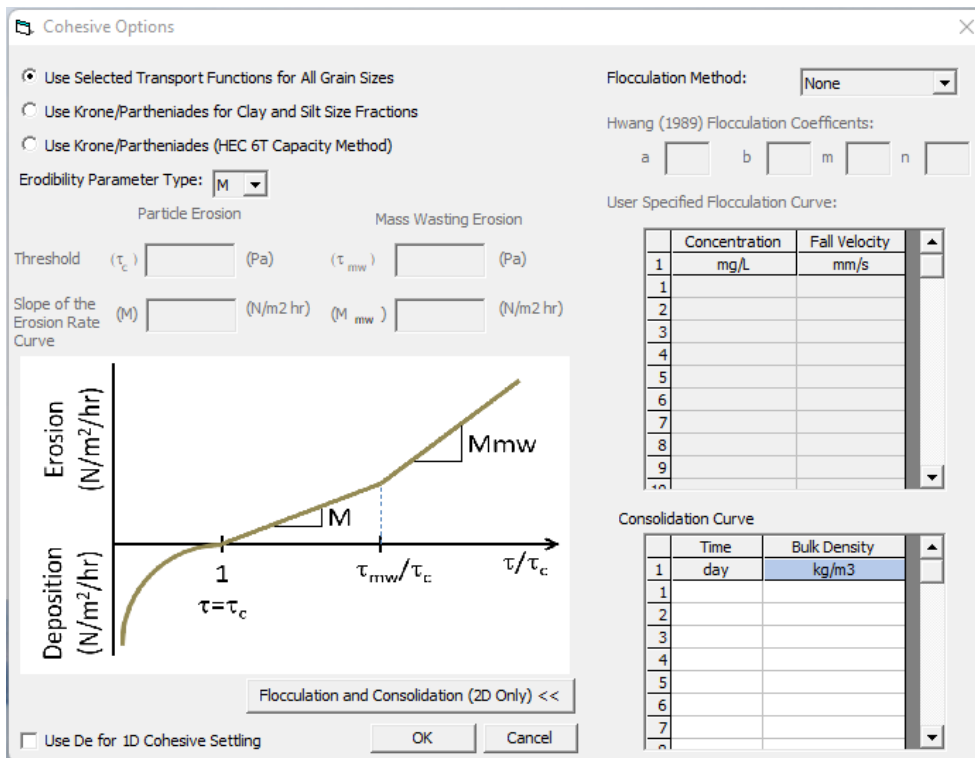


Abbildung 11-12: Einstellungen für kohäsive Sedimente

Weiterhin besteht die Möglichkeit, für kohäsive Partikel die Option der Flockenbildung (englisch: *Flocculation*) zu aktivieren (s. Abbildung 11-12 rechts oben). Diese Option wird über die Schaltfläche *Flocculation and Consolidation (2D Only)* eingeblendet (s. Abbildung 11-12 unten). Hierbei wird die Sinkgeschwindigkeit von Flocken anders als von Einzelpartikeln berechnet. Dafür stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung (HEC, 2020a):

- *Hwang (1989)*: Diese Berechnung teilt das Sinken von Partikeln in vier Phasen ein: Freies Absetzen, Flockenbildung, beeinträchtigtes Absetzen, vernachlässigbares Absetzen. Hierfür müssen vier empirische Parameter (a , b , m und n) angegeben werden, für die im „HEC-RAS Two-Dimensional Sediment Transport User's Manual“ Beispielwerte angegeben sind (HEC, 2020a, p. 43).
- *Conc-Fall Vel*: Bei dieser Berechnungsoption kann die Sinkgeschwindigkeit von Flocken als Funktion der Schwebstoffkonzentration angegeben werden. Ein Beispiel hierfür ist ebenfalls im „HEC-RAS Two-Dimensional Sediment Transport User's Manual“ zu finden (HEC, 2020a, p. 44).

Zuletzt kann im Fenster in Abbildung 11-12 rechts unten eine Verdichtungskurve für das Sohlmaterial als eine Funktion der Schüttdichte (englisch: *Bulk Density*) abhängig von der Zeit angegeben werden. Diese Option wird ebenfalls über die Schaltfläche *Flocculation and Consolidation (2D Only)* eingeblendet (s. Abbildung 11-12 unten). Ein Beispiel für eine solche Kurve ist ebenso im „HEC-RAS Two-Dimensional Sediment Transport User's Manual“ zu finden (HEC, 2020a, p. 44).

Transportmethode

Weitere Koeffizienten für die 2D-Transportmethode sind über *Options – Transport Methode* zu finden (s. Abbildung 11-13).

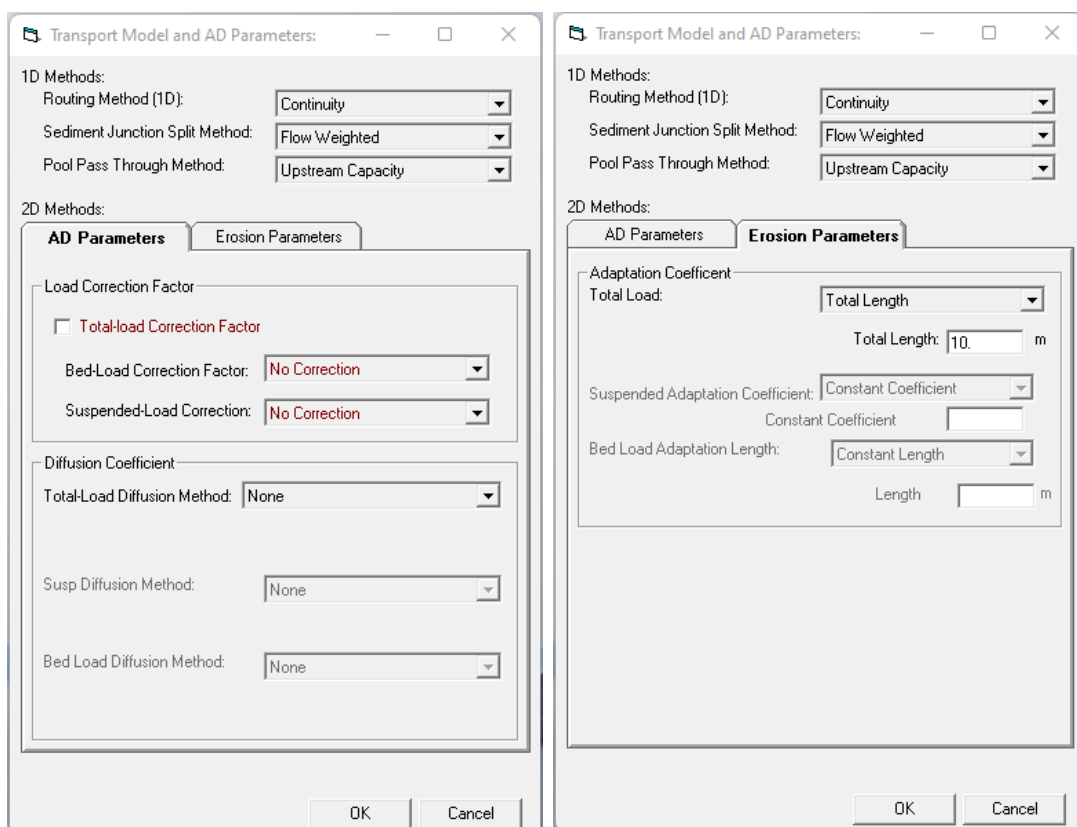


Abbildung 11-13: Korrekturfaktoren in der 2D-Feststofftransportmodellierung

Im ersten Reiter *AD Parameters* (s. Abbildung 11-13 links) können der *Load Correction Factor* und der *Diffusion Coefficient* aktiviert werden, diese sollten jedoch kalibriert werden (HEC, 2020a):

- *Load Correction Factor*: Dieser Frachtkorrekturfaktor korrigiert die Transportgeschwindigkeit von Sediment, die ohne diese Korrektur gleich der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit angenommen wird. Der Faktor stellt das Verhältnis von Transport- zu Fließgeschwindigkeit dar. Es wird hierbei eine ungleichmäßige Verteilung der Fließ- und Transportgeschwindigkeit innerhalb eines Fließquerschnitts abhängig von der Distanz zur Sohle berücksichtigt. Soll für die Geschiebe- (*Bed-Load*) oder Schwebstofffracht (*Suspended-Load*) diese Korrektur berechnet werden, muss der *Load Correction Factor* aktiviert werden. (HEC, 2020a)
 - *Bed-Load Correction Factor*: Für die Korrektur der Geschiebefrachtgeschwindigkeit werden drei verschiedene empirische Formeln angeboten (HEC, 2020b, pp. 27-28).
 - *Suspended-Load Correction Factor*: Für die Korrektur der Schwebstofffrachtgeschwindigkeit werden zwei Berechnungsmethoden angeboten, die beide ein logarithmisches Profil der Fließgeschwindigkeit annehmen. Für feine Sedimente ist der Schwebstofffrachtkorrekturfaktor jedoch nahe 1 und muss meist nicht aktiviert werden, während er für gröbere Sedimente zwischen 0,5 und 0,7 liegt. (HEC, 2020b, pp. 33-34)
- *Diffusion Coefficient*: Der Diffusionskoeffizient berücksichtigt die horizontale, diffusive Durchmischung durch Turbulenz. Es ist nur sinnvoll diesen bei einem feinen Berechnungsgitter und nicht bei der Verwendung der Diffusionswellengleichung zu aktivieren, da dort die numerische Diffusion so hoch ist, dass der Diffusionskoeffizient keine Genauigkeitssteigerung bringt. (HEC, 2020a)
 - *Total-Load Diffusion Method*: Soll der Diffusionskoeffizient für die Gesamtfracht berechnet werden, gibt es entweder die Möglichkeit hierfür einen konstanten Koeffizienten K [m^2/s] (*Constant*) anzugeben oder den Koeffizienten gewichtet nach dem Anteil der Schwebstoff- und Geschiebefracht zu berechnen (*Weighted Suspended and Bedload*). (HEC, 2020a)
 - *Suspended-Load Diffusion Method*: Dieses Feld wird nur bei der Auswahl *Weighted Suspended and Bedload* aktiviert. Bei Auswahl von *Dynamic* kann der Gewichtungsfaktor für die Schwebstofffracht angegeben werden. Bei Auswahl von *Eddy Visc/Schmidt* wird der Diffusionskoeffizient aus dem Verhältnis von Wirbelviskosität zu Schmidt-Zahl berechnet (HEC, 2020b, pp. 31, 34). (HEC, 2020a)
 - *Bed-Load Diffusion Method*: Dieses Feld wird nur bei der Auswahl *Weighted Suspended and Bedload* aktiviert. Bei Auswahl von *Dynamic* kann der Gewichtungsfaktor für die Geschiebefracht angegeben werden. (HEC, 2020a)

Im zweiten Reiter *Erosion Parameters* (s. Abbildung 11-13 rechts) kann der *Adaption Coefficient* für die Berechnung der Erosion von nicht kohäsivem Sediment angepasst werden (HEC, 2020a). Der dimensionslose Adaptionkoeffizient wird in der Berechnung der Erosion durch die hydraulische Strömung benötigt und muss kalibriert werden (HEC, 2020b, p. 38).

- *Total Load*: Die simpelste Methode ist die Angabe einer konstanten Adaptionlänge (*Total Length*). Diese Einstellung wird zunächst empfohlen und sollte anschließend auf Sensitivität überprüft werden, welche häufig nicht auftritt (HEC, 2020a). Eine realitätsnähere Berechnung ist der gewichtete Ansatz nach dem Anteil der Schwebstoff- und Geschiebefracht (*Weighted Length*) (HEC, 2020b).

- *Suspended Adaption Coefficient*: Dieses Feld wird nur bei der Auswahl *Weighted Length* aktiviert. Es kann ein konstanter Adaptionkoeffizient angeben (*Constant Coefficient*) oder aus zwei Formeln gewählt werden (*Zhou and Lin* oder *Armanini and di Silvio*) (HEC, 2020b, pp. 42-43).
- *Bed Load Adaption Length*: Dieses Feld wird nur bei der Auswahl *Weighted Length* aktiviert. Hier kann entweder eine konstante Adaptionlänge (*Constant Length*) oder eine Berechnung abhängig von der Wassertiefe (*Depth Dependent*) gewählt werden (HEC, 2020b, pp. 41-42).

2D Sediment Optionen

Über den Reiter *Options – 2D Options* sind zudem einige Parameter speziell für den 2D-Sedimenttransport zu finden (s. Abbildung 11-14).

- *Capacity Only Method*: Dies ist die simpelste Methode zur Berechnung des Transportmodus Parameters. Dieser wird bei Aktivierung der Option gewichtet nach den Anteilen an potenziellem Schwebstoff- und Gesamttransport ermittelt (HEC, 2020b, p. 30).
- *Sheet and Splash Erosion*: Die Flächen- und Spritzwassererosion für alle trockenen Zellen oberhalb der Wasseroberfläche kann bei einer Simulation von Niederschlag und daraus resultierendem Oberflächenabfluss aktiviert werden (HEC, 2020b, pp. 39-40). Ist die Flächen- und Spritzwassererosion aktiviert, muss eine Erodierbarkeit (englisch: *Erodibility*) angegeben werden. Dieser empirische Koeffizient in der Einheit $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3,644}\cdot\text{s}^{0,644}$ kann je nach Bodentyp und Landbedeckung stark variieren. (HEC, 2020a, p. 52)
- *Morphological Acceleration Factor*: Der morphologische Beschleunigungsfaktor kann genutzt werden, um in einem kürzeren Zeitraum eine langjährigere morphologische Veränderung zu simulieren, indem diese Veränderung beschleunigt wird. Wird beispielsweise 1 Jahr simuliert und ein Faktor von 5 eingestellt, wird die morphologische Veränderung von 5 Jahren modelliert. Ist der Faktor gleich Null, entsteht keinerlei Veränderung. Ist er gleich eins, entspricht die Veränderung der normalen Simulationszeit. Der morphologische Beschleunigungsfaktor sollte vor seiner Nutzung jedoch validiert werden, um unrealistische Ergebnisse auszuschließen. (HEC, 2020a, pp. 52-53)
- *Base Bed-Slope Coefficient*: Dieser Basis-Sohlneigungskoeffizient begrenzt den maximalen Effekt einer erhöhten Sohlenveränderung bei größerer Neigung. Er liegt in der Regel zwischen 0,1 und 1 und sollte kalibriert werden. Ist der Koeffizient gleich Null, wird der Effekt nicht begrenzt und die Sohlveränderung ist gefälleabhängig. Ist der Koeffizient gleich eins, wird die Sohle geebnet. (HEC, 2020a, p. 53), (HEC, 2020b, p. 96)
- *Hindered Settling*: Dieser Effekt beschreibt die Beeinträchtigung des Absetzens von Partikeln oder Flocken aufgrund einer hohen Sedimentkonzentration. Hier bezieht sich der Effekt jedoch nur auf kohäsive Sedimente bzw. Flocken. (HEC, 2020a, p. 53), (HEC, 2020b, p. 54)
- *Avalanching*: Dieser Effekt beschreibt das Rutschen von Sohlmaterial ab einem bestimmten Sohlgefälle, wodurch sich ein neues Gefälle einstellt. Der Winkel, ab dem der Effekt auftritt, kann unter *Response Angle* angegeben werden. Mit dem *Relaxation Factor* (zwischen 0,25 und 0,5) kann das Materialrutschen reguliert werden, sodass dieses nicht unrealistisch groß wird. (HEC, 2020b, pp. 75, 102-104)

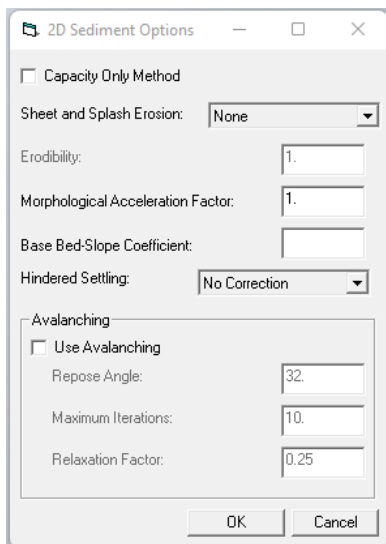


Abbildung 11-14: 2D-Sediment Optionen

Für die exemplarische Sedimentsimulation im Beispielprojekt wird die Gleichung von Wu et al. als Transportgleichung ausgewählt, da sie am besten für ungleichförmiges Sohlmaterial geeignet ist (van der Scheer, et al., 2002). Die Sortierungsmethode ist wie bei allen 2D-Sedimentsimulationen die Methode *Active Layer*. Für die Sinkgeschwindigkeit wird die Formel nach Soulsby verwendet, da sie eine simple Berechnungsweise darstellt. Jedoch wird der *Shape Factor* auf 0,7 gesetzt (s. Abbildung 11-11). Die Parameter der Transportmethoden sowie die Sediment Optionen werden bei ihren Standardeinstellungen belassen, da keine Daten zur Kalibrierung vorliegen. Lediglich der *Morphological Acceleration Factor* wird verwendet, um die Berechnungsdauer zu verkürzen.

