



Überflutungsprognosen zum technischen Versagen einer Staustufe

Masterthesis

Zur Erlangung des Mastergrades
„Master of Science“, abgekürzt „MSc“

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Fachbereich Geoinformatik (Z_GIS),
Fakultät für Digitale und Analytische Wissenschaften,
Universität Salzburg

eingereicht von

Dirk Piesker

GutachterIn:

Assoc. Prof. Dr. Gudrun Wallentin

Schweinfurt, August 2026

Eidesstattliche Erklärung

"Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die wörtlich oder inhaltlich den angegebenen Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Ich bestätige, dass ich keine Abbildungen aus Lehrbüchern oder anderen Quellen übernommen habe, außer diese unterliegen einer Lizenz zur freien Nutzung.

Ich bestätige zudem, dass ich Künstliche Intelligenz (KI)-basierte Anwendungen ausschließlich zu jenen Zwecken verwendet habe, die [im Leitfaden zum Umgang mit generativer KI im UNIGIS Studium](#) in der aktuellen Fassung ausdrücklich zugelassen sind. Abweichungen davon müssen explizit von dem/der Betreuer/In schriftlich genehmigt werden. Die Verantwortung für alle Inhalte dieser Arbeit liegt bei mir.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Bachelor-/Master-/Diplomarbeit/Dissertation/Master Thesis eingereicht."

Die Pst

Zusammenfassung

Das technische Versagen einer Staustufe kann eine zuvor aufgestaute Wassermenge innerhalb kurzer Zeit in das Unterwasser freisetzen und dort ausgedehnte Überflutungen auslösen. Das Versagen wird dabei in seinen hydraulischen Grundzügen analog zu einem Dammbruch betrachtet. Für die Staustufe Schweinfurt am Main liegen keine gemessenen Versagensdaten vor. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines GIS-gestützten und szenarienorientierten Workflows, der die Überflutungsflächen und Schwallwellenhöhen infolge eines solchen Versagens abschätzt und anhand verfügbarer Referenzdaten validiert. Der Ansatz verbindet die räumliche Datenverarbeitung in QGIS mit einer hydraulischen Simulation in HEC-RAS. Aus dem DGM1 und aus Peildaten wird ein durchgehendes Geländemodell erzeugt. Daraus werden die Stauraumkennlinie und die aus der Landnutzung abgeleitete Rauheit bestimmt. Betrachtet werden vier Versagensszenarien, nämlich das Versagen der Schiffsschleuse, des Wasserkraftwerks, der Wehranlage mit Sportboot-schleuse und der kompletten Staustufe. Die vier Szenarien unterscheiden sich allein in der Breschengeometrie. Für jedes Szenario wird die Breschenganglinie nach dem Überfallgesetz von Poleni bestimmt und als Randbedingung in ein zweidimensionales Modell eingespeist. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Abstufung. Der Scheitelabfluss steigt von rund 181 auf rund 4.579 m³/s, die Überflutungsfläche von rund 204 auf rund 414 ha und die Schwallwellenhöhe von rund 1,7 auf rund 5,0 m. Die überflutete Fläche wird vor allem vom freigesetzten Volumen bestimmt, während der Scheitelabfluss die Höhe und die Geschwindigkeit der Welle prägt. Die Validierung bestätigt die Plausibilität der Ergebnisse. Die Scheitelabflüsse lassen sich in die Hochwasserstatistik des Pegels Schweinfurt einordnen, der Volumenbilanzfehler bleibt unter drei Hundertstel Prozent und die Schwallwellenhöhe des kleinsten Szenarios stimmt mit dem Referenzwert von 1,67 m aus Schmidt-Bäumler (2020) überein. Der Workflow eignet sich damit zur vorsorgenden Gefährdungsabschätzung. Das ungünstigste Szenario reicht bis in den Bereich sensibler Infrastruktur, insbesondere des Kernkraftwerks Grafenrheinfeld, und ist auf weitere Staustufen übertragbar.

Schlüsselwörter: Staustufenversagen, HEC-RAS, GIS-gestützte Überflutungsmodellierung, Schwallwellenhöhe, Breschenszenarien.

Abstract

The technical failure of a barrage can release a previously impounded volume of water into the tailwater within a short time and cause extensive flooding. The failure is considered in its hydraulic principles analogously to a dam break. For the Schweinfurt barrage on the river Main, no measured failure data are available. The aim of this work is to develop a GIS-based and scenario-oriented workflow that estimates the flood areas and surge wave heights resulting from such a failure and validates them against available reference data. The approach combines spatial data processing in QGIS with a hydraulic simulation in HEC-RAS. A continuous terrain model is generated from the DGM1 and from bathymetric survey data. From it, the storage curve and the roughness derived from land use are determined. Four failure scenarios are considered, namely the failure of the ship lock, the hydropower plant, the weir with the sport-boat lock, and the complete barrage. The four scenarios differ only in the breach geometry. For each scenario the breach hydrograph is computed with the Poleni weir formula and fed as a boundary condition into a two-dimensional model. The results show a clear gradation. The peak discharge rises from about 181 to about 4,579 m³/s, the flood area from about 204 to about 414 ha, and the surge wave height from about 1.7 to about 5.0 m. The flooded area is governed mainly by the released volume, whereas the peak discharge shapes the height and the speed of the wave. The validation confirms the plausibility of the results. The peak discharges can be classified within the flood statistics of the Schweinfurt gauge, the volume balance error remains below three hundredths of a percent, and the surge wave height of the smallest scenario agrees with the reference value of 1.67 m from Schmidt-Bäumler (2020). The workflow is therefore suitable for preventive hazard assessment. The most unfavorable scenario reaches into the area of sensitive infrastructure, in particular the Grafenrheinfeld nuclear power plant, and is transferable to other barrages.

Keywords: Barrage Failure, HEC-RAS, GIS-based Flood Modeling, Surge Wave Height, Breach Scenarios

Danksagungen

Zuallererst möchte ich bei Assoc. Prof. Dr. Gudrun Wallentin für die Übernahme der Betreuung dieser Arbeit bedanken.