11.3.3 Randbedingungen

Zusätzlich zu den Zu- und Abflussrandbedingungen, die über die *Unsteady Flow* Datei definiert werden (s. Abschnitt 9.2), müssen bei einer Feststofftransportsimulation Randbedingungen hinsichtlich des Feststofftransports an den bereits festgelegten Randbedingungsstellen angegeben werden. Dies geschieht im *Sediment Data* Fenster über den Reiter *Boundary Conditions* (s. Abbildung 11-15). Analog zu Abschnitt 9.2 wird hier für jeden Randbedingungsstelle ein Randbedingungstyp gewählt. Die für eine 2D-Sedimentsimulation verfügbaren Typen sind in Abbildung 11-15 markiert. Es stehen fünf verschiedene Typen zur Verfügung. Wird ein Randbedingungsstelle nicht zugeordnet, wird automatisch *Equilibrium Load* ausgewählt. (HEC, 2020a)

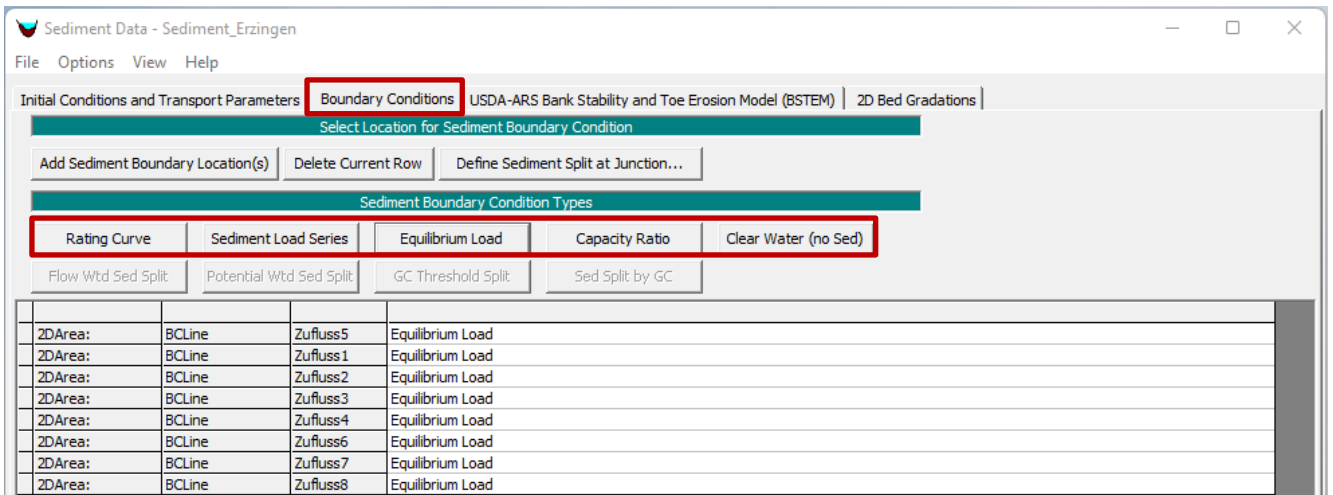


Abbildung 11-15: Randbedingungen im *Sediment Data* Fenster

Rating Curve

Bei dem Randbedingungstyp *Rating Curve* (s. Abbildung 11-16 links) wird in den ersten zwei Zeilen der Tabelle eine Sedimentkonzentration in [t/d] oder [mg/l] (Auswahl unterhalb der Tabelle) abhängig vom Durchfluss angegeben. Die Anzahl der Punkte in der Sedimentfracht-Durchfluss-Beziehung kann im Dropdown Menü *Number of flow-load points* angegeben werden. Zusätzlich kann optional eine Kornverteilung je Punkt angegeben werden. (HEC, 2020a, p. 34)

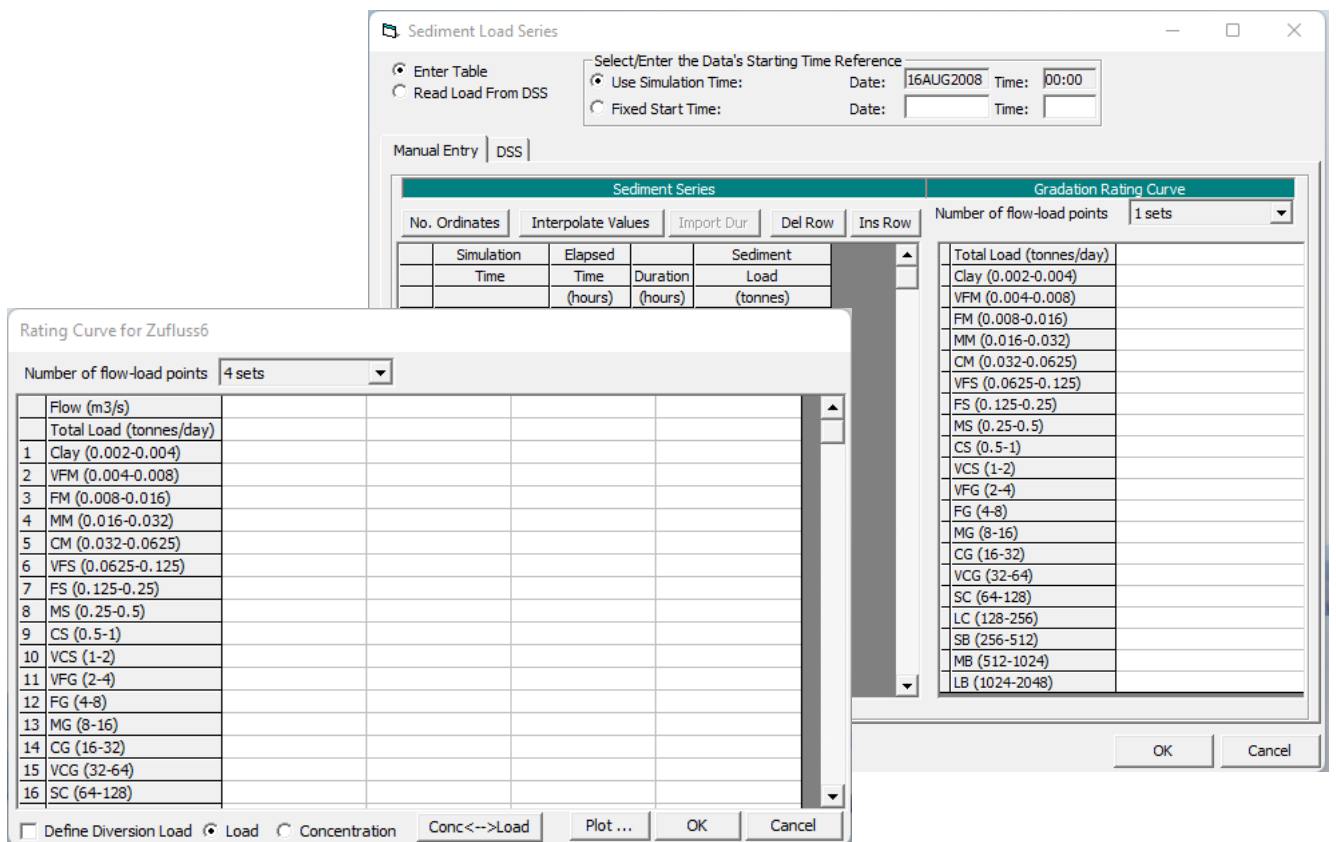


Abbildung 11-16: Bearbeitungsfenster der Randbedingungen *Rating Curve* (links) und *Sediment Load Series* (rechts)

Sediment Load Series

Bei der Option *Sediment Load Series* (s. Abbildung 11-16 rechts) wird eine Ganglinie der Sedimentfracht in [t/d] im linken Bereich des Fensters angegeben. Ähnlich wie bei der Option *Rating Curve* kann optional eine Kornverteilung abhängig von der Fracht im rechten Bereich des Fensters definiert werden. (HEC, 2020a, p. 35)

Equilibrium Load

Beim Randbedingungstypen *Equilibrium Load* wird ein Gleichgewicht von zu- und abströmender Sedimentfracht je Zelle der Randbedingung angenommen. Dieser Typ wird empfohlen, sollten keine Daten für andere Randbedingungstypen bekannt sein. Diese Option wird als Standard verwendet, wenn keine Angabe getroffen wird. (HEC, 2020a, p. 36)

Capacity Ratio

Die Option *Capacity Ratio* erlaubt die Angabe eines Faktors, um den die Gleichgewichtsfracht aus *Equilibrium Load* multipliziert wird.

Clear Water (no Sed)

Beim Randbedingungstypen *Clear Water* enthält das zu- bzw. abströmende Wasser keinerlei Sediment. (HEC, 2020a, p. 36)

Im Beispielprojekt wird aufgrund nicht vorhandener Daten zum Sedimenttransport für alle Randbedingungen der Typ *Equilibrium Load* gewählt.

11.4 Plan Datei

Zum Initiieren einer 2D-Feststofftransportsimulation wird eine *Plan* Datei genutzt, ebenso wie bei einer rein hydraulischen Simulation (s. Kapitel 10). Es muss lediglich das Feld *Sediment* im Bereich *Programs to Run* (s. Abbildung 10-2) aktiviert werden.

11.4.1 Berechnungsparameter der hydraulischen Simulation

Es werden folgende Einstellungen in den *Computation Options and Tolerances* der hydraulischen Simulation empfohlen (s. Abbildung 10-4, *Options – Computation Options and Tolerances*):

- 6. *Equation Set*: Für eine Sedimentsimulation sollte eines der Flachwassergleichungssets *SWE-EM* oder *SWE-ELM* und nicht die Diffusionswellengleichung verwendet werden, da diese dazu neigt, einen schmalen Kanal in den Gewässerlauf zu erodieren.
- 7. *Initial Condition Time*, 8. *Initial Conditions Ramp Up Fraction*: Es sollte eine hydraulische Vorlaufzeit definiert werden, da das Fluten eines trockenen Gewässerlaufs zu Instabilitäten in der Sedimentsimulation führen kann. Hier muss darauf geachtet werden, sowohl die Vorlaufzeit als auch die darin enthaltene *Ramp Up Fraction* groß genug zu wählen, da nur in der ersten Hälfte dieser Zeit eine rein hydraulische Simulation durchgeführt wird. Ab der Hälfte der Vorlaufzeit fügt HEC-RAS zusätzlich die Sedimentsimulation hinzu.

(HEC, 2020a)

11.4.2 Berechnungsparameter der Sedimentsimulation

Zusätzlich gibt es spezifische Berechnungsoptionen für den Sedimenttransport, die über den Reiter *Options – Sediment Computation Options and Tolerances* erreicht werden (s. Abbildung 11-17). Im Reiter *General* können allgemeine Einstellungen getroffen werden, wobei zu beachten ist, dass nur die in Abbildung 11-17 links rot markierten Optionen für die 2D-Simulation verfügbar sind: (HEC, 2020a)

- *Sediment Computation Multiplier*: Um diesen Faktor wird der Berechnungszeitschritt der hydraulischen Simulation (s. Abschnitt 10.1) für die Sedimentberechnung modifiziert.
- *Sediment Warm Up Periods*: Nach der in den *Computation Options and Tolerances* der hydraulischen Simulation (s. Abbildung 10-4) eingestellten Vorlaufzeit, kann hier zusätzlich eine daran anschließende Warmlaufzeit für die Sedimentsimulation aktiviert werden. In der *Concentration* Vorlaufzeit wird nur die Sedimentkonzentration im Wasser berücksichtigt, um klares Wasser ohne Sediment zu vermeiden. In der *Gradation* Vorlaufzeit wird zusätzlich zur Sedimentkonzentration die Kornverteilung im Gewässerbett berücksichtigt, ohne dieses in seiner Höhe zu verändern. In der *Bathymetry* Vorlaufzeit wird schließlich die Gewässerbettveränderung ergänzt, also eine Veränderung der *Property Tables* der Zellen zugelassen. (HEC, 2020a)
- *Bed Roughness Predictor*: Diese Option passt im Laufe einer Sedimentsimulation die Sohlrauheit auf der Basis von Transportkörpern sowie veränderter Kornverteilung in der Sohle an. (HEC, 2020a)
 - *Limerinos*: Diese Formel berücksichtigt nicht die Veränderung der Rauheit durch die Kornverteilung. Sie ist zudem nur für Kiessohlen in geraden Kanälen mit hohen Durchflüssen anwendbar. (HEC, 2020b, pp. 14-15)
 - *Brownlie*: Dieser Ansatz beinhaltet zwei Gleichungen für strömenden Abfluss (englisch: *Lower flow regime*), bei dem Riffel und Dünen entstehen, und für schießenden Abfluss (englisch: *Upper flow regime*), bei dem die Sohle flach ist, Antidünen entstehen oder sich eine stehende Wellen bildet. Da diese Phänomene nur bei einer sandigen Sohle entstehen, ist dieser Ansatz nur für Körnungen in diesem Bereich geeignet. Die Trennung beider Fließzustände in der Berechnung kann jedoch zu Instabilitäten führen. (HEC, 2020a, pp. 13, 15), (Brownlie, 1981)
 - *van Rijn*: Diese Formel berücksichtigt für die Gesamtrauheit der Sohle sowohl die Rauheit durch Dünen als auch durch die Körnung, wodurch sie für eine größere Bandbreite an Körnungen anwendbar ist. (HEC, 2020a, pp. 15-16)

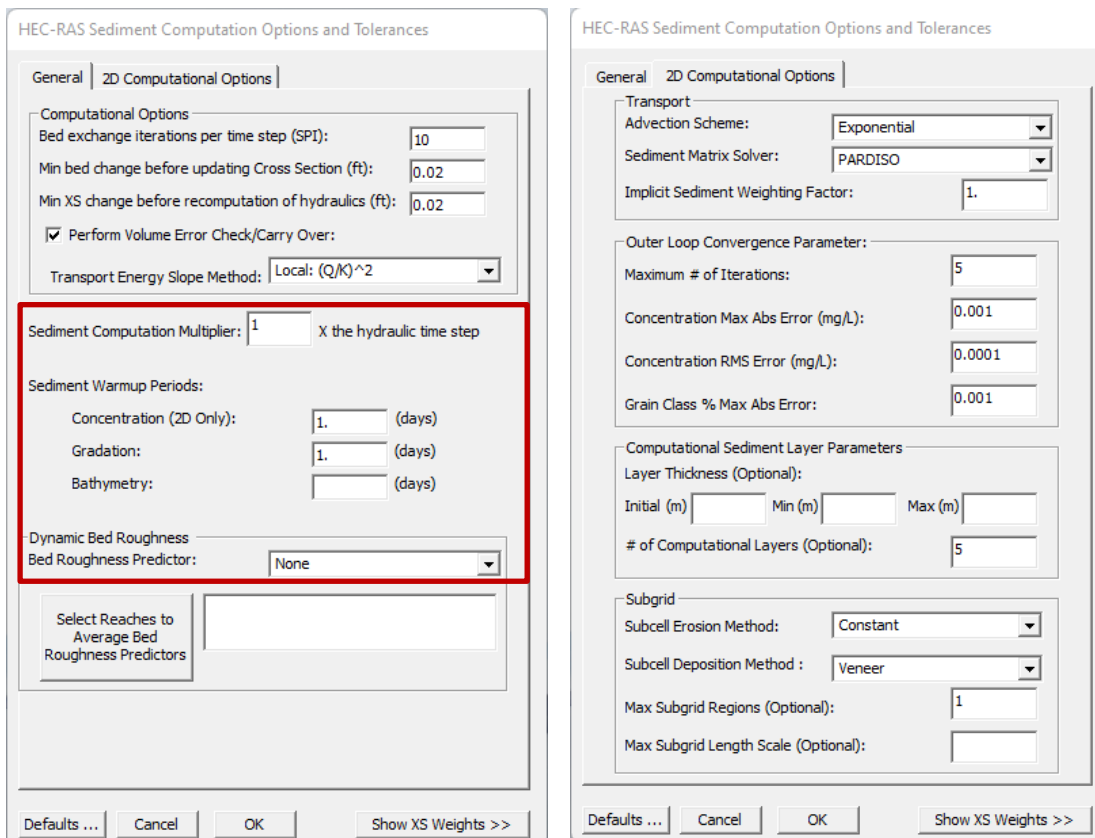


Abbildung 11-17: Berechnungsparameter der Sedimentsimulation

Zudem können im Reiter *2D Computational Options* Einstellungen hinsichtlich der Lösungsverfahren der Gleichungen angepasst werden:

- *Transport*:
 - *Advection Scheme*: Hier kann das numerische Lösungsverfahren für die Transportgleichungen gewählt werden. Es werden zwei simplere Verfahren erster Ordnung (*Upwind* und *Exponential*) sowie zwei präzisere Verfahren höherer Ordnung (*Minmod* und *Harmonic*) angeboten. (HEC, 2020a, p. 62)
 - *Sediment Matrix Solver*: S. Abschnitt 10.2, „17. Matrix Solver“
 - *Implicit Sediment Weighting Factor*: S. Abschnitt 10.2, „1. Theta“
- *Outer Loop Convergence Parameters*: Mit *Outer Loop* ist die Schleife gemeint, in der die Transportgleichungen iterative gelöst werden. Konvergenzparameter bestimmen, ab wann die Iteration beendet wird, wenn die Lösung konvergiert. (HEC, 2020a, pp. 64-65)
 - *Maximum # of Iterations*: S. Abschnitt 10.2, „5. Maximum Iterations“
 - *Concentration Max Absolute Error*: S. Abschnitt 10.2, „3. Water Surface Tolerance, 4. Volume Tolerance“
 - *Concentration RMS (root-mean-square) Error*: S. Abschnitt 10.2, „3. Water Surface Tolerance, 4. Volume Tolerance“
 - *Grain Glass % Max Absolute Error*: S. Abschnitt 10.2, „3. Water Surface Tolerance, 4. Volume Tolerance“
- *Computational Sediment Layer Parameters*: In diesem optionalen Bereich können Einstellungen für die Sedimentschichten getroffen werden, die HEC-RAS automatisch für die Berechnung erstellt, um im Laufe einer Sedimentsimulation eine Sortierung zu definieren. Hat der Nutzer

bereits eine Schichtung angegeben (s. Abbildung 11-6 rechts) werden die einzelnen Schichten nochmals unterteilt. Wurden keine Schichten angegeben, werden anhand der angegebenen Parameter Berechnungsschichten derselben Körnung erzeugt: (HEC, 2020a, pp. 65-67)

- *Initial, Min, Max*: Der Nutzer kann eine anfängliche Schichtdicke für die einzelnen Berechnungsschichten (*Initial*) angeben, die die maximal größte Schichtdicke festlegt. Zudem können Minimal- und Maximalwerte angegeben werden. (HEC, 2020a)
- *Number of Computational Layers*: Alternativ kann der Nutzer die Anzahl der Berechnungsschichten vorgeben. (HEC, 2020a)
- *Subgrid*: Die *Subgrid* Methode bezieht sich auf das Vorgehen von HEC-RAS, wodurch bei der hydraulischen Simulation mithilfe der *Property Tables* der einzelnen, größeren Berechnungszellen, die Höhen- und Oberflächeninformationen eines vergleichsweise feineren DGM nicht verloren gehen (HEC, 2022g). Bezogen auf die Sedimentsimulation kommt diese zum Einsatz, wenn innerhalb einer Berechnungszelle mehrere Regionen von Sedimentmaterialien (s. Abschnitt 11.2) vorkommen, da sich die Erosion aus dem Produkt von Erosionspotential und Sedimentverfügbarkeit anhand der Körnung der Materialregion berechnet. (HEC, 2020a, pp. 61-62), (HEC, 2020b, p. 78 ff.)
 - *Subcell Erosion Method*: (HEC, 2020a, p. 62)
 - *Constant*: Diese Methode verwendet konstante Parameter, indem alle Informationen (Körnung, Rauheit, etc.) für die nassen Berechnungszellen gemittelt werden und ein durchschnittliches Erosionspotential berechnet wird.
 - *Variable Bed*: Diese Methode berechnet das Erosionspotential für jede Teilregion einzeln, verwendet jedoch gemittelte hydraulische Parameter.
 - *Full Subgrid*: Diese Methode verwendet keinerlei Mittelwerte, sondern berechnet das Erosionspotential anhand der Sohlinformationen und hydraulischen Parameter der Teilregionen.
 - *Subcell Deposition Method*:
 - *Veneer*: Analog zur Methode *Constant* wird hier eine konstante Depositionsrate für die nassen Berechnungszellen verwendet. (HEC, 2020a, p. 62)
 - *Capacity-Weighted*: Diese Methode berechnet die Depositionsrate für die nassen Berechnungszellen gewichtet anhand der Sedimentkonzentrationen der Teilregionen. (HEC, 2020b, p. 85)

11.4.3 Ausgabeoptionen der Sedimentsimulation

Zusätzlich zu den Ausgabeoptionen, die in Abschnitt 10.3 beschrieben sind, können über den Reiter *Options – Sediment Output Options* weitere Sedimentausgabeoptionen aktiviert werden (s. Abbildung 11-18).