Weiterer Dank gilt dem UNIGIS Office Team für die jederzeit ausgezeichnete Unterstützung rund ums Studium.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG.....	III
ABSTRACT	IV
DANKSAGUNGEN.....	V
INHALTSVERZEICHNIS	VI
TABELLENVERZEICHNIS	IX
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	X
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	XI
1 EINLEITUNG.....	1
1.1 AUSGANGSLAGE UND MOTIVATION.....	1
1.2 FUNKTIONSWEISE UND AUFBAU EINER STAUSTUFE	2
1.3 STAND DER FORSCHUNG.....	4
1.3.1 Methoden der Dammbbruchmodellierung	4
1.3.2 Schwall- und Flutwellenausbreitung.....	6
1.3.3 Übertragbarkeit auf künstliche Bauwerke.....	8
1.4 PROBLEMSTELLUNG UND FORSCHUNGSFRAGE	9
1.5 AUFBAU DER ARBEIT	11
2 DATEN UND METHODIK.....	13
2.1 UNTERSUCHUNGSGEBIET	13
2.1.1 Staustufe und Stauhaltung Schweinfurt.....	14
2.1.2 Unterwasserbereich bis Garstadt.....	15
2.1.3 Risikoeinordnung und Gefährdungspotential.....	18
2.2 VERWENDETE DATEN	19
2.2.1 Peildaten Ober- und Unterwasser.....	19
2.2.2 DGMI des Ufergeländes	20
2.2.3 Bauwerksdaten und Breschenweiten	21
2.2.4 Landnutzung und Pegelraten	23
2.3 BEZUGSSYSTEME UND DATENAUFBEREITUNG	25
2.3.1 Lage- und Höhenbezug.....	25

2.3.2 Datenqualität und Vorverarbeitung	26
2.4 WAHL DES SIMULATIONSANSATZES	27
2.4.1 Vergleich von 1D, 2D und 3D	27
2.4.2 Begründung des gewählten Ansatzes.....	30
2.5 HYDRAULISCHE GRUNDLAGEN.....	31
2.5.1 Schwallwellenberechnung nach Poleni	31
2.5.2 Kopplung von GIS und hydraulischem Solver (HEC-RAS).....	33
3 ERGEBNISSE.....	36
3.1 MODELLAUFBAU	36
3.1.1 Erstellung des durchgehenden Geländemodells.....	36
3.1.2 Berechnung der aufgestauten Wassermenge.....	41
3.1.3 Festlegung der Breschenweiten und Sohlhöhen	44
3.1.4 Aufbau des GIS-gestützt hydraulischen Modells	45
3.2 SIMULATION DES STAUSTUFENVERSAGENS	51
3.2.1 Vorgehen bei der Simulation und Überblick über die Ergebnisse	51
3.2.2 Versagen der Schiffsschleuse	60
3.2.3 Versagen des Wasserkraftwerks	63
3.2.4 Versagen der Wehranlage mit Sportbootschleuse.....	65
3.2.5 Versagen der kompletten Staustufe	66
3.3 VALIDIERUNG DER ERGEBNISSE	69
3.3.1 Abgleich mit den Pegelraten und der Schlüsselkurve	69
3.3.2 Vergleich mit Referenzwerten aus der Literatur	71
4 DISKUSSION	73
4.1 EIGNUNG DER VERWENDETEN DATEN	73
4.1.1 Eignung der Höhen- und Peildaten	73
4.1.2 Eignung der Landnutzungs- und Bauwerksdaten.....	74
4.2 EIGNUNG DES GEWÄHLTEN MODELLS.....	75
4.2.1 Grenzen des Modellansatzes	75
4.2.2 Kaskadeneffekte und Unsicherheiten.....	76
4.3 RELEVANZ UND INTERPRETATION DER ÜBERSCHWEMMUNGSFLÄCHEN.....	78
4.3.1 Betroffenheit von Schifffahrt und Uferbereichen.....	78

4.3.2 Gefährdung sensibler Infrastruktur im Unterwasser	79
5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	80
5.1 BEANTWORTUNG DER FORSCHUNGSFRAGE	80
5.2 ÜBERTRAGBARKEIT AUF WEITERE STAUSTUFEN.....	81
5.3 WEITERER FORSCHUNGSBEDARF	82
LITERATURVERZEICHNIS	83
ANHANG	87
ANHANG A: GIS-GESTÜTZTE VERARBEITUNGSSCHRITTE.....	87
ANHANG B: QUELLCODE DER GIS-VERARBEITUNGSSCHRITTE	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Abflusskenngrößen des Pegels Schweinfurt Neuer Hafen / Main.....	23
Tabelle 2.2: Vergleich der Simulationsansätze.....	29
Tabelle 3.1: Kennwerte des durchgehenden Geländemodells.....	40
Tabelle 3.2: Aufgestautes Volumen bei Stauziel und Höchststau.....	41
Tabelle 3.3: Breschenweiten, Sohlhöhen und abgeleitete hydraulische Kennwerte	43
Tabelle 3.4: Manning-Beiwerte je Landnutzungs-kategorie.....	49
Tabelle 3.5: Wesentliche Parameter des hydraulischen Modells.....	50
Tabelle 3.6: Qualitätskennwerte der Simulationen (Volumenbilanzfehler).....	55
Tabelle 3.7: Ergebnisse der vier Versagensszenarien beim Höchststau.....	56
Tabelle 3.8: Einordnung der Scheitelabflüsse in die Hochwasserstatistik.....	70
Tabelle 3.9: Maximale Schwallwellenhöhe im Vergleich mit dem Referenzwert.....	71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Untersuchungsgebiet.....	13
Abbildung 2.2: Untersuchungsstrecke mit Brückenunterkanten.....	16
Abbildung 2.3: Staustufe Schweinfurt mit Breschenweiten und Stauzielen.....	21
Abbildung 2.4: GIS-gestützter Workflow der hydraulischen Modellierung.....	34
Abbildung 3.1: DGM1-Mosaik des Trockengeländes mit überlagerter Schummerung...	36
Abbildung 3.2: Aus den Peildaten abgeleitete Gewässersohle.....	37
Abbildung 3.3: Vergrößerter Ausschnitt aus dem mittleren Flussabschnitt.....	38
Abbildung 3.4: Durchgehendes Geländemodell aus DGM1 und Bathymetrie.....	39
Abbildung 3.5: Wassertiefe im Stauraum beim Stauziel (207,64 m).....	41
Abbildung 3.6: Stauraumkennlinie mit Volumen und Fläche über dem Wasserstand...	42
Abbildung 3.7: Maßstäblicher Vergleich der vier Breschenquerschnitte.....	44
Abbildung 3.8: Gesamtaufbau des gekoppelten Modells.....	45
Abbildung 3.9: Ausdehnung der Speicherzelle Oberwasser.....	46
Abbildung 3.10: 2D-Rechnetz des Unterwassers.....	47
Abbildung 3.11: Räumliche Verteilung der Manning-Beiwerte im 2D-Gebiet.....	48
Abbildung 3.12: Eingabe der Breschengeometrie im Bruchdaten-Editor.....	51
Abbildung 3.13: Breschenganglinien der vier Versagensszenarien beim Höchststau....	52
Abbildung 3.14: Lage der Bresche und der Randbedingungslinien.....	53
Abbildung 3.15: Berechnungseinstellungen des 2D-Rechenkerns.....	55
Abbildung 3.16: Rechenprotokoll des Laufs der kompletten Staustufe.....	56
Abbildung 3.17: Vergleich der vier Versagensszenarien.....	57
Abbildung 3.18: Szenarienvergleich der maximalen Wassertiefe.....	59
Abbildung 3.19: Maximale Wassertiefe Versagen Schiffsschleuse.....	61
Abbildung 3.20: Maximale Wassertiefe Versagen Wasserkraftwerk.....	63
Abbildung 3.21: Maximale Wassertiefe Versagen Wehranlage mit Sportbootschleuse...	65
Abbildung 3.22: Maximale Wassertiefe Versagen komplette Staustufe.....	67
Abbildung 3.23: Versagen komplette Staustufe in Darstellung des RAS Mappers.....	67
Abbildung 3.24: Abgleich der Scheitelabflüsse mit den Hochwasserkennwerten.....	69