In der ersten Markierung in Abbildung 11-18 kann der Detailgrad der Ausgabeinformationen zu der Sedimentsimulation im Ausgabeprotokoll (s. Abschnitt 10.3.1) angegeben werden. Ein höheres *Output Level* steht hierbei für eine größere Menge an herauszuschreibenden Variablen. Die Zuordnung des Levels zu den Variablen ist im „HEC-RAS Two-Dimensional Sediment Transport User's Manual“ zu finden (HEC, 2020a, p. 70 ff.). Die darunterliegenden vier Dropdown Menüs und Eingabefenster dienen der Spezifizierung der auszugebenden Einheit und des Ausgabeintervalls.

Über die Schaltfläche *Select Customized Variables* in Abbildung 11-18 oben rechts können individuelle Variablen aktiviert werden, die in der Ergebnisvisualisierung im *RAS-Mapper* zusätzlich zu den Standardvariablen ausgegeben werden können (s. Abschnitt 12.1.1 "Neue Ergebnislayer hinzufügen"). (HEC, 2020a)

Im Bereich *Sediment Hotstart* können bei Aktivierung Anfangsbedingungen für die Sedimentsimulation aus einer vorherigen 1D- oder 2D-Sedimentsimulation gewählt werden. Die *.hdf-Datei der vorherigen Simulation wird über *Browse* ausgewählt und in den darunterliegenden Eingabefenstern die gewünschte Zeit selektiert. Es kann sowohl die Kornverteilung im Gewässerbett (*Gradation Only*) als auch die Sohlhöhenänderung (*Bed Elevation Only*) oder beides als Anfangsbedingung im Dropdown Menü *Hotstart Type* gewählt werden. Auf diese Weise kann die Vorlaufzeit (*Sediment Warm Up Periods*), die in Abschnitt 11.4.2 beschrieben ist, minimiert werden. (HEC, 2022i)

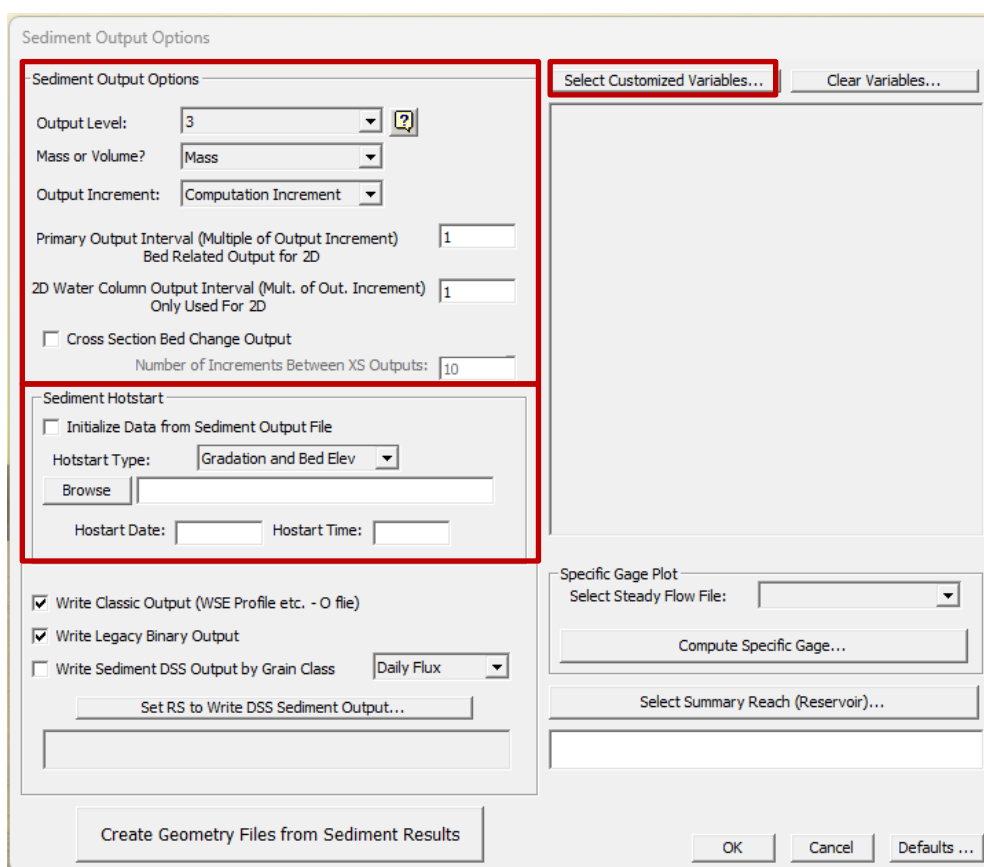


Abbildung 11-18: Ausgabeoptionen der Sedimentsimulation

In der exemplarischen Sedimentsimulation werden die hydraulischen Berechnungsparameter so belassen wie bei den Simulationen zuvor ohne Sediment (s. Abbildung 10-4). Es wird jedoch eine Vorlaufzeit von einer Stunde definiert, die zu 80 % die *Ramp Up Fraction* darstellt. Die Sedimentparameter (s. Abbildung 11-17) werden bis auf die *Warmup Periods* bei ihren Standardeinstellungen belassen. Es werden je 3 Stunden (0,125 Tage) *Concentration*, *Gradation* und *Bathymetry* Anlaufzeit eingestellt. Die eigentliche Modellierung des Sedimenttransports wird ebenfalls 3 Stunden simuliert, jedoch mit einem *Morphological Acceleration Factor* von 2. Es wird ein konstanter Durchfluss von 5,6 m³/s verwendet, der dem akkumulierten Durchfluss von HQ5 im Untersuchungsgebietes der Sedimentsimulation entspricht.

Da die Berechnungsdauer einer Simulation mit Feststofftransport bedeutend länger ist als die einer hydraulischen Simulation, wird nur ein kleiner Abschnitt einer Flusskurve der Steinach betrachtet (s. Abbildung 11-19). Weiterhin wird das Berechnungsnetz mithilfe einer Bruchkante und der Funktion *Near Repeats* so angepasst, dass alle Zellen entlang des Gewässerlaufs ausgerichtet sind. Anschließend werden durch manuelles Verschieben der *Computation Points* alle kurzen Zellkanten entfernt, sodass ein strukturiertes Gitter entsteht. Zudem wird vor der Sedimentsimulation zunächst eine rein hydraulische Simulation durchgeführt und die Einhaltung der Courant-Bedingung in allen Zellen geprüft.

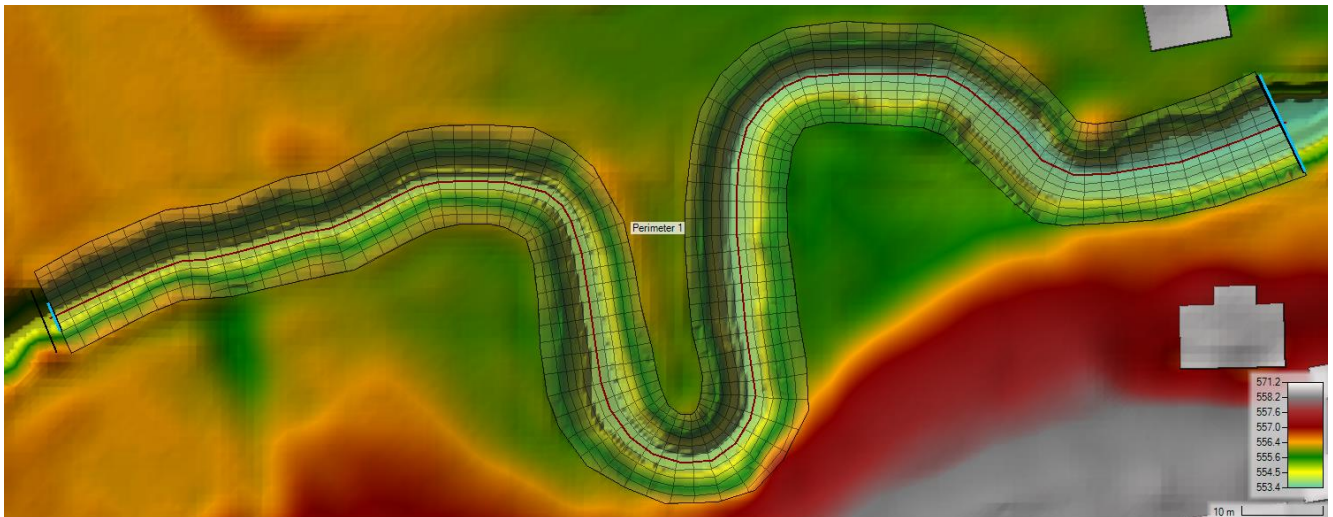


Abbildung 11-19: Berechnungsnetz des Untersuchungsgebietes der Sedimentsimulation im Beispielprojekt

11.5 Allgemeine Modellierungshinweise für 2D-Sedimentmodelle

Grundsätzlich werden einige Vorgehensweisen empfohlen, die bei einem 2D-Sedimentmodell befolgt werden sollten, um eine stabil laufende und repräsentative Sedimentsimulation zu erzeugen.

- Es ist wichtig vor einer Feststofftransportsimulation, zuerst eine stabil laufende hydraulische Simulation zu erstellen, da Sedimentsimulationen häufig weniger stabil sind. Zudem ist es möglich, dass während einer Sedimentsimulation bisher unentdeckte Probleme der hydraulischen Simulation auftreten, was es notwendig macht, die Grundlagen des hydraulischen Modells zu überarbeiten. Insgesamt sollte daher bei dem Erstellen eines Modells gründlich und gewissenhaft vorgegangen werden. (HEC, 2020a)
- Feststofftransportmodelle haben häufig längere Simulationszeiten als hydraulische Modelle. Es ist jedoch oft nicht möglich, die daraus resultierende Berechnungszeit zu verkürzen. Auch bei Sedimentmodellen ist die Einhaltung der Courant-Bedingung essenziell, sodass es nicht ratsam ist, den Zeitschritt zugunsten der Rechenzeit zu vergrößern. (HEC, 2020a)
- Bei einer Sedimentsimulation ist es zum Erlangen realistischer Ergebnisse noch wichtiger als bei einer hydraulischen Simulation, dass die Berechnungszellen entlang der Strömung ausgerichtet und ggf. verfeinert sind. Dies kann durch Setzen von Geländebruchkanten entlang der Gewässermittellinie sowie entlang der Ufer erreicht werden (s. Abschnitt 7.2.2). (HEC, 2020a)

-
- Zudem kann es vorkommen, dass Übergangszonen zwischen Regionen mit feinen und groben Zellen noch größere Zellgrößen aufweisen. Dies kann durch manuelles Nacharbeiten und Setzen von zusätzlichen Berechnungspunkten verbessert werden (s. Abschnitt 7.2.4). (HEC, 2020a)
 - Weiterhin können kurze Zellkanten zu Problemen bei einer Sedimentsimulation führen. Dies kann entweder durch manuelles Nacharbeiten oder durch Hochsetzen der minimalen Toleranz von Zellkantenlängen auf 20 % gelöst werden. Diese Einstellung ist im *RAS-Mapper* im Reiter *Tools – Options – Mesh Tolerance – Minimum Face Length Tolerance* zu finden. (HEC, 2020a, pp. 23-25)
 - Zuletzt ist es wichtig, Sedimentsimulationen gründlich zu kalibrieren, die Ergebnisse zu validieren sowie einzelne Parameter einer Sensitivitätsanalyse zu unterziehen (s. Kapitel 13). Auch nach diesen Prozessen ist nicht garantiert, dass die Ergebnisse der Feststofftransportsimulation eine genaue Abbildung der Realität sind. Letztlich sind die Sedimenttransportgleichungen empirischer Natur und nicht für jedes Modell ohne Einschränkungen anwendbar.

12 Ergebnisvisualisierung

Die Darstellung von Simulationsergebnissen ist in HEC-RAS auf vielfältige Weise in 1D-, 2D- sowie 3D-Ansichten möglich. Diese Darstellungsoptionen werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

12.1 Darstellungen im *RAS-Mapper*

Im *RAS-Mapper* können 2D-Draufsichtskarten und Ergebnisdarstellungen an ausgewählten Querschnitten entweder als 2D-Darstellung oder als Diagramm bzw. Tabelle verwendet werden.

12.1.1 Verteilungskarten berechneter Parameter

Nach erfolgreichem Durchführen einer Simulation wird automatisch eine Ergebnisdatei erzeugt, die direkt im *RAS-Mapper* einzusehen ist und bereits Verteilungskarten zur Wassertiefe (englisch: *Depth*), zur Fließgeschwindigkeit (englisch: *Velocity*) sowie zum Wasserstand in Meter über Normalnull (englisch: *WSE – water surface elevation*) enthält. Für jede Simulation wird automatisch ein neuer Unterlayer des Layers *Results* angelegt, der nach der *Short ID* der Simulation benannt ist (s. Kapitel 10) und die besagten Verteilungskarten beinhaltet (s. Abbildung 12-1). Zudem ist eine Kopie der für die Simulation verwendeten Geometrie enthalten. Außerdem wird automatisch der Unterlayer *Event Conditions* hinzugefügt, welcher Ereignisse wie Wind oder dynamische Niederschlagsverteilung enthält. Hat ein Nutzer meteorologische Daten implementiert (s. Abschnitt 9.2.4 „Niederschlag und Verdunstung aus meteorologischen Daten“), werden diese nach einer Simulation hier dynamisch abgebildet (HEC RAS, 2022a). Andernfalls bleibt der Layer *Event Conditions* leer. Im oberen Teil des Kartebereichs wird hinter *Selected* die Karte eingeblendet, die aktuell ausgewählt ist. Nur für die ausgewählte Karte, welche in der Layerliste links in Abbildung 12-1 pink markiert ist, wird im Kartenbereich die Legende unten rechts angezeigt. Die berechneten Werte an einer Position der selektierten Karte können nicht nur über die Farbskala abgelesen werden, sondern auch durch Schweben mit dem Mauszeiger über der Karte.

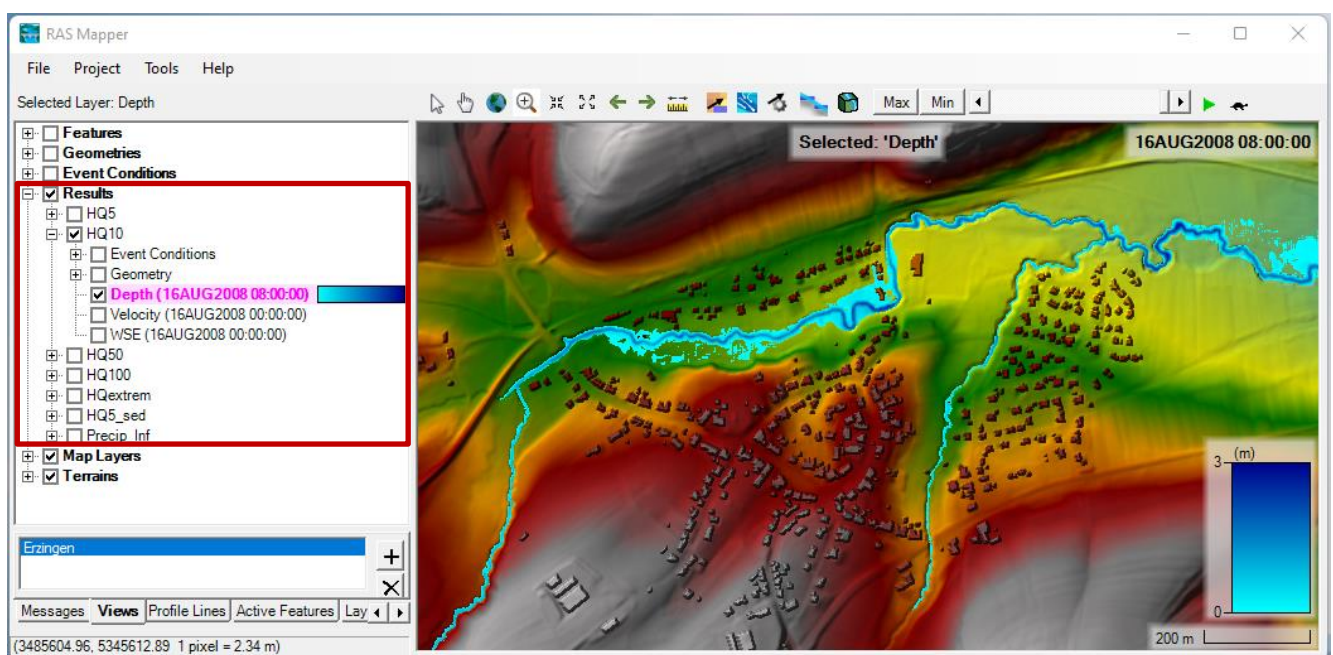


Abbildung 12-1: Verteilungskarten der Simulationsergebnisse im *RAS-Mapper*

Darstellungsoptionen von Layern

Die Visualisierungsart der Karten sowie aller andern Layer im *RAS-Mapper* kann per Rechtsklick auf den Layer und Auswahl von *Layer Properties* oder per Doppelklick auf die Legende hinter dem Layernamen in der Liste in Abbildung 12-1 links eingestellt werden. Es öffnet sich das Fenster in Abbildung 12-2 links.

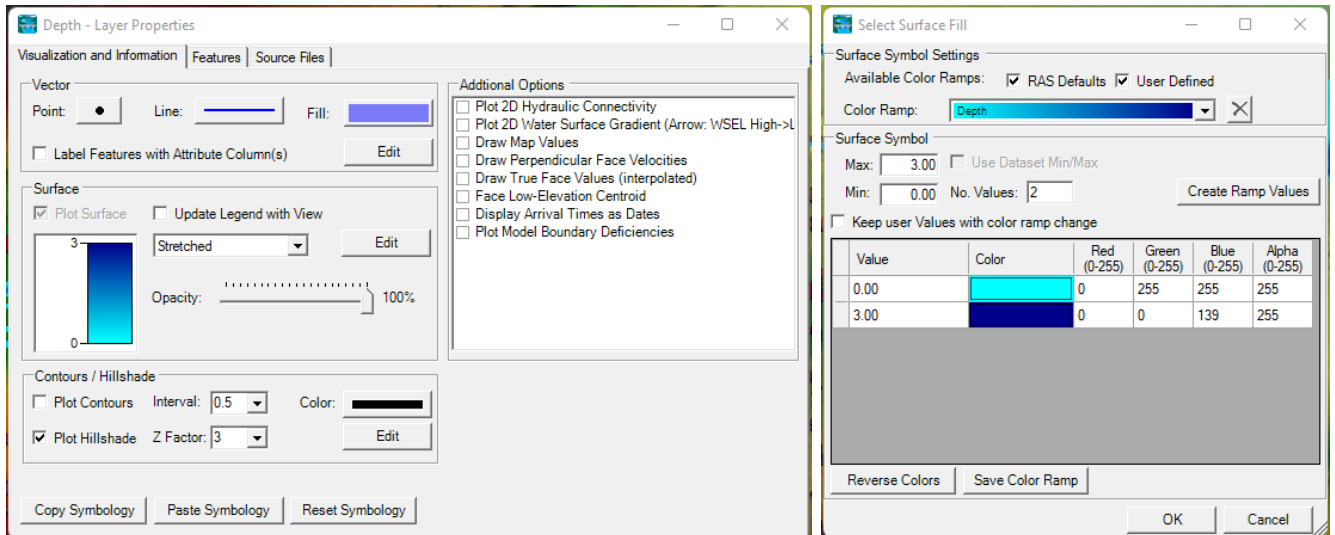


Abbildung 12-2: Visualisierungsoptionen von Layern: Links: Allgemeine Optionen, rechts: Farbgebung der Legende

Im ersten Bereich *Vector* kann die Farbgebung von Vektorlayern (also alle Layer, die Punkt-, Linien- oder Polygonfeatures enthalten) eingestellt werden. (HEC, 2022f)

Im Bereich *Surface* werden Einstellungen für Rasterkarten (Gelände- und Ergebniskarten) getroffen. Mit dem Haken bei *Update Legend with View* wird die Legende immer an die aktuelle Ansicht angepasst. Im darunterliegenden Dropdown Menü kann ausgewählt werden, ob die Legende diskret oder kontinuierlich dargestellt werden soll. Weiterhin kann unter *Opacity* die Transparenz verändert werden. Die Farbgebung sowie die Wertezuweisung der Legende werden mithilfe der *Edit* Schaltfläche oder per Doppelklick auf die Legende angepasst. Daraufhin öffnet sich das Fenster in Abbildung 12-2 rechts. Im Dropdown Menü hinter *Color Ramp* kann aus verschiedenen von HEC-RAS standardmäßig angebotenen sowie manuell erstellten und gespeicherten Farbgradienten gewählt werden. Manuell eingestellt werden kann der minimale (*Min*) und maximale (*Max*) Wert der Legende sowie die Anzahl der Werte (*No. Value*). Wurde einer dieser drei Werte verändert, muss die Schaltfläche *Create Ramp Values* angeklickt werden, um einen neuen Farbverlauf zu generieren, der anschließend mittig im Fenster dargestellt wird. Die Farben im Verlauf können per Klick auf die einzelnen Zellen der Spalte *Color* angepasst werden. Soll die manuelle Änderung des Farbgradienten gespeichert werden, damit dieser anschließend im Dropdown Menü oben erscheint, muss die Schaltfläche *Save Color Ramp* gewählt werden. (HEC, 2022f)

Im Bereich *Contours/Hillshade* werden mit einem Haken bei *Plot Contours* Höhenlinien mit wählbarem Intervall in Meter dargestellt. Die Aktivierung von *Plot Hillshade* ist vor allem für Geländekarten vorgesehen und bewirkt eine dreidimensional wirkende Karte mithilfe einer Lichtquelle, die Schatten erzeugt. Im Dropdown Menü hinter *Z Factor* kann zudem eine Überhöhung zur besseren Sichtbarkeit des Geländes eingestellt werden. (HEC, 2022f)

Im rechten Bereich des Fensters unter *Additional Options* (s. Abbildung 12-2 links) können zusätzliche Elemente in die Karte eingeblendet werden. Die zur Verfügung stehenden Elemente sind je nach ausgewähltem Layer unterschiedlich. (HEC, 2022f)

Dynamische Kartendarstellung

Für die Verteilungskarten ist eine dynamische Darstellung über die Simulationszeit möglich. Diese kann über die in Abbildung 12-3 markierte Werkzeugleiste gesteuert werden. Über die Schaltflächen *Max* und *Min* werden die minimalen bzw. maximalen Werte je Zelle eingeblendet. Diese beiden Verteilungen stellen keinen einzelnen Zeitschritt dar, sondern die Extremwerte, die während der gesamten Simulation je Zelle erreicht werden. Über die Laufleiste mittig in der Werkzeugleiste kann manuell ein Zeitschritt gewählt werden. Der derzeit dargestellte Zeitschritt wird im Kartenbereich rechts oben angezeigt. Der gesamte zeitliche Verlauf kann über die Abspielen- bzw. Pause-Schaltfläche automatisch abgespielt werden. Die Wiedergabegeschwindigkeit hierfür kann über die letzte Schaltfläche der Leiste angepasst werden. Bei dieser dynamischen Darstellung werden die Karten in dem Zeitschritt abgespult, der in *Mapping Output Interval* eingestellt wurde (s. Kapitel 10). (HEC, 2022f)

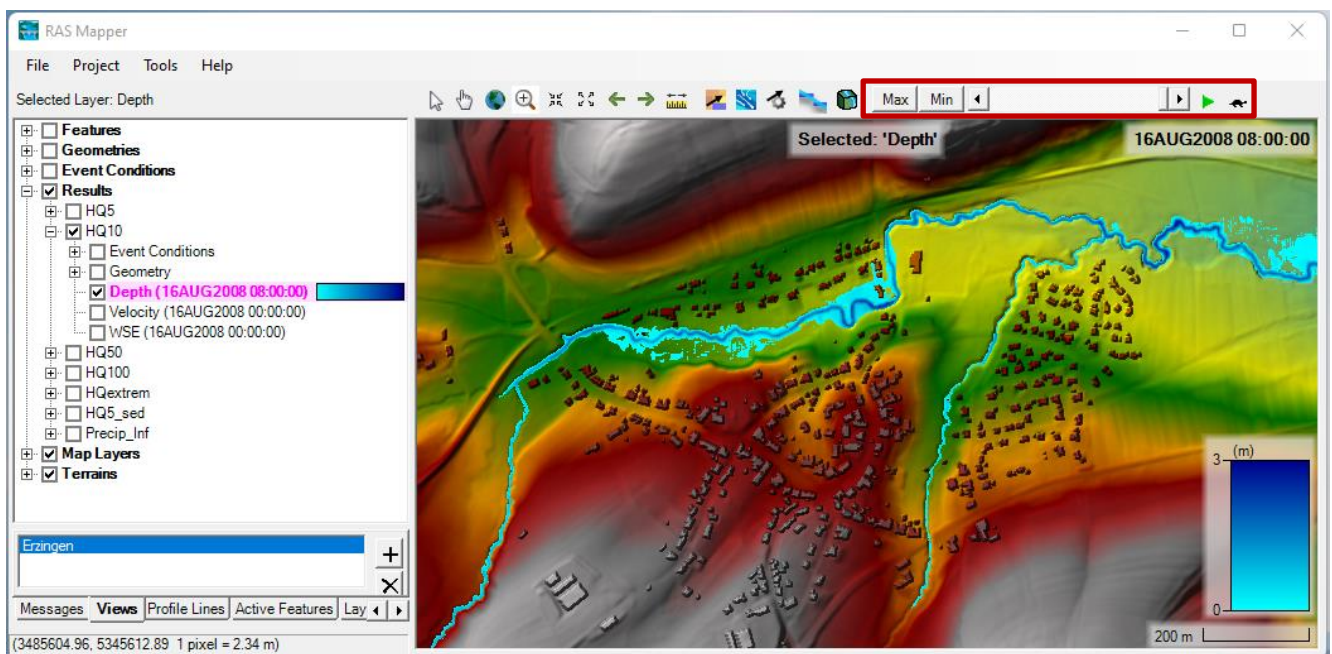


Abbildung 12-3: Dynamische Darstellung der Verteilungskarten im *RAS-Mapper*

Sollen mehrere Ergebnislayer gleichzeitig dynamisch dargestellt werden, müssen die gewünschten Layer in der Liste mit einem Haken aktiviert werden. Sollen mehrere Layer einer Simulation eingeblendet werden, muss die übergeordnete zugehörige *Plan*-Datei ausgewählt werden (pink hinterlegter Layer). Sollen mehrere Layer aus verschiedenen Simulationen eingeblendet werden, muss der Layer *Results* ausgewählt werden. (HEC, 2022f)

Geschwindigkeitsdarstellungen

Weiterhin können statische Geschwindigkeitspfeile (englisch: *Static Velocity Arrows*), (s. Abbildung 12-4 markierte Werkzeugleiste, erste Schaltfläche) sowie dynamische Bahnlinien (englisch: *Particle Tracing*), (s. Abbildung 12-4 markierte Werkzeugleiste, zweite Schaltfläche) eingeblendet werden. Über die dritte Schaltfläche können deren Darstellungen angepasst werden (s. Abbildung 12-4 Fenster im Vordergrund). Im Bereich *Static Arrows* können die Abstände der Pfeile (englisch: *Spacing*) und deren

Farbe (englisch: *Color*) modifiziert werden. Im Bereich *Particle Tracing* besteht die Option, die Geschwindigkeit (englisch: *Speed*), Dichte (englisch: *Desity*), Breite (englisch: *Width*), Länge/Lebensdauer (englisch: *Lifetime*) sowie Farbe (R, G, B) der Bahnlinien zu verändern. Beim Deaktivieren der Option *Anti-Aliasing* entstehen feinere Bahnlinien mit schärferen Kanten. (HEC, 2022f)

Über die vierte Schaltfläche der markierten Werkzeugleiste in Abbildung 12-4 kann der *Render Mode* für die Interpolation und Darstellung der Wasseroberfläche zwischen *Horizontal* (stellt die Wasseroberfläche je Zelle dar) und *Sloping* (Interpoliert die Wasseroberfläche entlang der Zellkanten) gewählt werden. (HEC, 2022e)

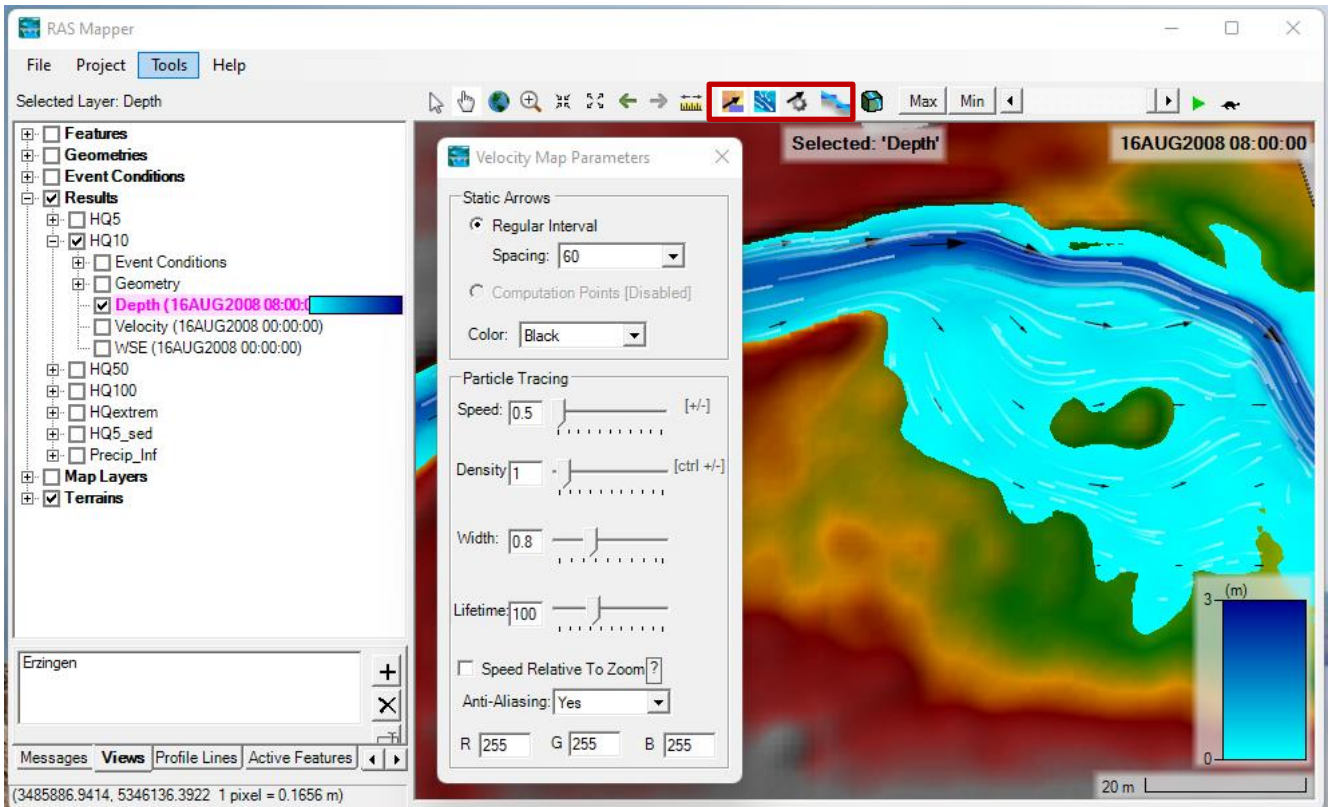


Abbildung 12-4: Verteilungskarte mit Geschwindigkeitspfeilen und Bahnlinien im *RAS-Mapper*

Neue Ergebnislayer hinzufügen

Möchte ein Nutzer zusätzlich zu den automatisch erzeugten Ergebniskarten weitere Layer hinzufügen, geschieht dies per Rechtsklick auf einen Ergebnislayer und Auswahl von *Create a New Results Map Layer*, wodurch sich das Fenster in Abbildung 12-5 öffnet. Hier kann im linken Bereich unter *Map Type* die Variable gewählt werden, für die eine neue Karte erstellt werden soll. Diese können aus den Oberkategorien *Hydraulics* und *Additional 2D Variables* sowie *Sediment*, falls dieses simuliert wurde, gewählt werden. Eine Liste und Beschreibung aller Möglichkeiten der Kategorie *Hydraulics*, welche den größten Anteil an Optionen darstellt, ist im „HEC-RAS Mapper User's Manual“ zu finden (HEC, 2022f, pp. 116-117). Unter dem Punkt *Hydraulics* können beispielsweise Variablen wie Froude-Zahl, Schubspannung oder Courant-Zahl gewählt werden. Der Bereich *Additional 2D Variables* enthält beispielsweise Extremwerte der an den Zellkanten berechneten Fließgeschwindigkeiten oder kumulative Infiltration bzw. kumulativer Niederschlag, falls dies simuliert wurde. Für Sedimentsimulationen können Layer zur Sohlveränderung, zur Transportkapazität sowie zur Transportkonzentration der einzelnen

Sedimentfraktionen hinzugefügt werden. Soll eine Variable verwendet werden, die in der Liste nicht existiert, können vor einer Simulation weitere Variablen ausgewählt werden, die der Liste unter *Map Type* hinzugefügt werden. Dies ist in der *Plan* Datei im Reiter *Options – Output Options – Computation Level Output Options – Additional Variables* möglich (für eine Sedimentsimulation unter *Options – Sediment Output Options – Select Customized Variables*) (Hydrologic Engineering Center, 2021). (HEC, 2022f)

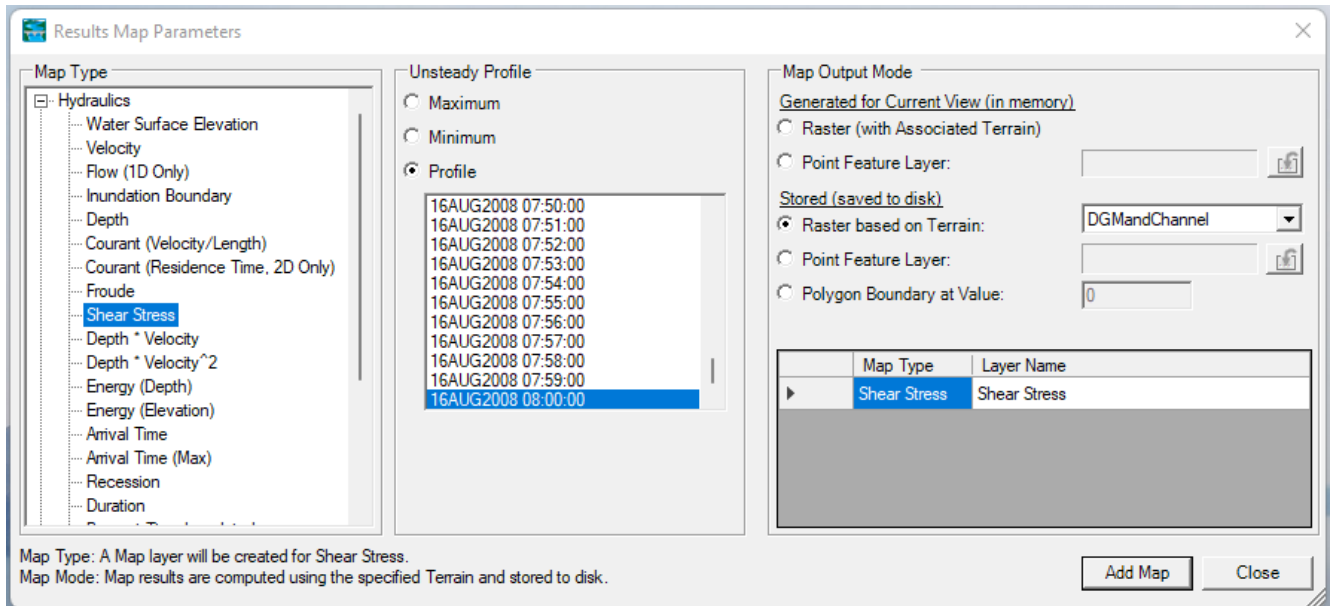


Abbildung 12-5: Optionen zum Hinzufügen neuer Ergebniskarten im *RAS-Mapper*

Die weiteren Optionen des Fensters in Abbildung 12-5 sind unterschiedlich, je nachdem welcher Ausgabeparameter gewählt wurde. Wichtig hierbei ist jedoch vor allem, dass zwischen gespeicherten Karten (englisch: *Stored maps*) und dynamischen Karten (englisch: *Dynamic maps*) unterschieden wird: (HEC, 2022f)

- Gespeicherte Karten geben die berechneten Simulationsergebnisse als Werte je Zelle an. Schwebt der Nutzer also mit dem Mauszeiger über einer gespeicherten Karte, wird für den gesamten Bereich einer Zelle ein konstanter Wert angezeigt. Daher besitzen Überflutungsflächen einer gespeicherten Karte keine geraden Außenkanten, sondern orientieren sich am Berechnungsnetz. Es wird nur ein ausgewählter Zeitschritt oder das Minimum/Maximum angezeigt. Soll eine gespeicherte Karte erstellt werden, muss in Abbildung 12-5 im rechten Bereich *Map Output Mode* eine der Optionen unter *Stored (save to disk)* gewählt werden. Nach dem Hinzufügen einer gespeicherten Karte muss das Fenster aus Abbildung 12-5 geschlossen werden und per Rechtsklick auf den neuen Layer *Compute/Update Stored Map* gewählt werden, um die Karte zu erstellen. Diese Momentaufnahme wird gespeichert und ist somit nicht veränderlich bis erneut *Compute/Update Stored Map* gewählt wird. Dies ist notwendig, wurde dieselbe Simulation neu berechnet und die gespeicherte Karte soll aktualisiert werden. (HEC, 2022f)
- Dynamische Karten dagegen sind veränderlich und werden je nach aktuellem Kartenausschnitt und Zoom neu generiert. Sie stellen nicht die exakten Berechnungsergebnisse je Zelle dar, sondern interpolieren die Werte für jeden Punkt abhängig vom darunterliegenden Gelände. Daher haben Überflutungsflächen dynamischer Karten meist glatte Außenkanten. Da dynamische

Karten während der Ansicht parallel durch das Auslesen der Ergebnisdatei generiert werden, aktualisieren sie sich automatisch selbst. Daher kann nicht nur eine Momentaufnahme, sondern verschiedene Zeitschritte dargestellt werden. Soll eine dynamische Karte erstellt werden, muss in Abbildung 12-5 im rechten Bereich *Map Output Mode* eine der Optionen unter *Generate for Current View (in memory)* gewählt werden. (HEC, 2022f)