Abkürzungsverzeichnis

BKG: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

DGM1: Digitales Geländemodell mit einer Gitterweite von 1 m

DHHN2016: Deutsches Haupthöhennetz 2016

EPSG: European Petroleum Survey Group

GDAL: Geospatial Data Abstraction Library

GIS: Geoinformationssystem

HEC-RAS: Hydrologic Engineering Center's River Analysis System

HQ: Hochwasserabfluss

LfU: Bayerisches Landesamt für Umwelt

MHQ: Mittlerer Hochwasserabfluss

OSGEO: Open Source Geospatial Foundation

QGIS: Quantum Geoinformationssystem

WSV: Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

1 Einleitung

Dieses Kapitel führt in die Thematik des technischen Versagens einer Staustufe und der daraus resultierenden Überflutungsprognosen ein. Dazu werden zunächst die Ausgangslage und Motivation, anschließend der Aufbau und die Funktionsweise einer Staustufe, der Stand der Forschung, die Problemstellung mit Forschungsfrage sowie der Aufbau der Arbeit dargestellt.

1.1 Ausgangslage und Motivation

Staufstufen gehören zu den zentralen wasserbaulichen Anlagen an regulierten Binnenflüssen. Sie dienen der Steuerung des Wasserstandes, der Sicherstellung ausreichender Fahrrinntiefen und damit der Aufrechterhaltung der Binnenschifffahrt. Gleichzeitig übernehmen sie häufig weitere Funktionen, etwa im Bereich der Wasserkraftnutzung oder der wasserwirtschaftlichen Regulierung. Dadurch sind Staufstufen nicht als einzelne Bauwerke zu verstehen, sondern als technische Gesamtsysteme aus Wehr, Schleusenanlage, Kraftwerk und weiteren Nebenanlagen. Ihre Funktionsfähigkeit ist daher nicht nur für den Wasserstand im unmittelbaren Bereich der Stauhaltung relevant. Sie ist auch für Verkehr, Infrastruktur, Energieversorgung und angrenzende Nutzungen im Ober- und Unterwasser von Bedeutung (Aufleger et al., 2021).

Mit der technischen Bedeutung solcher Anlagen ist ein entsprechendes Gefährdungspotential verbunden. Während der Normalbetrieb einer Staustufe auf eine kontrollierte Wasserstandsregulierung ausgelegt ist, kann ein technisches Versagen zu einer abrupten Veränderung der Abflussverhältnisse führen. Wird die aufgestaute Wassermenge plötzlich freigesetzt, entsteht eine Situation, die in ihrer Wirkung mit bestimmten Dambruchprozessen vergleichbar ist. Maßgeblich ist dabei nicht allein das Volumen des gespeicherten Wassers. Ebenso relevant sind die Breite der entstehenden Öffnung, die Sohlhöhe, der Wasserstandsunterschied zwischen Ober- und Unterwasser sowie die Geschwindigkeit der Abgabe (Marangoz et al., 2024). Aus diesen Faktoren können sich Schwall- oder Flutwellen bilden, die sich im Unterwasser ausbreiten und dort Überflutungen, hohe Fließgeschwindigkeiten oder Gefährdungen für Schifffahrt und Uferbereiche verursachen können (Mo et al., 2023).

Die Ursachen eines solchen Ereignisses können vielfältig sein. Neben alters- oder materialbedingtem technischem Versagen kommen auch Bedienfehler, unzureichende Wartung, außergewöhnliche Belastungen oder gezielte Eingriffe als Auslöser in Betracht. Reale Schadensereignisse an wasserbaulichen Anlagen zeigen, dass auch regulierte und technisch überwachte Flusssysteme nicht vollständig frei von Stör- und Versagensrisiken sind. Beispiele wie der Vorfall an der Staustufe Hofen am Neckar (Kasper et al., 2017) oder das Versagen am Lake Dunlap (GBRA, 2019) verdeutlichen, dass plötzliche Funktionsverluste wasserbaulicher Strukturen erhebliche hydraulische Folgen haben können. Für eine vorsorgende Gefahrenabschätzung reicht es deshalb nicht aus, ausschließlich klassische Hochwasserereignisse zu betrachten. Vielmehr müssen auch seltene, aber wirkungsstarke technische Versagensszenarien berücksichtigt werden (Moreno-Rodenas et al., 2025).