Bei beiden Kartenvarianten kann die Karte basierend auf einem verknüpften Geländemodell erstellt werden (*Raster (with Associated Terrain) / Raster based on Terrain*) oder die Werte an bestimmten Punkten ausgegeben werden (*Point Feature Layer*), die durch eine hochzuladende *.shp-Datei definiert werden. Für gespeicherte Karten ist bei einigen Variablen auch die Ausgabe als Polygon entlang einer anzugebenden Wertegrenze möglich (*Polygon Boundary at Value*). (HEC, 2022f)

Im Bereich *Unsteady Profile* (s. Abbildung 12-5 Mitte) ist zudem zu wählen, welcher Zeitschritt in der gespeicherten Karte abgebildet werden soll. Für die Variablen *Arrival Time*, *Arrival Time Max*, *Recession*, *Duration* und *Percent Time Inundated* unterscheidet sich diese Angabe jedoch. Hier muss der Nutzer die Zeit, ab der gemessen werden soll (*Start Time at*), die Zeiteinheit (*Hours/Days*) sowie eine Grenztiefe (*Threshold Depth*) angeben. (HEC, 2022f)

Zuletzt kann unten rechts in Abbildung 12-5 in der Spalte *Layer Name* ein individueller Name für den zu erstellenden Ergebnislayer eingegeben und die Karte über *Add Map* hinzugefügt werden. Über Rechtsklick auf eine Ergebnisdatei und Auswahl von *Manage Results Map Layers* wird dem Nutzer eine Übersicht aller Ergebnislayer dieser Simulation mit dem jeweiligen Speicherstatus gegeben. (HEC, 2022f)

Neue Ergebnislayer berechnen

Zudem besteht die Möglichkeit, weitere Ergebnislayer zu erzeugen, die anhand bereits bestehender Layer berechnet werden. Diese Option kann zum Beispiel verwendet werden, um verschiedene Simulationsergebnisse miteinander zu vergleichen. Hierzu wird per Rechtsklick auf einen beliebigen Ergebnislayer *Create a New Calculated Layer* ausgewählt. Es öffnet sich das in Abbildung 12-6 oben abgebildete Fenster. (HEC, 2022f)

Es kann zunächst ein vorprogrammiertes Skript ausgewählt werden (s. Abbildung 12-6 horizontale Markierung). Hierbei stehen die folgenden drei Varianten zur Verfügung: (HEC, 2022f)

- **Vergleiche Wasserspiegelhöhen** (englisch: *Compare WSE*): Es wird die Differenz zweier Wasserspiegelhöhen unterschiedlicher Ergebnislayer dargestellt.
- **Tiefe * Geschwindigkeit** (englisch: *Depth * Velocity*): Es wird das Produkt aus Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit beliebiger Ergebnislayer dargestellt.
- **Gefahr** (englisch: *Hazard*): Es wird die Gefahr für Anwohner abhängig von einer Einstufung des Produktes aus Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit beliebiger Ergebnislayer dargestellt.

Weiterhin kann an dieser Stelle die Option *User Defined* gewählt werden, um ein eigenes Skript zu erzeugen. Diese Variante bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten der individuellen Ergebnisdarstellung. Klickt der Nutzer auf die Fragezeichen-Schaltfläche oben rechts in Abbildung 12-6, öffnet sich ein Fenster mit einer Liste sowie Erklärungen zu den verfügbaren Operatoren und Funktionen. Das Schreiben des Skriptes geschieht direkt im großen Textfeld mittig in Abbildung 12-6 oben. (HEC, 2022f)

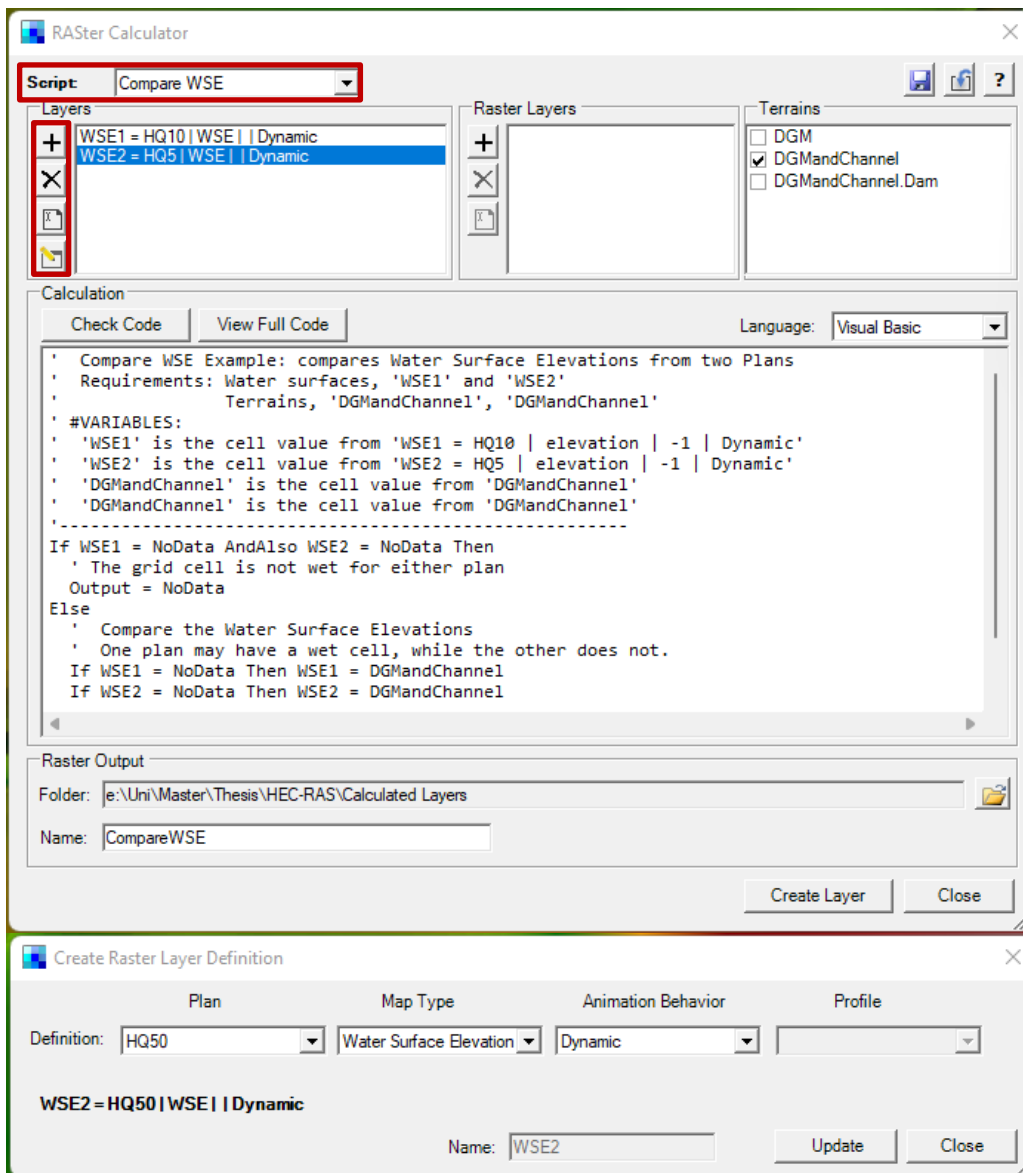


Abbildung 12-6: Eingabefenster zur Berechnung neuer Ergebniskarten im *RAS-Mapper*

Die Eingabelayer, welche für die Berechnungen verwendet werden sollen, können in den Bereichen *Layers* (für Ergebnislayer) und *Raster Layers* (für andere gespeicherte Raster Layer) gewählt werden (s. Abbildung 12-6 vertikale Markierung). Über die erste Schaltfläche kann eine Variable eines Layer hinzugefügt werden. Über die zweite Schaltfläche wird die markierte Variable gelöscht. Die dritte Schaltfläche ermöglicht das Umbenennen der markierten Variable. Über die letzte Schaltfläche öffnet sich das Fenster in Abbildung 12-6 unten. Hier kann die markierte Variable definiert werden. In der ersten Spalte kann der Nutzer die gewünschte Simulation auswählen und in der zweiten die gewünschte Variable dieser Simulation (also z. B. Fließtiefe oder Fließgeschwindigkeit). In der Spalte *Animation Behaviour* wird gewählt, ob die erzeugte Karte dynamisch (*Dynamic*) oder statisch (*Fixed Profile*) sein soll. Für Letzteres kann in der letzten Spalte der zu verwendende Zeitschritt gewählt werden. Im untersten Bereich von Abbildung 12-6 oben *Raster Output* wird schließlich der Speicherort sowie der Name des zu berechnenden Layers angegeben. (HEC, 2022f), (The RAS Solution, 2021a)

Mehrere Kartenwerte einblenden

Eine simplere Methode, um mehrere Ergebnisse miteinander zu vergleichen, steht im Reiter *Layer Values* unten links im *RAS-Mapper* zur Verfügung (s. Abbildung 12-7). Die zu vergleichenden Layer müssen zunächst ausgewählt und anschließend über die Plus-Schaltfläche der Liste hinzugefügt werden. Schwebt der Nutzer nun mit dem Mauszeiger über dem Kartenbereich, werden alle Werte für den aktuellen Punkt mit der jeweiligen *ID* des Layers eingeblendet (s. Abbildung 12-7). Die *IDs* der Layer können in der zugehörigen Zelle der Tabelle verändert werden. (HEC, 2022f)

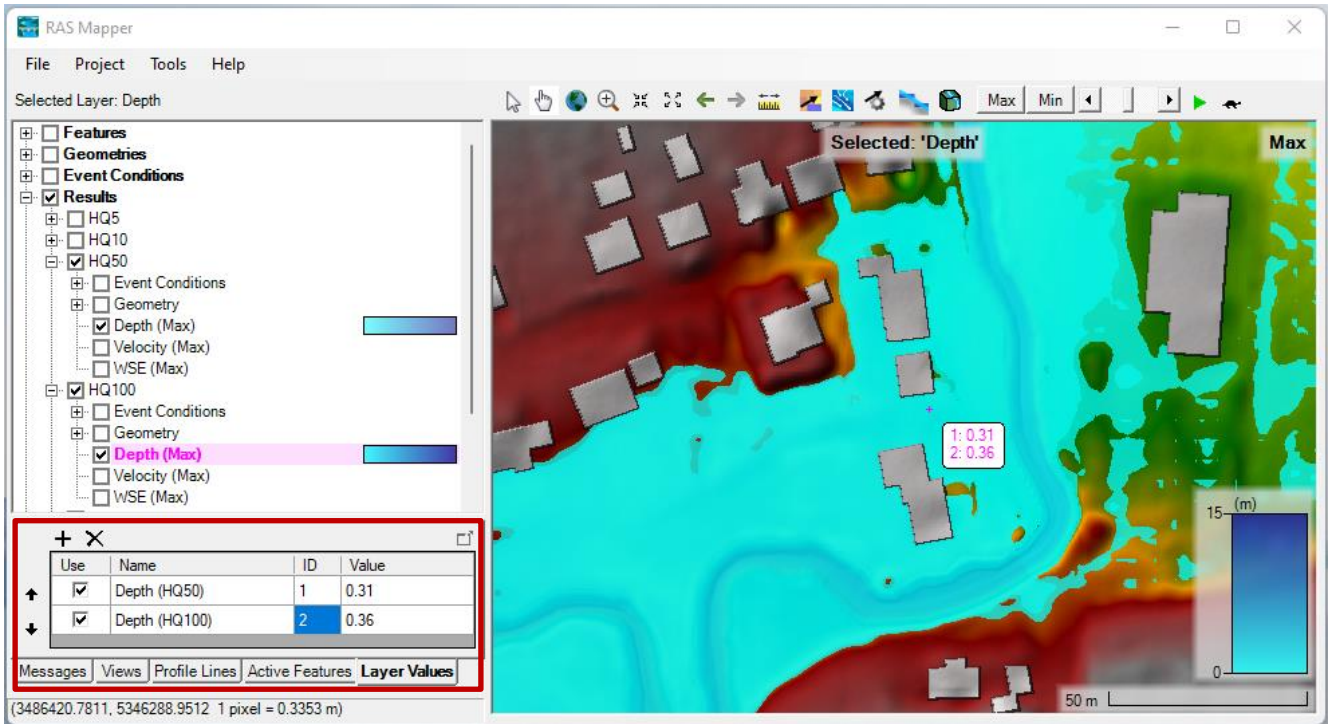


Abbildung 12-7: Einblenden mehrerer Werte verschiedener Simulationsergebnisse in *RAS-Mapper*

12.1.2 Ausgabemöglichkeiten an Querschnitten und Punkten

Tabellenwerte an interpolierten Punkten

Neben der Darstellung als Verteilungskarte können Simulationsergebnisse in HEC-RAS auch tabellarisch oder in Diagrammen abgebildet werden. Die einfachste Möglichkeit, dies zu erreichen, ist per Rechtsklick auf einen beliebigen Punkt im Kartenbereich vom *RAS-Mapper* und Auswahl von *Plot Time Series* im Bereich *All Enabled Results* (s. Abbildung 12-8). Es können nun Zeitreihen aller aktivierten Layer dargestellt werden. Im sich öffnenden Fenster kann zwischen der Darstellung als Diagramm (*Plot*) und als Tabelle (*Table*) gewählt werden. Sind in verschiedene Simulationsergebnissen Verteilungskarten desselben Parameters (z. B. *Depth*) aktiviert, werden diese gemeinsam in einem Diagramm abgebildet. Über diese Option werden interpolierte Werte angezeigt. (HEC, 2022f)

Tabellenwerte in Berechnungszellen

Weitere Zeitreihen können eingesehen werden, wird die *2D Flow Area* im Unterlayer *Geometry* des gewünschten Simulationsergebnisses eingeblendet. Wird hier über Rechtsklick auf eine beliebige Zelle die Option *Results Time Series* im Bereich *2D Area* ausgewählt, können Ergebniszeitreihen verschiedener Parameter dieser Zelle bzw. der gewählten Zellkante dargestellt werden (s. Abbildung 12-8). Bei dieser Methode werden nicht interpolierte Werte angezeigt, sondern die exakten Ergebnisse der jeweiligen

Zelle. Über die Option *Plot Property Tables* können weiterhin die Eigenschaftentabellen der gewählten Zelle eingesehen werden. (HEC, 2022f)

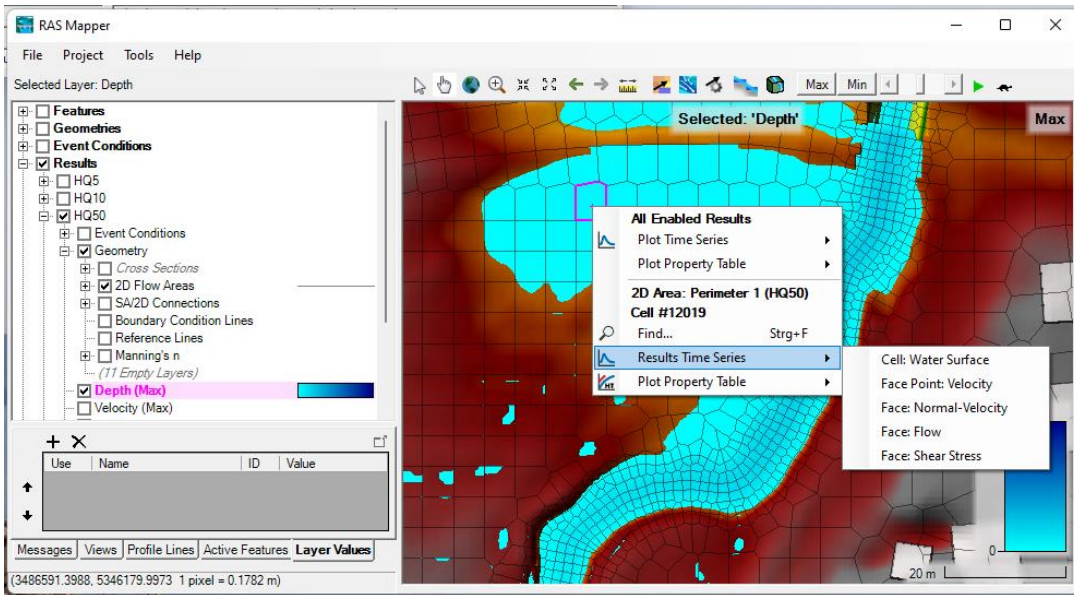


Abbildung 12-8: Tabellenwerte an beliebigen Kartenpunkten im *RAS-Mapper* abrufen

Tabellenwerte an Querschnitten

Die Darstellung von Simulationsergebnissen an Querschnitten erfolgt über den Unterlayer *Profile Lines* des Layers *Features*. Dieser ist über die Layerliste links im *RAS-Mapper* oder über den Reiter *Profile Lines* unten links im *RAS-Mapper* zu erreichen (s. Abbildung 12-9). Die Features können vor und nach einer Simulation erstellt werden. An den erstellten Linien werden die Simulationsergebnisse aus der *.hdf-Datei nachträglich ausgelesen. Hier besteht nun sowohl die Möglichkeit, Ganglinien (*Plot Time Series*) und 2D-Querschnitte (*Plot Profile*) darzustellen (s. Abbildung 12-9). Die Auswahl erscheint sowohl bei Rechtsklick auf das Feature in der Liste als auch im Kartenbereich. Bei beiden Varianten werden jeweils nur die Parameter zur Abbildung angeboten, deren Layer in der Liste aktiviert sind.