Am Beispiel der Staustufe Schweinfurt wird diese Problematik besonders greifbar, da hier ein künstlich gehaltener Höhenunterschied zwischen Oberwasser und Unterwasser besteht. Im Versagensfall wird dieser Höhenunterschied zur treibenden Kraft einer unkontrollierten Wasserfreisetzung. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, mögliche Brechenszenarien systematisch zu betrachten und ihre räumlichen Folgen abzuschätzen (Mo et al., 2023). Die Motivation dieser Arbeit liegt daher in der Entwicklung eines nachvollziehbaren, GIS-gestützten Ansatzes. Mit diesem Ansatz können aufgestaute Wassermengen, Schwallwellenhöhen und potenzielle Überflutungsflächen für unterschiedliche Versagensszenarien einer Staustufe untersucht werden. Der Einsatz von Quantum Geoinformationssystem (QGIS) ist dabei besonders geeignet, da topographische Daten, Peildaten, Bauwerksinformationen und räumliche Analyseverfahren in einer gemeinsamen Arbeitsumgebung zusammengeführt werden können (Albano et al., 2019).

1.2 Funktionsweise und Aufbau einer Staustufe

Eine Staustufe ist ein wasserbauliches System, das den Wasserstand eines Flussabschnitts künstlich anhebt und reguliert. Dadurch entsteht oberhalb der Anlage eine Stauhaltung, in der ein weitgehend gleichmäßiger Wasserstand gehalten werden kann. Dieser geregelte Wasserstand ist vor allem für die Binnenschifffahrt von Bedeutung, da er eine ausreichende Fahrrinntiefe sicherstellt und natürliche Gefälleunterschiede des Flusses

überwindbar macht. Gleichzeitig dient eine Staustufe häufig weiteren wasserwirtschaftlichen und energetischen Zwecken. Sie kann den Abfluss steuern, Wasserstände stabilisieren und durch ein integriertes Wasserkraftwerk zur Energiegewinnung beitragen. Ihre Funktion beruht somit auf dem kontrollierten Rückhalt und der gezielten Weiterleitung von Wasser (Heimerl & Schwiersch, 2021).

Der Aufbau einer Staustufe umfasst in der Regel mehrere funktional miteinander verbundene Bauwerksteile. Die Wehranlage reguliert den Abfluss und bildet den zentralen Bestandteil der Wasserstandssteuerung. Über bewegliche Wehrfelder kann Wasser kontrolliert vom Oberwasser in das Unterwasser abgegeben werden (Gebhardt, 2020). Die Schiffsschleusenanlage ermöglicht den Höhenwechsel von Schiffen zwischen den unterschiedlichen Wasserspiegeln. Sie stellt damit die Durchgängigkeit der Wasserstraße für die Schifffahrt sicher. Ein Wasserkraftwerk nutzt den Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterwasser zur Stromerzeugung, während eine Sportbootschleuse kleineren Wasserfahrzeugen eine separate Passage ermöglicht. Diese Bauwerksteile erfüllen unterschiedliche Aufgaben, wirken hydraulisch jedoch als ein gemeinsames System (Aufleger et al., 2021).

Für die Betrachtung eines technischen Versagens ist diese Mehrteiligkeit besonders relevant. Anders als bei einem einfachen Damm besteht eine Staustufe nicht aus einem homogenen Sperrbauwerk, sondern aus mehreren Öffnungen und Bauwerkseinheiten mit unterschiedlichen Breiten, Sohlhöhen und hydraulischen Funktionen. Ein Schaden an der Schiffsschleuse erzeugt daher andere Abflussverhältnisse als ein Versagen des Kraftwerks oder der Wehranlage. Ebenso geht ein vollständiges Versagen der gesamten Staustufe eine deutlich größere hydraulische Wirkung als der Ausfall eines einzelnen Bestandteils (Mo et al., 2023). Die entstehende Breschenweite bestimmt dabei maßgeblich, wie viel Wasser in kurzer Zeit aus der Stauhaltung abgegeben werden kann. Sie ist deshalb ein zentraler Parameter für die Abschätzung von Schwallwellenhöhen und potenziellen Überflutungsflächen (Marangoz et al., 2024).

Im Kontext dieser Arbeit wird die Staustufe als künstliches Rückhaltebauwerk betrachtet, das im Versagensfall in vereinfachter Form analog zu einem Dammbruch wirken kann.

Die Analogie besteht darin, dass eine zuvor zurückgehaltene Wassermenge plötzlich freigesetzt wird und sich im Unterwasser ausbreitet. Gleichzeitig unterscheidet sich eine Staustufe deutlich von klassischen Dämmen, da die möglichen Versagensstellen technisch vorstrukturiert sind. Die einzelnen Bauwerksteile geben die Lage und Breite potenzieller Öffnungen bereits vor. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, verschiedene Versagensszenarien systematisch über definierte Breschenweiten abzubilden. Diese Szenarien bilden die Grundlage für die spätere GIS-gestützte Modellierung der aufgestauten Wassermenge, der Schwallwellenhöhe und der räumlichen Überflutungsausbreitung (Albano et al., 2019).

1.3 Stand der Forschung

Der Abschnitt stellt den aktuellen Forschungsstand zur Modellierung plötzlicher Wasserfreisetzungen dar. Zunächst werden etablierte Methoden der Dammbbruchmodellierung erläutert, bevor die Ausbreitung von Schwall- und Flutwellen betrachtet wird. Anschließend wird diskutiert, inwiefern diese Ansätze auf künstliche Bauwerke wie Staustufen übertragen werden können.