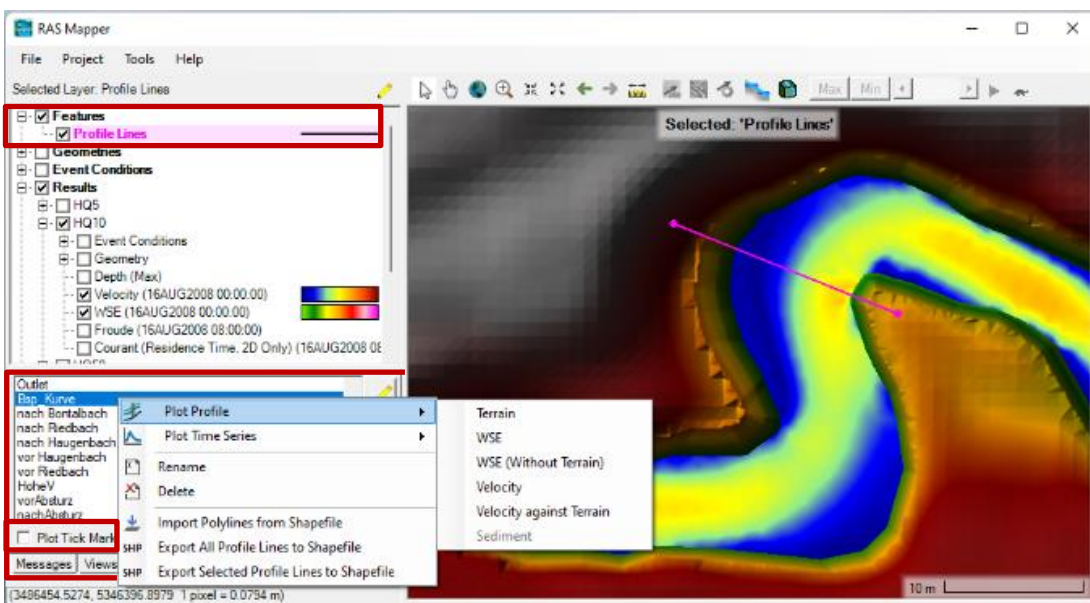


Abbildung 12-9: Darstellungsmöglichkeiten entlang *Profile Lines* im *RAS-Mapper*

Bei den Layern *WSE* und *Velocity* können die Werte im 2D-Querschnitt auch mit dem Geländeprofil gemeinsam dargestellt werden (Auswahl *WSE* bzw. *Velocity against Terrain*), (s. Abbildung 12-10 links oben und unten). Für eine bessere Orientierung entlang der *Station* eines Querschnittes kann *Plot Tick Marks* (s. Abbildung 12-9 unten links) aktiviert werden. Es werden nun Distanzmarkierungen entlang der Linie im Kartenbereich eingeblendet. Weiterhin ist der 2D-Querschnitt zeitlich dynamisch. Wird die Wiedergabe der dynamischen Karte aktiviert, aktualisiert sich das Diagramm automatisch mit und stellt immer den aktuellen Zeitschritt dar. (HEC, 2022f)

Die Option der Zeitreihen bietet die Ausgabe des Durchflusses gegen die Zeit (*Flow*), (s. Abbildung 12-10 rechts oben), des akkumulierten Wasservolumens gegen die Zeit (*Volume Accumulation*) sowie einer Wasserstand-Durchfluss-Beziehung (*Rating Curve*). Für eine positive Darstellung des Durchflusses müssen die Linien von links nach rechts in Fließrichtung schauend gezeichnet werden. (HEC, 2022f)

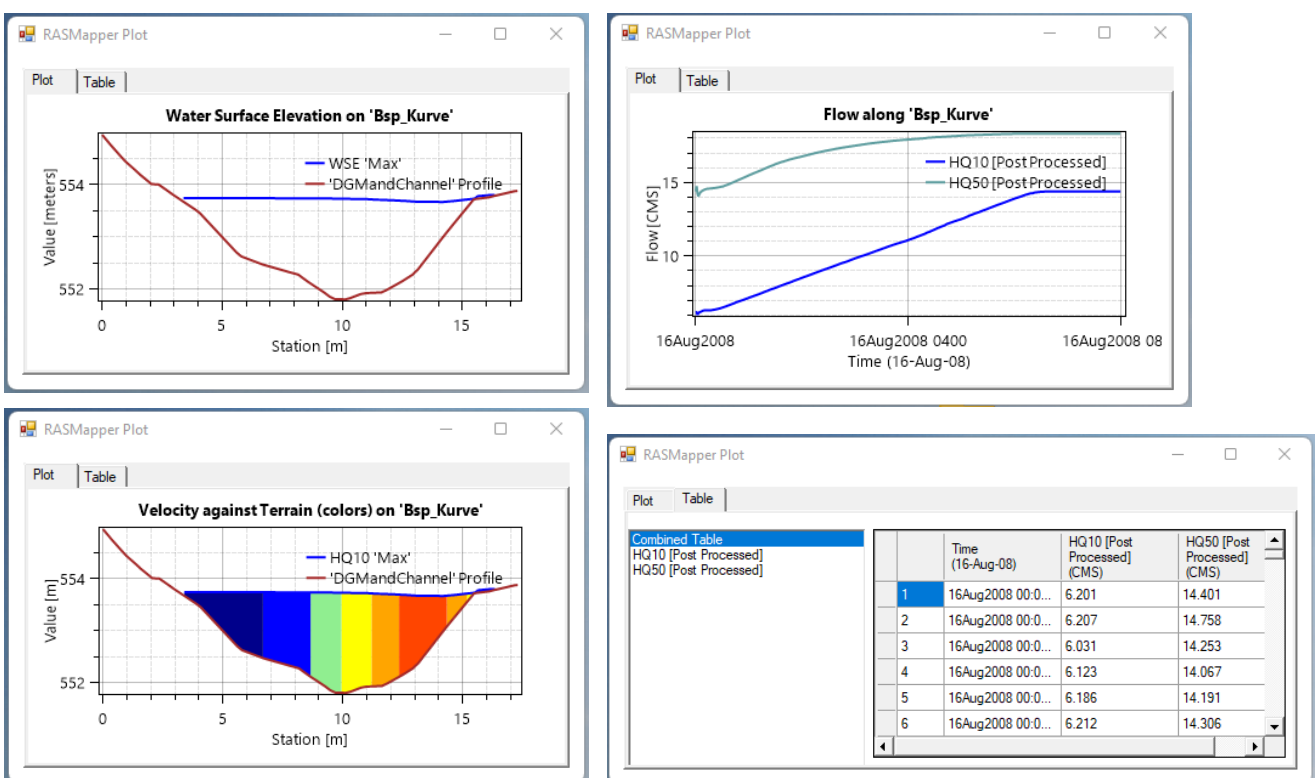


Abbildung 12-10: Mögliche Diagramm- und Tabellenausgaben an *Profile Lines* im *RAS-Mapper*

Sowohl *Plot Time Series* als auch *Plot Profile* kann als Tabelle sowie als Diagramm angezeigt werden und eine gemeinsame Darstellung mehrerer Simulationsergebnisse ist möglich, wenn die jeweiligen Layer aktiviert sind (s. Abbildung 12-10 rechts oben und unten).

12.2 3D-Ansicht

Zusätzlich zu den bereits vorgestellten Optionen der 2D-Ergebnisdarstellung ist ebenfalls jeweils eine 3D-Ansicht (englisch: *3D Viewer*) einer Simulation verfügbar. Die Verarbeitung des *3D Viewers* erfordert jedoch viel Arbeitsspeicher, weshalb Nutzer darauf achten sollten, diese Ansicht nur zu verwenden, wenn mindestens 16 GB RAM zur Verfügung stehen sowie weitere Anwendungen zu schließen, die im

Hintergrund laufen und ebenfalls viel Arbeitsspeicher beanspruchen. Die 3D-Ansicht kann entweder im HEC-RAS Hauptfenster über die in Abbildung 12-11 markierte Schaltfläche geöffnet werden, sowie über die gleiche Schaltfläche in der Werkzeugleiste im *RAS-Mapper* oder per Rechtsklick auf ein Simulationsergebnis im *RAS-Mapper* und Auswahl von *View Results in 3D* (HEC, 2022e). Beim Öffnen über das Hauptfenster wird die Simulation geöffnet, die dort aktuell gelistet ist (s. Abbildung 12-11), beim Öffnen über den RAS-Mapper kann der Nutzer nach Betätigung der Schaltfläche die gewünschte Simulation auswählen. Die Ergebnisse müssen anschließend zunächst vorverarbeitet werden, was einige Zeit in Anspruch nehmen kann.

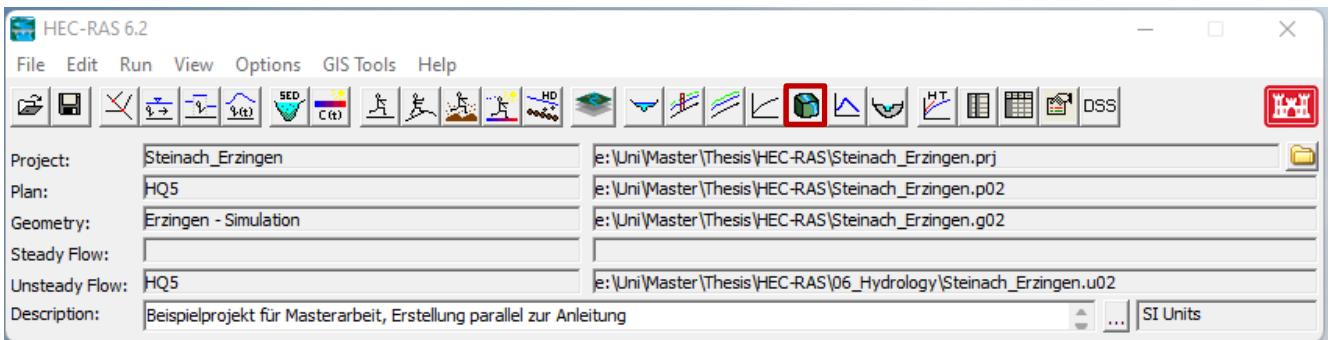


Abbildung 12-11: 3D Viewer Schaltfläche im Hauptfenster von HEC-RAS

Ist das Vorverarbeiten abgeschlossen, öffnet sich der *3D Viewer*, der in Abbildung 12-12 zu sehen ist. Über Drehen des Mausekzes kann die Zoomstufe der Karte verändert werden. Über Drücken des Mausekzes kann der Kartenausschnitt verschoben werden. Mittels gedrückte Halten der rechten Maustaste kann der horizontale und vertikale Winkel verändert werden.

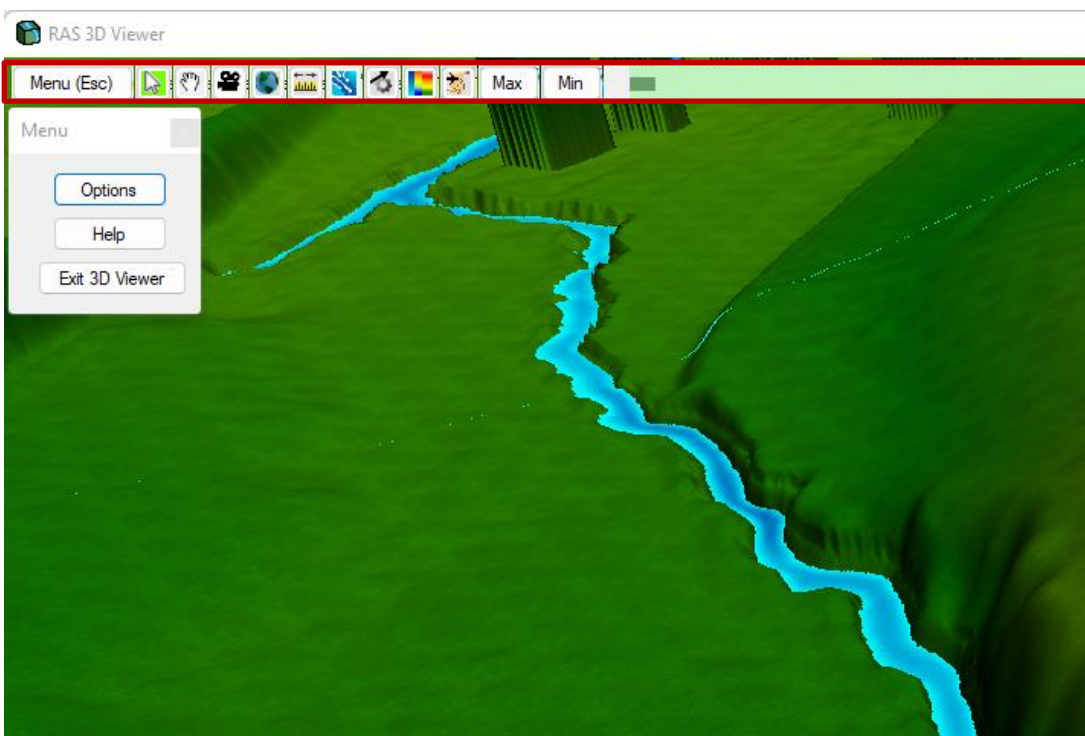






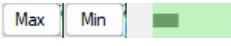


Abbildung 12-12: Ausschnitt des 3D Viewers

12.2.1 Werkzeugleiste

Oben links im *3D Viewer* wird eine Werkzeugleiste eingeblendet (s. Abbildung 12-12), deren wichtigste Schaltflächen im Folgenden kurz erläutert werden. Einige der Optionen sind noch nicht implementiert, weshalb auf diese hier nicht eingegangen wird. Eine ausführliche Auflistung aller Schaltflächen im *3D Viewer* sind im „HEC-RAS 2D User's Manual“ zu finden. (HEC, 2022e, pp. 229-230)

- *Menu (Esc)*:
 - *Options*: Im Bereich *General* können die Legenden der Karten angepasst werden. Der Bereich *Graphics* bietet Qualitätsanpassungen der Darstellung. In *Controls* wird die Steuerung der Karte angepasst. Im letzten Bereich *Particle Tracing* sind Optionen zu Bahnlinien zu finden. Detaillierte Beschreibungen der Optionen sind im „HEC-RAS 2D User's Manual“ zu finden. (HEC, 2022e, pp. 227-229)
 - *Exit 3D Viewer*: Schließen des 3D-Ansicht Fensters.
-  Die Kartensteuerung erfolgt wie oben beschrieben. Beim Schweben des Mauszeigers über der Karte wird die Geländehöhe bzw. der Ergebniswert der eingeblendeten Karte angezeigt.
-  Der Kartenausschnitt kann mit gedrückter linken Maustaste bewegt werden.
-  Der Kartenausschnitt wird auf das gesamte Geländemodell herausgezoomt und der Blickwinkel auf vertikal nach unten zurückgestellt.
-  Bahnlinien werden aktiviert.
-  Verändert die dargestellte Karte zwischen:
 - Realistische Karte mit Unregelmäßigkeiten an der Wasseroberfläche
 - Wassertiefe
 - Fließgeschwindigkeit
 - Höhe der Wasseroberfläche
-  Öffnet die Optionen zur Wahl einer Flugroute (englisch: *Flight Plan*), (s. Abschnitt 12.2.2).
-  Das Bedienfeld zur Wahl des Zeitschrittes der Simulationsergebnisse ist analog zu dem im *RAS-Mapper* zu verwenden.
(HEC, 2022e)

Zusätzlich wird oben rechts im Kartenbereich eine kleine Übersichtskarte des gesamten Geländes eingeblendet, die die Position und Blickrichtung des aktuellen Kartenausschnittes enthält (HEC, 2022e).

12.2.2 Flugroute zum Überfliegen der 3D-Karte

Um ein automatisches Überfliegen der 3D-Karte zu ermöglichen, muss zuvor eine Flugroute im *RAS-Mapper* gezeichnet werden. Dazu wird per Rechtsklick auf Features und Auswahl von *Create New Layer - Flightpath Layer* ein neuer Layer erstellt. In diesem können anschließend Linien zur Definition von Flugrouten gezeichnet werden, die nach Auswahl der *Flight Plan* Schaltfläche im *3D Viewer* zur Verfügung stehen. Zurück im *3D Viewer* öffnet sich zunächst ein Fenster, in dem die gewünschte Flugroute gewählt werden kann. Zudem kann unter *Pitch (Degrees)* der Blickwinkel während der Überfliegung angegeben werden. Weiterhin kann zwischen den Optionen die Blickrichtung während des *Flight Plans* beliebig ändern zu können (*Allow free look*) und einer geraden Blickrichtung (*Always look forward*) gewählt werden. Zuletzt kann der Nutzer entscheiden, ob die Überfliegung vom ersten oder letzten Punkt der gewählten Linie beginnen soll (*Start from the first/last point in polyline*). Wird das

Fenster geschlossen und die Überfliegung gestartet, wird eine zusätzliche Werkzeugleiste eingeblendet (s. Abbildung 12-13).

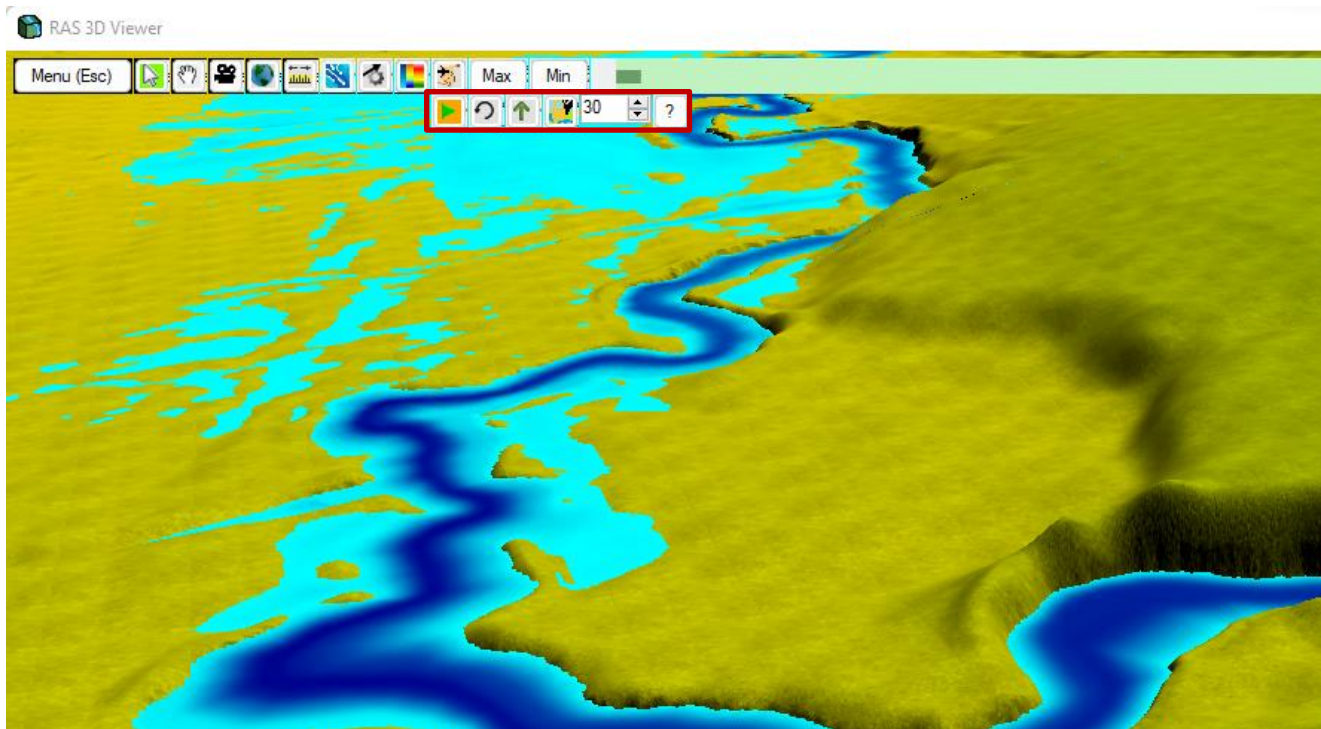


Abbildung 12-13: Optionen zum Überfliegen der Karte im *3D Viewer*

Mit der ersten Schaltfläche kann die Überfliegung der Karte pausiert und fortgesetzt werden. Die zweite Schaltfläche wiederholt die Überfliegung. Eine Umkehr der Flugroute ist über die dritte Schaltfläche möglich. Die vierte Schaltfläche verändert die zuvor getroffene Einstellung zur festen bzw. variablen Blickrichtung. Im Textfeld kann der Blickwinkel angepasst werden. Während der Überfliegung kann die Zoomstufe jederzeit verändert werden.

12.3 Ganglinien und Kennlinien an Bauwerken

Zuletzt können im HEC-RAS Hauptfenster tabellarische Ergebnisse an Bauwerken und anderen 1D-Objekten abgerufen werden. Die dazu notwendige Schaltfläche ist in Abbildung 12-14 markiert.

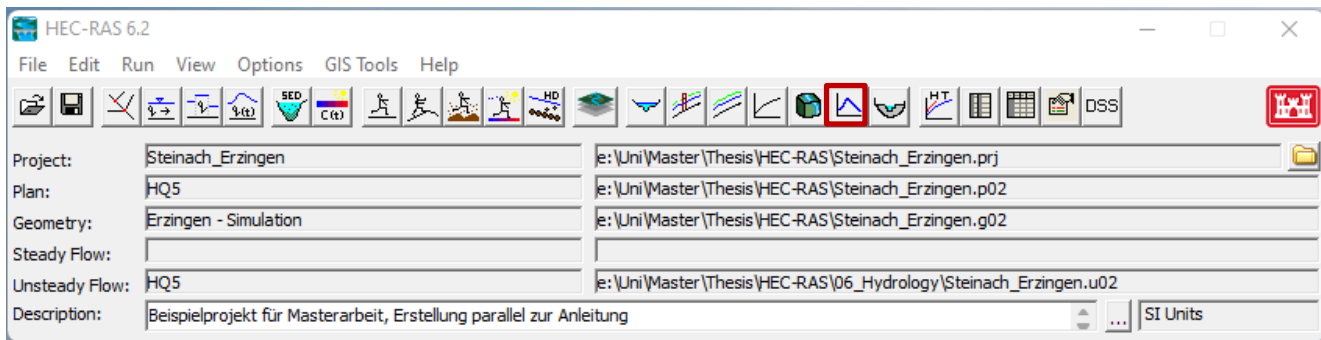


Abbildung 12-14: *Stage and Flow Hydrograph* Schaltfläche im Hauptfenster von HEC-RAS

In der Dropdown Liste (s. Abbildung 12-15 oben) kann nun die 1D-Verbindung gewählt werden, die dargestellt werden soll. Die darunterliegenden Reiter bieten die Wahl zwischen der Darstellung einer *Time Series* (Wasserstand-Zeit-Beziehung) oder einer *Rating Curve* (Wasserstand-Durchfluss-Beziehung). Im rechten Bereich des Fensters (s. Abbildung 12-15) kann der Nutzer zwischen Abbildung als Diagramm oder Tabelle wählen und die gelisteten Datenreihen (de-)aktivieren. Hierbei können die Wasserstände im Ober- und Unterstrom (*Stage HW (Headwater)* bzw. *TW (Tailwater)*), der Durchfluss durch ein Bauwerk (*Total Culvert Flow*), der Durchfluss über das Bauwerk hinweg (*Weir Flow*) sowie die Summe der beiden Durchflüsse (*Total Flow*) abgebildet werden.

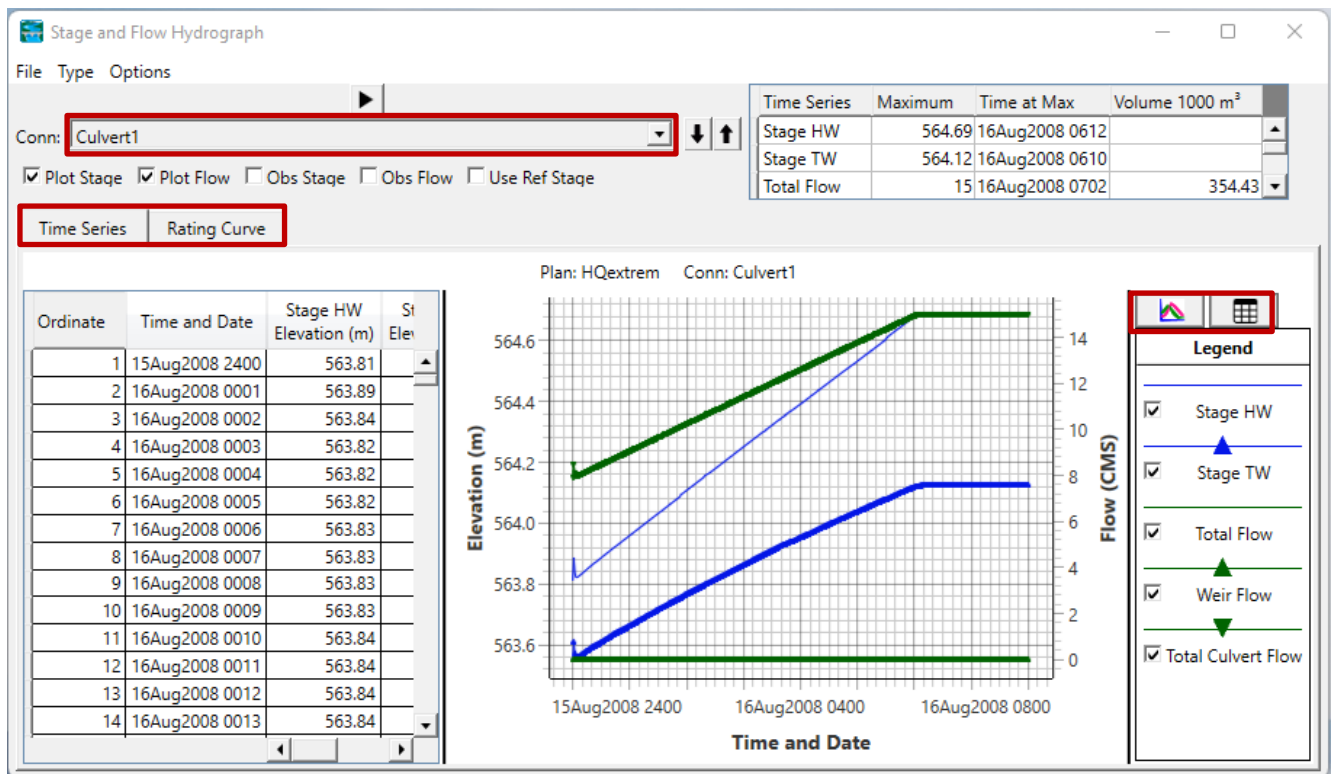


Abbildung 12-15: Ganglinien an 1D-Elementen als Ergebnisausgabe

Die Daten der Bauwerke werden abgerufen, ist im Reiter *Type* des Fensters aus Abbildung 12-15 *SA/2D Connections* ausgewählt. Wird stattdessen *SA/2D Flow Area – BC Lines* ausgewählt, können die Ganglinien entlang der Randbedingungsline eingesehen werden. Weiterhin können *Time Series* und *Rating Curves* an beliebigen, vor der Simulation definierten Profilen im Untersuchungsgebiet abgerufen werden, wird die Option *Reference Lines* gewählt. Diese Linien können im *RAS-Mapper* im *Geometry* Unterlayer *Reference Lines* gezeichnet werden. Über den Reiter *Options – Plans* kann zwischen den verschiedenen Simulationen gewählt werden.

13 Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und Validierung

Die drei Prozesse der Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und Validierung erfolgen nach erfolgreichem Aufbau eines Modells. Sie sollen dafür sorgen, dass das Modell die Realität, bzw. den Teil der Realität, den es abbilden soll, ausreichend präzise darstellen kann (Habersack, et al., 2007).

13.1 Kalibrierung

Bei der Kalibrierung werden die Modellergebnisse mit einem Satz von Messdaten verglichen und gegebenenfalls die zu Beginn geschätzten Parameter verändert, um eine bessere Übereinstimmung mit den Daten und somit mit der Realität zu erreichen. Für den Fall eines 2D-HN-Modells sollten Ganglinien, also eine Beziehung zwischen Wasserstand und Durchfluss in einer ausreichenden Bandbreite, sowie Überflutungsflächen eines Hochwasserereignisses vorliegen. Zudem sind für die Kalibrierung bestimmter Parameter auch Geschwindigkeitsmessungen notwendig. Die für die Kalibrierung verwendeten Parameter sollten innerhalb einer realistischen Bandbreite angepasst werden. (Habersack, et al., 2007)

Folgende Parameter sollten bei der Kalibrierung eines 2D-Modells in HEC-RAS berücksichtigt werden:

- Manning's-n-Werte
- Wehrkoeffizienten und Ein-/Austrittsverlustbeiwerte bei Durchlässen (mithilfe von Wasserstand-Durchfluss-Beziehungen)
- Bei Verwendung eines Turbulenzmodelles: Longitudinaler und transversaler Mischungskoeffizient und Smagorinsky-Koeffizient (mithilfe von Geschwindigkeitsmessungen) (HEC, 2022e), (Habersack, et al., 2007)

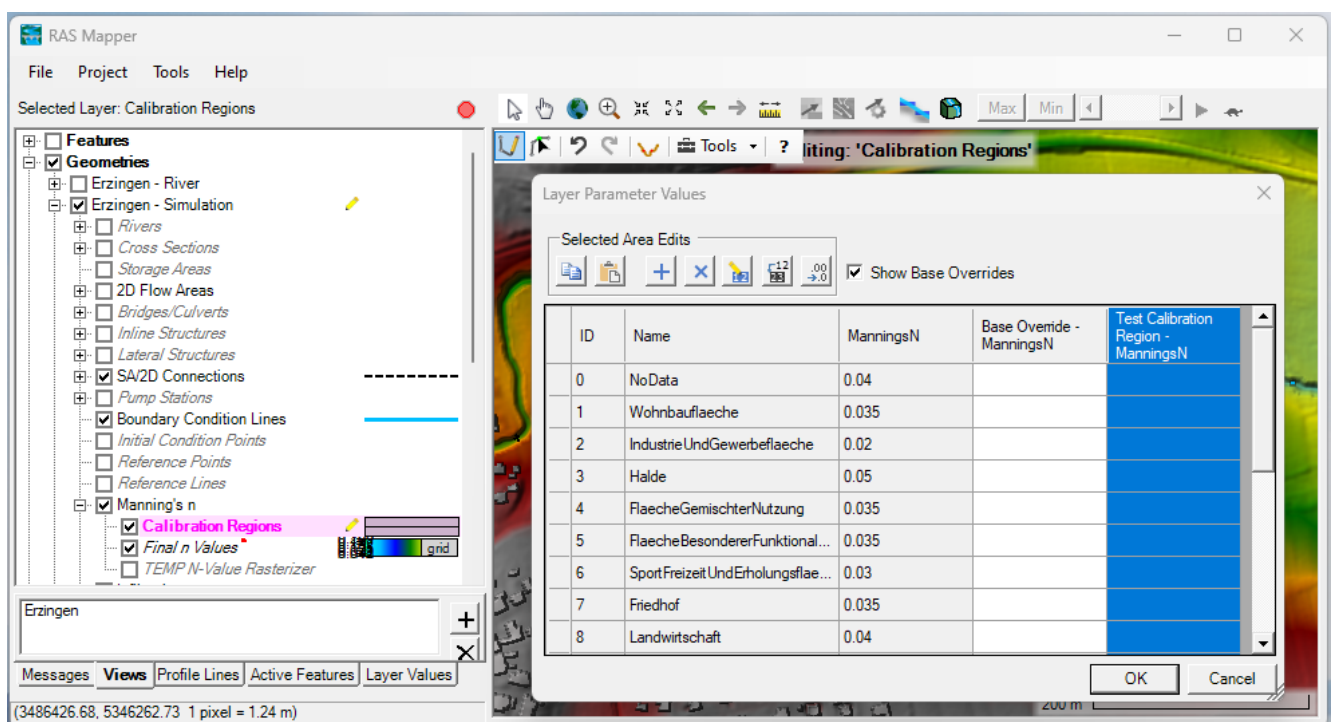


Abbildung 13-1: Kalibrierungsregionen des n-Wertes nach Manning im *RAS-Mapper*

Für ein 2D-Untersuchungsgebiet in HEC-RAS ist der Rauheitsbeiwert n nach Manning die wichtigste Stellschraube für die Kalibrierung. Hierzu kann im *RAS-Mapper* der Geometrie Unterlayer *Manning's n* verwendet werden, der die im *Map Layers* Unterlayer *Land Cover* (s. Abschnitt 5.3) definierten n -Werte gesammelt darstellt. Nach Aktivieren des Bearbeitungsmodus wird per Rechtsklick und Auswahl von *Edit Manning's n Values* eine Tabelle geöffnet (s. Abbildung 13-1). Dort können durch Eintragen von Werten in der Spalte *Base Override – ManningsN* die zuvor festgelegten Werte zur Kalibrierungszwecken überschrieben werden. Soll nur ein Teil des Untersuchungsgebietes kalibriert werden, kann im Bearbeitungsmodus des Layers *Calibration Regions* ein oder mehrere Polygone gezeichnet werden, innerhalb derer die n -Werte überschrieben werden sollen. Wird ein solches Polygon hinzugefügt, taucht eine zusätzliche Spalte in der Tabelle auf (s. Abbildung 13-1 *Test Calibration Region – ManningsN*). Priorität haben immer die Werte in der Spalte, die am weitesten rechts stehen. In mehreren Simulationsläufen können nun unterschiedliche n -Werte angegeben werden. Dabei sollten die Simulationen so benannt werden, dass eine eindeutige Zuordnung möglich ist. Anschließend können die Durchflüsse und Wasserstände der Kalibrierungsläufe als Tabelle oder Diagramm im *RAS-Mapper* eingesehen und verglichen werden (s. Abschnitt 12.1.2 „Tabellenwerte an Querschnitten“) (The RAS Solution, 2021c).

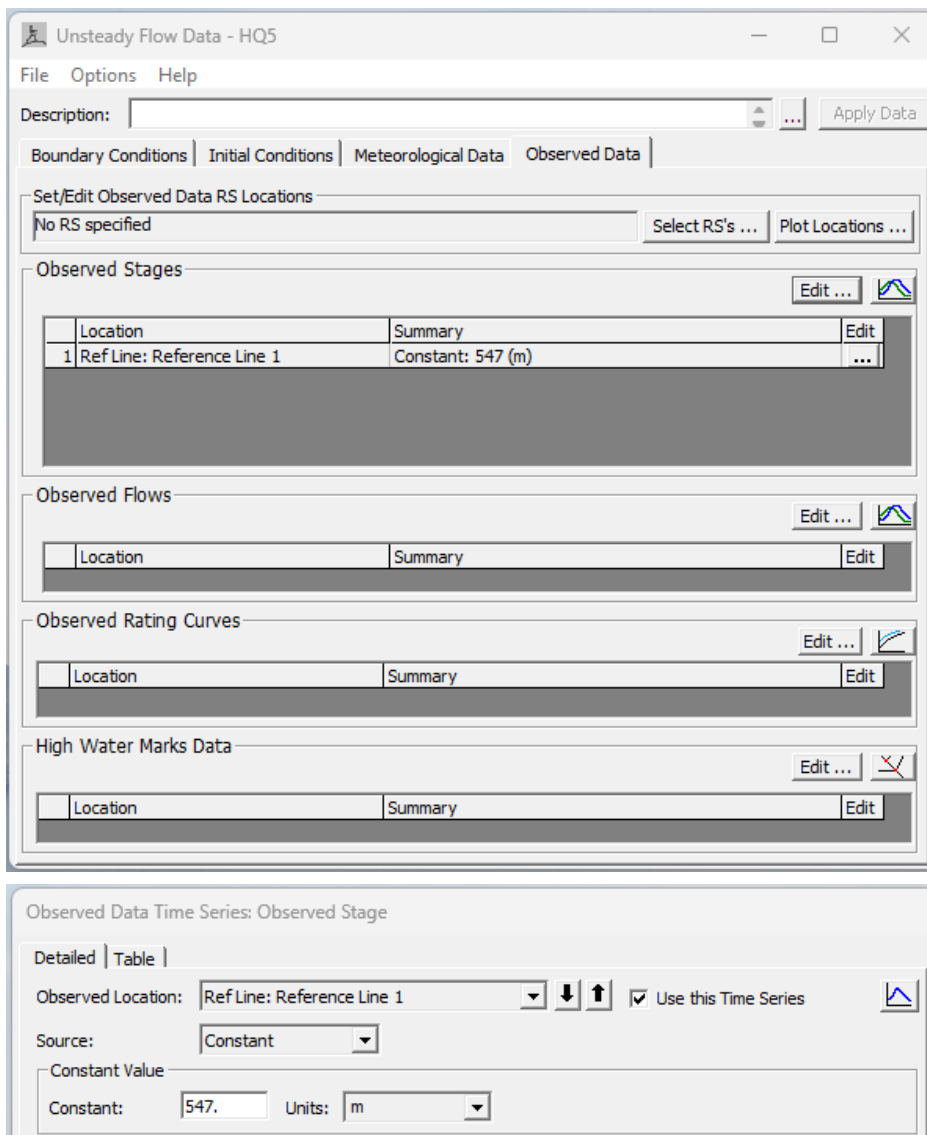


Abbildung 13-2: Eingabemöglichkeiten von Messwerten zum Vergleich mit Simulationsergebnissen

Zudem besteht die Möglichkeit, die Vergleichsdaten direkt in HEC-RAS einzugeben und mit Simulationsergebnissen zu vergleichen. Hierzu müssen die Querschnitte, an denen die Daten vorliegen, im *RAS-Mapper* im *Geometry* Unterlayer *Reference Lines* gezeichnet oder importiert werden. Anschließend wird in das *Unsteady Flow Data* Fenster gewechselt und der Reiter *Observed Data* ausgewählt (s. Abbildung 13-2 oben). Je nachdem welche Art von Messungen vorliegen, wird die Schaltfläche *Edit* der angebotenen Optionen Wasserstand (*Observed Stage*), Durchfluss (*Observed Flow*), Wasserstand-Abfluss-Beziehung (*Observed Rating Curves*) oder Hochwassermarken (*High Water Marks Data*) gewählt. Im neuen Fenster (s. Abbildung 13-2 unten) kann der Nutzer in der ersten Dropdown Liste den gewünschten Querschnitt auswählen und im zweiten angeben, ob die Daten als Konstante (*Constant*) oder als Ganglinie (*Table*) vorliegen. Anschließend können die Kalibrierungsdaten eingegeben und die Simulation gestartet werden.

Die Darstellung der Modellergebnisse im Vergleich zu den Messungen kann im *Stage and Flow Hydrograph* Fenster, wie in Abschnitt 12.3 beschrieben, abgerufen werden. Dazu muss im Reiter *Type* die Option *Reference Lines* gewählt und die gewünschte Linie selektiert werden. Die Kalibrierungsdaten werden eingeblendet, ist unterhalb des Dropdown Menüs die entsprechende Datenreihe mit einem Haken aktiviert (*Obs Stage, Obs Flow, Use Ref Stage*). Weitere Simulationsergebnisse mit veränderten Kalibrierungsparametern können zum Vergleich über den Reiter *Options – Plans* sowie anschließendem Aktivieren des abzubildenden *Plans* zusätzlich im Diagramm mit dargestellt werden.