1.3.1 Methoden der Dammbbruchmodellierung

Die Dammbbruchmodellierung befasst sich mit der rechnerischen Abbildung eines plötzlichen oder fortschreitenden Versagens eines wasserzurückhaltenden Bauwerks und der daraus resultierenden Ausbreitung einer Flutwelle im Unterwasser. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, welche Wassermenge in welcher Zeit aus dem Speicherraum freigesetzt wird und wie sich diese Abgabe räumlich und zeitlich entlang des Fließgewässers ausbreitet. Methodisch wird ein Dammbbruchereignis daher häufig in mehrere Schritte unterteilt: Zunächst werden Speicherinhalt, Wasserstand und Geometrie des Bauwerks bestimmt. Anschließend wird die entstehende Bresche über Parameter wie Breite, Sohlhöhe, Seitenneigung und Bildungszeit beschrieben. Aus diesen Angaben wird ein Abfluss oder ein Bruchhydrograph abgeleitet, der danach für die Berechnung der Wellenausbreitung und der Überflutungsflächen verwendet wird (Froehlich, 2008).

Ein wesentlicher Bestandteil der Dammbbruchmodellierung ist die Beschreibung des Versagensmechanismus. In der Literatur werden insbesondere Überströmung und innere

Erosion als typische Versagensprozesse von Erddämmen behandelt (Turkel et al., 2024). Bei der Überströmung beginnt die Schädigung an der Dammkrone und entwickelt sich von oben nach unten, während sich bei innerer Erosion zunächst ein Durchflusskanal im Damminnen bilden kann. Für massive Bauwerke aus Beton oder Stahlbeton wird dagegen häufig ein schnelleres oder nahezu plötzliches Versagen angenommen, da sich die Öffnung nicht zwingend über einen längeren Erosionsprozess entwickelt. Für die Arbeit ist diese Unterscheidung wichtig, weil eine Staustufe nicht wie ein homogener Erddamm versagt. Die möglichen Öffnungen sind vielmehr durch technische Bauwerksteile wie Schleuse, Kraftwerk oder Wehr vorgegeben. Dadurch steht nicht die freie Entwicklung einer natürlichen Bresche im Vordergrund, sondern die szenarienbasierte Festlegung definierter Öffnungsbreiten (Marangoz et al., 2024).

Zur Abschätzung der Breschengeometrie und des resultierenden Abflusses werden in der Dambruchmodellierung unterschiedliche Verfahren verwendet. Empirische und semiempirische Ansätze leiten typische Breschenparameter aus beobachteten Schadensfällen ab. Dazu gehören beispielsweise Ansätze zur Bestimmung der mittleren Breschenbreite, der Bildungszeit oder des maximalen Abflusses. Solche Verfahren sind vergleichsweise einfach anwendbar und benötigen weniger Eingangsdaten, sind jedoch mit Unsicherheiten verbunden, da sie stark von den zugrunde liegenden Fallbeispielen abhängen. Physikalisch-numerische Modelle bilden dagegen die Strömungsgleichungen direkt ab und können komplexere Fließprozesse, Geländeformen und Rückstaueffekte detaillierter berücksichtigen. Sie erfordern jedoch genauere Eingangsdaten, eine sorgfältige Modellkalibrierung und einen höheren Rechenaufwand (Wahl, 2004).

In der praktischen Anwendung werden Dambruchereignisse häufig mit eindimensionalen oder zweidimensionalen hydraulischen Modellen berechnet. Eindimensionale Modelle beschreiben die Flutwellenausbreitung entlang der Hauptfließrichtung und eignen sich besonders für langgestreckte Flussabschnitte, in denen Querströmungen nur eine untergeordnete Rolle spielen. Zweidimensionale Modelle berücksichtigen zusätzlich die seitliche Ausbreitung des Wassers und sind daher besser geeignet, wenn Überflutungsflächen, Fließwege und Wassertiefen im Gelände räumlich differenziert erfasst werden sollen. Dreidimensionale Ansätze können lokale Strömungsdetails noch genauer

abbilden, sind für großräumige Überflutungsprognosen jedoch meist mit einem sehr hohen Daten- und Rechenaufwand verbunden (Lim et al., 2024). In vielen Studien wird deshalb ein kombinierter Ansatz gewählt, bei dem hydraulische Berechnungen mit GIS-gestützten Geländemodellen und Überflutungsanalysen verbunden werden (Tsegaye et al., 2024).

Für die Arbeit sind diese Methoden vor allem deshalb relevant, weil sie ein etabliertes Grundprinzip bereitstellen: Eine zurückgehaltene Wassermenge wird über eine definierte Öffnung freigesetzt, die entstehende Abgabe wird hydraulisch abgeschätzt und die räumliche Wirkung wird über Gelände- und Wasserstandsinformationen abgeleitet. Dieses Grundprinzip lässt sich auf das technische Versagen einer Staustufe übertragen, sofern die Unterschiede zwischen Damm und Staustufe methodisch berücksichtigt werden. Während klassische Dammbbruchmodelle häufig von einer sich entwickelnden Bresche im Dammbauwerk ausgehen, werden in dieser Arbeit feste Breschenweiten angesetzt, die aus den vorhandenen Bauwerksteilen der Staustufe abgeleitet werden. Damit bildet die Dammbbruchmodellierung nicht das Ereignis in allen physikalischen Einzelheiten nach, sondern liefert den methodischen Rahmen für eine GIS-gestützte und szenarienorientierte Überflutungsabschätzung.

1.3.2 Schwall- und Flutwellenausbreitung

Die Freisetzung einer zuvor aufgestauten Wassermenge führt nicht nur zu einer Erhöhung des Abflusses, sondern kann auch eine deutlich erkennbare Schwall- oder Flutwelle ausbilden. Eine solche Welle entsteht, wenn sich der Wasserstand in kurzer Zeit stark verändert und diese Störung stromabwärts weitergegeben wird. Im Unterschied zu einem langsam ansteigenden Hochwasserereignis ist die Dynamik dabei wesentlich stärker durch die plötzliche Änderung der Randbedingungen geprägt. Maßgeblich sind vor allem der Wasserstandsunterschied zwischen Ober- und Unterwasser, das Volumen des gespeicherten Wassers, die Größe der Öffnung sowie die Dauer der Freisetzung. Je abrupter die Abgabe erfolgt, desto ausgeprägter kann der Wellenscheitel im Unterwasser ausfallen (Castro-Organ & Chanson, 2017).