13.2 Sensitivitätsanalyse

Bei der Sensitivitätsanalyse wird überprüft, wie sensibel die Simulationsergebnisse auf Veränderungen der bei der Kalibrierung betrachteten Parameter reagieren. Da dieselben Parameter wie bei der Kalibrierung verwendet werden, ist das Vorgehen identisch. Die Variation der Parameter sollte in einer realistischen Bandbreite erfolgen. Die Sensitivitätsanalyse ist für den Prozess der Kalibrierung von Bedeutung, da sich die Parameter herauskristallisieren, auf die das Modell mit großen Veränderungen reagiert. Diese müssen daher besonders sorgfältig kalibriert werden. Durch die Sensitivitätsanalyse wird außerdem die Aussagekraft des Modells eingeschätzt. Wird das Modell infolge einer Variantenstudie verändert oder werden Durchflüsse simuliert, die nicht kalibriert wurden, können die Ergebnisse an Genauigkeit einbüßen, wenn das Modell sehr sensibel auf Veränderungen reagiert. Teil der Sensitivitätsanalyse sollte auch sein, die Auswirkungen der Variation von Zellgröße, Zeitschritt und Randbedingungen zu überprüfen. (Habersack, et al., 2007)

13.3 Validierung

Die Validierung ist das Vergleichen des kalibrierten Modells mit einem neuen, zuvor noch nicht verwendeten Datensatz an Messdaten. Liefert das Modell mit den Randbedingungen des neuen Datensatzes dieselben Simulationsergebnisse wie der Datensatz an Messdaten, innerhalb der gesetzten Qualitätsanforderungen, ist es in den Bereichen der Daten von Kalibrierung und Validierung gültig. Werden die gewünschten Ergebnisse nicht erzielt, muss die Kalibrierung verbessert werden, bzw. auf nicht berücksichtigte Parameter geprüft werden. (Habersack, et al., 2007)

14 Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass HEC-RAS ein ausgereiftes hydraulisches Simulationsprogramm ist, welches die komplexe Modellierung einer Vielzahl an Komponenten, wie etwa Wasserbauwerke oder Geländemodifikationen, zulässt. Durch den kostenlosen Zugang ist HEC-RAS insbesondere für Einsteiger in die hydraulische Modellierung attraktiv. Durch die Vorteile der freien Verfügbarkeit, kann ohne finanziellen Aufwand ein großer Umfang an Modellierungserfahrung erworben werden, was das Programm hervorragend für Studium und Lehre eignet. Darüber hinaus kann es jedoch ebenso für die kommerzielle Anwendung verwendet werden, da unterschiedliche Interessengruppen eines Projektes die Möglichkeit haben, ein HEC-RAS Modell sowie Simulationsergebnisse im vollen Umfang über dasselbe Programm abrufen und nutzen zu können. Weiterhin bringt die kostenlose Verfügbarkeit einen großen Nutzerkreis mit sich, wodurch eine Vielzahl an Fragen, zugehörigen Problemlösungsstrategien und Anleitungen im Internet zu finden sind, zusätzlich zu den ohnehin schon umfangreichen Anleitungen durch HEC selbst. Zudem bringen die stetigen Neuerungen der Versionen eine mittlerweile herausragende Benutzeroberfläche mit sich. Durch Tools wie den *RAS-Mapper* oder den *3D Viewer* ist eine besonders umfangreiche Ergebnisvisualisierung ohne ein zusätzliches Programm möglich. Des Weiteren stellt die ansprechende Benutzeroberfläche besonders für Einsteiger eine geringe Hürde dar und ermöglicht einen angenehmen Arbeitsablauf.

Andererseits steigt insbesondere mit zunehmender Komplexität eines HEC-RAS Modells die Gefahr von Fehlermeldungen. Insbesondere bei einer gesteigerten Anzahl von 1D/2D-Verknüpfungen sowie bei der Implementierung von Sediment treten vermehrt Fehler auf. Nicht in allen Fällen sind diese durch den Nutzer nachvollziehbar oder lösbar. In diesen Fällen ist jedoch meist eine Problemumgehung möglich, auch wenn diese nicht zwangsweise die gewünschte Modellierung darstellt.

Daher wäre es in zukünftigen Versionen von HEC-RAS wünschenswert, wenn Fehlermeldungen eine benutzerfreundlichere Form annehmen würden. Eine Vielzahl an Fehlern insbesondere an 1D-Elementen sind bereits gut nachvollziehbar formuliert, sodass der Nutzer in der Lage ist, diese zu lösen. Darüber hinaus existiert jedoch ein großer Umfang an unverständlichen Fehlermeldungen, deren Ursprung oft nur unter großen Mühen erahnt werden kann und die daher leider häufig ungelöst bleiben.

Des Weiteren wäre in zukünftigen Versionen ein nahtloseres Einbetten eines individuellen, auf Vermessungen beruhenden Gewässerlaufes ins Geländemodell angebracht (s. Abschnitt 6.2.1). Die dafür notwendige Funktion existiert bereits bei der linienhaften Geländemodifikation in Form der Modifikationsmethode *Lower (Terrain/User) Value* (s. Abschnitt 6.2.2). Hierbei wird an den Rändern der Modifikation erst dann die Höhe des umliegenden Geländes anstelle der Modifikation verwendet, wenn diese einen höheren Wert aufweist. Dadurch entsteht ein glatterer Übergang als bei dem aktuell zur Verfügung stehenden, simplen Zusammenfügen mehrerer Geländemodelle, bei dem im Übergangsbereich auch mit aufwändigem, manuellem Nacharbeiten eine Kante entstehen kann.

Aufgrund hochfrequenter Updateveröffentlichungen mit Programmverbesserungen sowie Erweiterungen wird HEC-RAS auch in Zukunft eine relevante Software im Bereich der hydraulischen Modellierung bleiben und es kann erwartungsvoll auf die nächsten Neuerungen im Funktionspaket geblickt werden.

Literaturverzeichnis

- BfG, 2022. *Geoportal der Bundesanstalt für Gewässerkunde: Hydrologischer Atlas Deutschland*. [Online]
URL: <https://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/HAD/index.html?lang=de>
[Zugriff am 25 August 2022].
- Blasy, D. & Øverland, D., 2012. *Hochwassergefahrenkarten Baden Württemberg - Los 401 - Aktualisierung Eyacheinzugsgebiet*, Eching am Ammersee: Beratende Ingenieure GmbH & Co. KG.
- Bollrich, G., 2013. *Technische Hydromechanik 1 - Grundlagen*. Berlin; Wien; Zürich: Beuth.
- Brownlie, W. R., 1981. *Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels*, Pasadena, California: W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, Division of Engineering and Applied Science, California Institute of Technology.
- Butler, H., Schmidt, C., Springmeyer, D. & Livni, J., 2013. *Spatial Reference*. [Online]
URL: <https://spatialreference.org/>
[Zugriff am 18 Juli 2022].
- de Lange, N., 2013. *Geoinformatik - in Theorie und Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- DIN 18123, 2012. *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung*, Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V..
- DIN EN ISO 14688-1, 2017. *Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung*, Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V..
- Düwel, O., Siebner, C., Utermann, J. & Krone, F., 2007. *Bodenarten der Böden Deutschlands*, s.l.: FISBo BGR.
- Ferziger, J. H., Perić, M. & Street, R. L., 2020. *Numerische Strömungsmechanik*. Berlin: Springer Vieweg.
- Ghaib, K., 2019. *essentials: Einführung in die numerische Strömungsmechanik*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Goodell, C., 2011. *The RAS Solution - The place for HEC-RAS modelers: Overflow Gates*. [Online]
Available at: <https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/overflow-gates/>
[Zugriff am 13 September 2022].
- Goodell, C., 2016. *The RAS Solution - The place for HEC-RAS modelers: Weir Equations in HEC-RAS*. [Online]
URL: <https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/weir-equations-in-hec-ras/>
[Zugriff am 08 September 2022].
- Habersack, H. et al., 2007. *Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Hydrodynamik, Grundlagen, Anwendung und Modelle für die Praxis*. Wien: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband.
- HEC RAS, 2021a. *YouTube: HEC-RAS 2D Class: 4.3 - 2D Bridge Hydraulics*. [Online]
URL: https://www.youtube.com/watch?v=6qIL3U7gJlo&t=968s&ab_channel=HECRAS
[Zugriff am 15 September 2022].
- HEC RAS, 2021b. *YouTube: HEC-RAS 2D Class: 2.10 - Advanced Computation Options*. [Online]
URL: https://www.youtube.com/watch?v=nEr87YpHnzA&ab_channel=HECRAS
[Zugriff am 7 Oktober 2022].

-
- HEC RAS, 2022a. *YouTube: Spatial Precipitation and Infiltration*. [Online]
URL: https://www.youtube.com/watch?v=tje7q0djHWc&t=396s&ab_channel=HECRAS
[Zugriff am 26 August 2022].
- HEC RAS, 2022b. *YouTube: Hydraulic Best Practices For HEC-RAS 2D Sediment Modeling*. [Online]
URL: https://www.youtube.com/watch?v=up_89fs4lWM&ab_channel=HECRAS
[Zugriff am 28 November 2022].
- HEC, 2020a. *HEC-RAS Two-Dimensional Sediment Transport User's Manual*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers.
- HEC, 2020b. *HEC-RAS 2D Sediment Transport Technical Reference Manual*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers.
- HEC, 2022a. *US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center: About - History*. [Online]
URL: <https://www.hec.usace.army.mil/about/history.aspx>
[Zugriff am 22 August 2022].
- HEC, 2022b. *US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center: Software - HEC-RAS*. [Online]
URL: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>
[Zugriff am 19 Juli 2022].
- HEC, 2022c. *US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center: HEC-RAS Documentations*. [Online]
URL: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs>
[Zugriff am 21 Juli 2022].
- HEC, 2022d. *HEC-RAS - River Analysis Systems - HEC-RAS User's Manual - Version 6.2*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers.
- HEC, 2022e. *HEC-RAS - River Analysis Systems - HEC-RAS 2D User's Manual - Version 6.2*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers.
- HEC, 2022f. *HEC-RAS - River Analysis Systems - HEC-RAS Mapper User's Manual - Version 6.2*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers.
- HEC, 2022g. *HEC-RAS - River Analysis Systems - HEC-RAS Hydraulic Reference Manual - Version 6.2*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers.
- HEC, 2022h. *HEC-RAS - River Analysis Systems - HEC-RAS 2D User's Manual - Version 6.3*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers.
- HEC, 2022i. *HEC-RAS Release Notes*, Davis, CA: US Army Corps of Engineers.
- HEC, o. J.. *HEC-RAS 1D Sediment Transport*, Davis, CA: US Army Corps of Engineers.
- HLNUG, 2022. *Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie*. [Online]
URL: <https://www.hlnug.de/static/pegel/wiskiweb2/>
[Zugriff am 21 Juli 2022].
- HVBG, 2022. *Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation: Downloadcenter*. [Online]
URL: https://gds.hessen.de/INTERSHOP/web/WFS/HLBG-Geodaten-Site/de_DE/-/EUR/ViewDownloadcenter-Start;pgid=NIZSrnc17gBSRpNPt1AR16YC0000Cg1gI_Np
[Zugriff am 21 Juli 2022].
- Hydrologic Engineering Center, 2021. *YouTube: HEC RAS Intro 2D Sediment Tutorial*. [Online]
URL: https://www.youtube.com/watch?v=-6X4RIHatfM&ab_channel=HydrologicEngineeringCenter
[Zugriff am 13 Oktober 2022].

-
- IPCC, 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Summary for Policymakers*, s.l.: The Intergovernmental Panel on Climate Change.
- KLIWA, 2019. *Starkniederschläge: Entwicklungen in Vergangenheit und Zukunft – Kurzbericht –*, s.l.: Kooperationsvorhabens KLIWA – Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft.
- Lattermann, E., 2005. *Wasserbau Praxis Mit Berechnungsbeispielen - Band 1: Gewässerkunde, Flussbau, Stauanlagen, Wasserkraftwerke*. Berlin: Bauwerk Verlag.
- Laurien, E. & Oertel jr., H., 2018. *Numerische Strömungsmechanik - Grundgleichungen und Modelle - Lösungsmethoden - Qualität und Genauigkeit*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- LUBW, 2022. *Daten- und Kartendienst der LUBW: Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) in Baden-Württemberg - Gewässertypen (Kap.1)*. [Online]
URL: <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/projekte/pages/home/welcome.xhtml>
[Zugriff am 21 Oktober 2022].
- Maeder, C., 2015. *Civil GEO: The Road to HEC-RAS*. [Online]
URL: <https://www.civilgeo.com/blog/the-road-to-hec-ras/>
[Zugriff am 22 August 2022].
- Mandlbürger, G. et al., 2009. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft - Topographische Daten aus Laserscanning als Grundlage für Hydrologie und Wasserwirtschaft*, Wien: Springer-Verlag.
- Martin, H., 2011. *Numerische Strömungssimulation in der Hydromechanik - Grundlagen und Methoden*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Mewis, P., 2002. *Morphodynamisch-numerische Modellierung von Flußkurven - Heft 126*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt - Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft - Mitteilungen.
- Patt, H., 2018. *Naturnaher Wasserbau. Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern*. 5. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Patt, H. & Jüpner, R., 2020. *Hochwasser-Handbuch - Auswirkungen und Schutz*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Pottgiesser, T., 2018. *Die deutsche Fließgewässertypologie - Zweite Überarbeitung der Steckbriefe der Fließgewässertypen*, Essen: Umweltbundesamt.
- Price, K., 2022. *HEC-RAS 5.0 Training - Australia - Workshop Guide: Surface Water Solutions - Services - Workshops*. [Online]
URL: <https://www.surfacewater.biz/wp-content/uploads/2018/08/HEC-RAS-Training-Manual-Workshop-1.pdf>
[Zugriff am 15 Juli 2022].
- QGIS, 2022. *QGIS: Für Benutzer - QGIS herunterladen*. [Online]
URL: <https://www.qgis.org/de/site/forusers/download.html>
[Zugriff am 21 Juli 2022].
- RiverGIS, 2015. *RiverGIS*. [Online]
URL: <http://rivergis.com/index.html>
[Zugriff am 10 August 2022].
- RP Freiburg LGRB, 2022. *LGRBwissen - Baden-Württemberg - RP Freiburg - Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau: Bodenkunde - Mittleres und Westliches Albvorland - Bodeneigenschaften*. [Online]
URL: <https://lgrbwissen.lgrb-bw.de/bodenkunde/mittleres-westliches-albvorland/bodeneigenschaften>
[Zugriff am 25 August 2022].

Science & Engineering, 2016. *Science & Engineering - News about science and technology. Sustainable: HEC-RAS evolution.* [Online]

URL: <https://sciengsustainability.blogspot.com/2016/08/some-months-ago-new-version-of-hec-ras.html>

[Zugriff am 22 August 2022].

Soulsby, R., 1997. *Dynamics of marine sands*. London: Thomas Telford.

Stanford Gibson, 2022a. *YouTube: HEC-RAS Operational Rules Demo.* [Online]

URL: https://www.youtube.com/watch?v=KMbV-cexP7w&t=460s&ab_channel=StanfordGibson

[Zugriff am 28 September 2022].

Stanford Gibson, 2022b. *YouTube: HEC-RAS 2D Initial Conditions Time (Warm-up) and Ramp Up Fraction.* [Online]

URL: https://www.youtube.com/watch?v=THJSsT8cwj0&ab_channel=StanfordGibson

[Zugriff am 11 Oktober 2022].

The RAS Solution, 2018a. *YouTube: HEC-RAS Basics Part 3 of 8: 2D Flow Areas and Refinement Regions.* [Online]

URL: https://www.youtube.com/watch?v=7o4DkcBQtno&t=136s&ab_channel=TheRASolution

[Zugriff am 31 August 2022].

The RAS Solution, 2018b. *YouTube: Terrain Modification in HEC-RAS Part 1 : Bathymetry.* [Online]

URL: https://www.youtube.com/watch?v=QyrOhkJZPhI&t=362s&ab_channel=TheRASolution

[Zugriff am 10 August 2022].

The RAS Solution, 2018c. *YouTube: HEC-RAS Basics Part 5 of 8: Inflow, outflow, and rain-on-grid boundary conditions.* [Online]

URL: https://www.youtube.com/watch?v=c2rL8zvLvUE&t=16s&ab_channel=TheRASolution

[Zugriff am 26 September 2022].

The RAS Solution, 2018d. *YouTube: HEC-RAS Basics Part 7 of 8: Culverts and Hydraulic Structures.* [Online]

URL: https://www.youtube.com/watch?v=au1Hyqt7drA&t=219s&ab_channel=TheRASolution

[Zugriff am 07 September 2022].

The RAS Solution, 2018e. *YouTube: HEC-RAS Basics Part 4 of 8: Internal and external boundary condition setup.* [Online]

URL: https://www.youtube.com/watch?v=pLNJZ2drgRc&ab_channel=TheRASolution

[Zugriff am 28 August 2022].

The RAS Solution, 2019. *YouTube: HEC-RAS Basics Part 1 of 8: Download and install HEC-RAS with tips and tricks for getting started.* [Online]

URL: https://www.youtube.com/watch?v=BUjF_MGcxYQ&t=2622s&ab_channel=TheRASolution

[Zugriff am 22 Juli 2022].

The RAS Solution, 2021a. *YouTube: What's new in HEC-RAS 6.0 Part 2: RASter Calculator.* [Online]

URL: https://www.youtube.com/watch?v=N0hiQ_97t1U&ab_channel=TheRASolution

[Zugriff am 27 November 2022].

The RAS Solution, 2021b. *YouTube: What's new in HEC-RAS 6.0 Part 5: Polygon modification layers and control points.* [Online]

URL: https://www.youtube.com/watch?v=2Vp_WqUhmK4&t=1249s&ab_channel=TheRASolution

[Zugriff am 15 August 2022].

-
- The RAS Solution, 2021c. *YouTube: What's new in HEC-RAS 6.0 Part 6: Land cover layers and depth-varying roughness hack*. [Online]
URL: https://www.youtube.com/watch?v=IMqELx5NizY&ab_channel=TheRASsolution
[Zugriff am 30 November 2022].
- The RAS Solution, 2022. *YouTube: Episode 19: Getting to Know the Computation Options and Tolerances for Unsteady Flow Analysis*. [Online]
URL: https://www.youtube.com/watch?v=fwNggJKnLKI&ab_channel=TheRASsolution
[Zugriff am 8 Oktober 2022].
- van der Scheer, P., Ribberink, J. & Blom, A., 2002. *Transport Formulas for Graded Sediment. Behaviour of Transport Formulas and Verification with Data*, Enschede: Civil Engineering - University of Twente.
- van Rijn, L. C., 2007a. *Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport*, s.l.: Journal of Hydraulic Engineering.
- van Rijn, L. C., 2007b. *Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. II: Suspended Transport*, s.l.: Journal of Hydraulic Engineering.
- Williams, R. M. E. et al., 2013. *Martian Fluvial Conglomerates at Gale Crater*, Washington, DC : Science.
- Wu, W., Wang, S. S. Y. & Jia, Y., 2000. *Nonuniform sediment transport in alluvial rivers*, s.l.: Journal of Hydraulic Research, Vol. 38, No. 6.
- WWA, 2021. *Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021*, s.l.: World Weather Attribution.
- YouTube, 2022. *YouTube*. [Online]
URL: <https://www.youtube.com/>
[Zugriff am 22 August 2022].
- Zanke, U., 2013. *Hydraulik für den Wasserbau, 3. Auflage*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.