Die Ausbreitung einer Schwall- oder Flutwelle hängt jedoch nicht allein vom Ausgangsimpuls am Bauwerk ab. Auch die Geometrie des Flussbettes, die Rauheit der Sohle, die

Breite des Gewässers und das Gefälle beeinflussen die Ausbreitung der Welle. Vorhandene Vorlandbereiche bestimmen ebenfalls mit, wie schnell und mit welcher Höhe sich die Welle fortbewegt. (Sholtes & Doyle, 2011). In engen oder stark kanalisierten Abschnitten kann die Welle gebündelt werden und höhere Wasserstände verursachen. In breiteren Flussabschnitten oder in Bereichen mit Überflutungsflächen kann sich die Wassermenge dagegen seitlich verteilen, wodurch der Wellenscheitel abgeschwächt wird. Die Wellenausbreitung ist daher ein räumlicher Prozess, der nicht nur durch hydraulische Gleichungen, sondern auch durch die Geländeform und die vorhandenen Abflusswege bestimmt wird (Tull & Passalacqua, 2025).

Für die Gefahrenabschätzung ist besonders relevant, dass Schwall- und Flutwellen kurzfristig hohe Wasserstände und starke Strömungen erzeugen können. Dies betrifft zunächst die Schifffahrt, da Schiffe durch abrupte Wasserstandsänderungen, erhöhte Fließgeschwindigkeiten oder Rückströmungen gefährdet werden können. Ebenso können Uferbereiche, Steganlagen, technische Einrichtungen und tief liegende Nutzflächen betroffen sein. Während bei klassischen Hochwasserereignissen häufig mehr Zeit für Warnung und Vorbereitung bleibt, ist bei einem technischen Versagen einer Staustufe von einer deutlich kürzeren Reaktionszeit auszugehen. Die räumliche Ausdehnung der Überflutung und die Höhe der Welle sind deshalb zentrale Größen, um die mögliche Wirkung eines solchen Ereignisses zu bewerten (Yu et al., 2025).

In der Modellierung werden Schwall- und Flutwellen je nach Fragestellung unterschiedlich stark vereinfacht. Für detaillierte Untersuchungen können instationäre hydraulische Modelle eingesetzt werden, die die zeitliche Entwicklung von Wasserstand und Abfluss entlang des Gewässers berechnen. In GIS-basierten Ansätzen liegt der Schwerpunkt dagegen häufig auf der räumlichen Ableitung potenzieller Überflutungsflächen und Wasserstände auf Grundlage vorhandener Gelände- und Höhendaten (Afshari et al., 2018). Für diese Arbeit ist die Schwallwelle vor allem als Verbindung zwischen dem Versagensszenario an der Staustufe und der daraus resultierenden Überflutung im Unterwasser zu verstehen. Die hydraulische Abschätzung der Wellenhöhe bildet dabei die Grundlage, um die räumliche Wirkung der unterschiedlichen Breschenweiten im weiteren Verlauf der Arbeit modellhaft abzubilden.

1.3.3 Übertragbarkeit auf künstliche Bauwerke

Die Übertragung von Methoden der Dammbbruchmodellierung auf künstliche Bauwerke wie Staustufen ist fachlich naheliegend, jedoch nicht ohne Einschränkungen möglich. Beide Fälle beruhen auf demselben hydraulischen Grundproblem: Eine zuvor zurückgehaltene Wassermenge wird innerhalb kurzer Zeit freigesetzt und verursacht im Unterwasser eine plötzliche Veränderung von Wasserstand und Abfluss. Dieses gemeinsame Prinzip erlaubt es, Dammbbruchansätze als methodischen Ausgangspunkt zu verwenden (Niemeyer et al., 2005). Dennoch unterscheiden sich Staustufen deutlich von klassischen Dämmen. Während bei einem Damm häufig das Versagen eines relativ geschlossenen Rückhaltebauwerks betrachtet wird, besteht eine Staustufe aus mehreren technischen Einzelbauwerken mit unterschiedlichen Funktionen, Öffnungsbreiten und hydraulischen Randbedingungen (Aufleger et al., 2021).

Gerade diese bauliche Mehrgliedrigkeit verändert die Art der Modellierung. Bei einem klassischen Dammbbruch steht oft die Entwicklung einer Bresche im Vordergrund, etwa durch Überströmung, Erosion oder strukturelles Versagen. Bei einer Staustufe sind potenzielle Versagensstellen dagegen häufig bereits durch die vorhandenen Bauwerksteile vorgegeben. Eine Schiffsschleuse, ein Kraftwerk oder eine Wehranlage bilden jeweils eigene hydraulische Öffnungen, deren Breite und Sohlhöhe aus Bauwerksdaten abgeleitet werden können. Damit verschiebt sich der Schwerpunkt der Modellierung: Nicht die freie Ausbildung einer Bresche ist maßgeblich, sondern die szenarienbasierte Festlegung plausibler Versagensöffnungen (Fan et al., 2019). Für die Arbeit ist dieser Unterschied zentral, da die Überflutungsausbreitung anhand definierter Breschenweiten untersucht wird.

Die Übertragbarkeit bekannter Dammbbruchmethoden ist daher vor allem auf der Ebene des Modellprinzips gegeben, nicht zwangsläufig auf der Ebene jedes einzelnen physikalischen Detailprozesses. Das Grundschema aus Speicherraum, Öffnungsgeometrie, Abflussabschätzung und räumlicher Ausbreitung kann auf Staustufen angewendet werden (Aldrees et al., 2025). Gleichzeitig müssen die Eingangsdaten und Annahmen an die Besonderheiten des Bauwerks angepasst werden. Dazu gehören die künstlich regulierten Stauziele, die unterschiedlichen Bauwerkshöhen, die feste Lage der möglichen Öffnungen und die starke technische Vorstrukturierung des Abflussquerschnitts. Eine Staustufe

ersetzt in diesem Zusammenhang nicht einfach einen Damm, sondern bildet ein eigenes künstliches Rückhaltesystem, dessen Versagen über mehrere Teilszenarien beschrieben werden muss.

Für Dammbrüche existieren etablierte hydraulische und GIS-gestützte Verfahren, während die Anwendung solcher Ansätze auf das technische Versagen mehrteiliger Staustufen weniger stark systematisiert ist (Staudacher et al., 2018). Einzelne Untersuchungen zu Staustufen, Schwallwellen oder außergewöhnlichen Betriebszuständen können als Orientierung dienen, etwa wenn Referenzwerte für Wasserstandsänderungen oder Wellenhöhen herangezogen werden (Yu et al., 2025). Für eine GIS-gestützte Überflutungsprognose bei unterschiedlichen Breschenweiten bleibt jedoch zu klären, wie gut sich die bekannten Modellierungsprinzipien auf ein solches Bauwerk übertragen lassen. Genau an diesem Punkt setzt die Arbeit an: Sie betrachtet die Staustufe als künstliches, aus mehreren Komponenten bestehendes Rückhaltebauwerk und prüft, inwiefern ein szenarienbasierter Ansatz zur Abschätzung von Überflutungsflächen und Schwallwellenhöhen geeignet ist.

1.4 Problemstellung und Forschungsfrage

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen GIS-gestützten Workflow zur Abschätzung von Überflutungsflächen und Schwallwellenhöhen infolge eines technischen Versagens der Staustufe Schweinfurt zu entwickeln. Dieser Workflow wird auf unterschiedliche Breschen-szenarien angewendet, und die Ergebnisse werden anhand verfügbarer Pegel-, Bauwerks- und Vergleichsdaten validiert. Der Workflow verbindet die räumliche Datenaufbereitung und Ergebnisdarstellung in einer GIS-Umgebung mit einer hydraulischen Simulation der Versagensszenarien. Dabei übernimmt QGIS die Aufbereitung der topographischen Daten, die Geländemodellierung und die räumliche Auswertung der Simulationsergebnisse. Die hydraulische Berechnung der Dammbruch- und Breschenszenarien erfolgt mit dem gekoppelten hydraulischen Solver Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS). Ausgangspunkt ist die Annahme, dass das Versagen einer Staustufe in seinen hydraulischen Grundzügen analog zu einem Dammbruch betrachtet werden kann. In beiden Fällen wird eine zuvor zurückgehaltene Wassermenge innerhalb kurzer Zeit in das Unterwasser abgegeben. Gleichzeitig unterscheidet sich eine Staustufe wesentlich

von einem klassischen Damm, weil sie aus mehreren technischen Bauwerksteilen mit unterschiedlichen Öffnungsbreiten, Sohlhöhen und Funktionen besteht.

Die zentrale Problemstellung ergibt sich aus dieser Übertragbarkeit. Für klassische Dammbruchereignisse stehen etablierte Methoden zur Berechnung von Abfluss, Flutwellenausbreitung und Überflutungsflächen zur Verfügung. Für mehrteilige Staustufen ist jedoch zu klären, wie diese Methoden auf ein künstliches Bauwerk übertragen werden können, dessen mögliche Versagensstellen bereits durch Schleuse, Kraftwerk, Wehranlage und Sportbootschleuse vorgegeben sind. Die Modellierung muss daher nicht nur die freigesetzte Wassermenge berücksichtigen, sondern auch die konkrete Geometrie der jeweiligen Öffnung (USACE, 2014). Besonders relevant ist dabei die Frage, wie stark sich unterschiedliche Breschenweiten auf die Schwallwellenhöhe und die räumliche Ausdehnung der Überflutung im Unterwasser auswirken (Albu et al., 2020).

Vor diesem Hintergrund lautet die Forschungsfrage dieser Arbeit: Inwiefern kann ein GIS-gestützter, szenarienorientierter Modellierungsansatz, der räumliche Datenverarbeitung mit hydraulischer Simulation verbindet, genutzt werden, um die Überflutungsflächen und Schwallwellenhöhen infolge eines technischen Versagens der Staustufe Schweinfurt bei unterschiedlichen Breschenweiten abzuschätzen und anhand verfügbarer Referenzdaten zu validieren? Da für ein reales Versagensereignis der Staustufe Schweinfurt keine gemessenen Ereignisdaten vorliegen, erfolgt die Validierung in dieser Arbeit über den Abgleich der simulierten Ergebnisse mit verfügbaren Referenzdaten. Dazu zählen insbesondere Pegelkennwerte, die Schlüsselkurve sowie Literaturwerte, etwa aus Schmidt-Bäumler (2020). Diese Forschungsfrage verbindet die methodische Entwicklung des Workflows mit der empirischen Anwendung am Untersuchungsgebiet. Sie umfasst damit sowohl die Berechnung der aufgestauten Wassermenge als auch die räumliche Ableitung potenzieller Überflutungsbereiche und die Validierung der Ergebnisse.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage werden vier Versagensszenarien betrachtet, die sich aus den baulichen Bestandteilen der Staustufe ableiten. Dazu gehören das Versagen der Schiffsschleuse, des Wasserkraftwerks, der Wehranlage mit Sportbootschleuse sowie der kompletten Staustufe. Für jedes Szenario werden die jeweiligen hydraulischen

Randbedingungen festgelegt, in ein hydraulisches Modell überführt und anschließend GIS-gestützt räumlich ausgewertet. Dadurch soll erkennbar werden, welche Unterschiede zwischen den Szenarien bestehen und in welchem Umfang ein solcher gekoppelter Workflow aus GIS-Datenverarbeitung und hydraulischer Simulation zur vorsorgenden Gefährdungsabschätzung an Staustufen beitragen kann.

1.5 Aufbau der Arbeit

Der Rest der Arbeit ist wie folgt aufgebaut. Kapitel 2 beschreibt das Untersuchungsgebiet, die verwendeten Daten und die methodische Vorgehensweise. Dabei werden zunächst die Staustufe Schweinfurt, die Stauhaltung sowie der Unterwasserbereich bis Garstadt vorgestellt. Anschließend werden die eingesetzten Datenquellen, darunter Peildaten, Digitales Geländemodell mit einer Gitterweite von 1 m (DGM1)-Daten, Bauwerksdaten, Breschenweiten, Landnutzungsinformationen und Pegeldaten, erläutert. Zudem werden die Bezugssysteme, die Datenaufbereitung, die Wahl des Simulationsansatzes sowie die hydraulischen Grundlagen der Modellierung dargestellt.

Kapitel 3 erläutert den Aufbau des Modells und die Durchführung der Simulationen. Zunächst wird beschrieben, wie aus den vorhandenen Höhen- und Peildaten ein durchgehendes Geländemodell erstellt wird und wie die aufgestaute Wassermenge berechnet wird. Darauf aufbauend werden die Breschenweiten und Sohlhöhen festgelegt und in das hydraulisch-geoinformatische Modell überführt. Anschließend werden vier Versagensszenarien simuliert: das Versagen der Schiffsschleuse, des Wasserkraftwerks, der Wehranlage mit Sportbootschleuse sowie der kompletten Staustufe. Abschließend werden die Ergebnisse anhand verfügbarer Pegeldaten, der Schlüsselkurve und geeigneter Referenzwerte validiert.

Kapitel 4 behandelt die Diskussion der Ergebnisse und der methodischen Vorgehensweise. Im Mittelpunkt steht dabei die Eignung der verwendeten Höhen-, Peil-, Landnutzungs- und Bauwerksdaten sowie die Aussagekraft des gewählten Modellansatzes. Darüber hinaus werden Grenzen des Modells, mögliche Unsicherheiten und Kaskadeneffekte betrachtet. Die simulierten Überschwemmungsflächen werden ergänzend hinsichtlich ihrer Relevanz für Schifffahrt, Uferbereiche und sensible Infrastruktur im Unterwasser interpretiert.

Kapitel 5 fasst die zentralen Ergebnisse der Arbeit zusammen und beantwortet die Forschungsfrage. Außerdem wird bewertet, inwiefern der entwickelte GIS-gestützte Workflow auf weitere Stufen übertragen werden kann. Zum Schluss werden weiterer Forschungsbedarf und mögliche methodische Erweiterungen, etwa durch detailliertere hydrodynamische Modelle oder zusätzliche Validierungsdaten, aufgezeigt.

2 Daten und Methodik

Dieses Kapitel beschreibt die Datengrundlage und die methodische Vorgehensweise der Arbeit. Dazu werden zunächst das Untersuchungsgebiet, die verwendeten Daten, die Bezugssysteme und Aufbereitungsschritte sowie anschließend der gewählte Simulationsansatz und die hydraulischen Grundlagen des gekoppelten Workflows aus GIS und HEC-RAS dargestellt.

2.1 Untersuchungsgebiet

Der folgende Abschnitt stellt das Untersuchungsgebiet der Arbeit vor. Im Mittelpunkt stehen die Staustufe und Stauhaltung Schweinfurt, der anschließende Unterwasserbereich bis zur Staustufe Garstadt sowie die risikobezogene Einordnung des betrachteten Versagenszenarios.



Abbildung 2.1: Untersuchungsgebiet, Maßstab 1:50.000. (Quelle: WSV GeoPortal (ITZ-Bund), Kartengrundlage: BKG.)

2.1.1 Staustufe und Stauhaltung Schweinfurt

Die Staustufe Schweinfurt liegt am Main und bildet den zentralen Ausgangspunkt des Untersuchungsgebiets. Sie reguliert den Wasserstand im Oberwasser und ermöglicht dadurch eine für die Schifffahrt nutzbare Stauhaltung. Der betrachtete Abschnitt ist nicht nur als Flussraum, sondern als technisch gesteuertes Wasserbau- und Betriebssystem zu verstehen. Die Anlage hält den Wasserspiegel künstlich auf einem definierten Niveau und beeinflusst damit die hydraulischen Randbedingungen im Ober- und Unterwasser.

Die Stauhaltung Schweinfurt übernimmt im Modellzusammenhang die Funktion eines zurückgehaltenen Wasserkörpers. Für die Versagenssimulation ist deshalb vor allem der Wasserstand im Oberwasser maßgeblich. Das reguläre Stauziel liegt bei 207,64 m, während der Höchststau mit 207,94 m angegeben wird (Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes [WSV], 2026). Beide Höhen beziehen sich auf Deutsches Haupthöhenetz 2016 (DHHN2016). Der Höchststau liegt damit 0,30 m über dem regulären Stauziel. Diese Differenz ist für die Modellierung relevant, da bereits geringe Wasserstandsunterschiede das gespeicherte Volumen und den potenziellen Abfluss im Versagensfall beeinflussen können.

Für die Arbeit wird die Staustufe Schweinfurt nicht nur als einzelnes Bauwerk betrachtet, sondern als mehrteiliges System. Zu den relevanten Bestandteilen gehören die Schiffsschleusenanlage, das Wasserkraftwerk, die Wehranlage und die Sportbootschleuse. Diese Bauwerksteile besitzen unterschiedliche Öffnungsbreiten, Sohlhöhen und hydraulische Funktionen. Sie bilden daher die Grundlage für die späteren Versagensszenarien. Während im Normalbetrieb eine kontrollierte Wasserstandsregelung erfolgt, kann ein technisches Versagen einzelner Bauwerksteile zu einer unkontrollierten Freisetzung der aufgestauten Wassermenge führen.

Die Stauhaltung ist damit der Speicherraum, aus dem die Schwallwelle im Versagensfall gespeist wird. Für die Modellierung ist maßgeblich, wie viel Wasser oberhalb der Staustufe zurückgehalten wird und über welche Öffnung dieses Wasser in das Unterwasser gelangt. Die Staustufe Schweinfurt eignet sich deshalb als Untersuchungsgebiet, weil sich die hydraulische Ausgangssituation über bekannte Stauziele, Bauwerksgeometrien und

Breschenweiten beschreiben lässt. Damit können die späteren Szenarien nicht abstrakt, sondern anhand konkreter baulicher und wasserwirtschaftlicher Randbedingungen abgeleitet werden.

2.1.2 Unterwasserbereich bis Garstadt

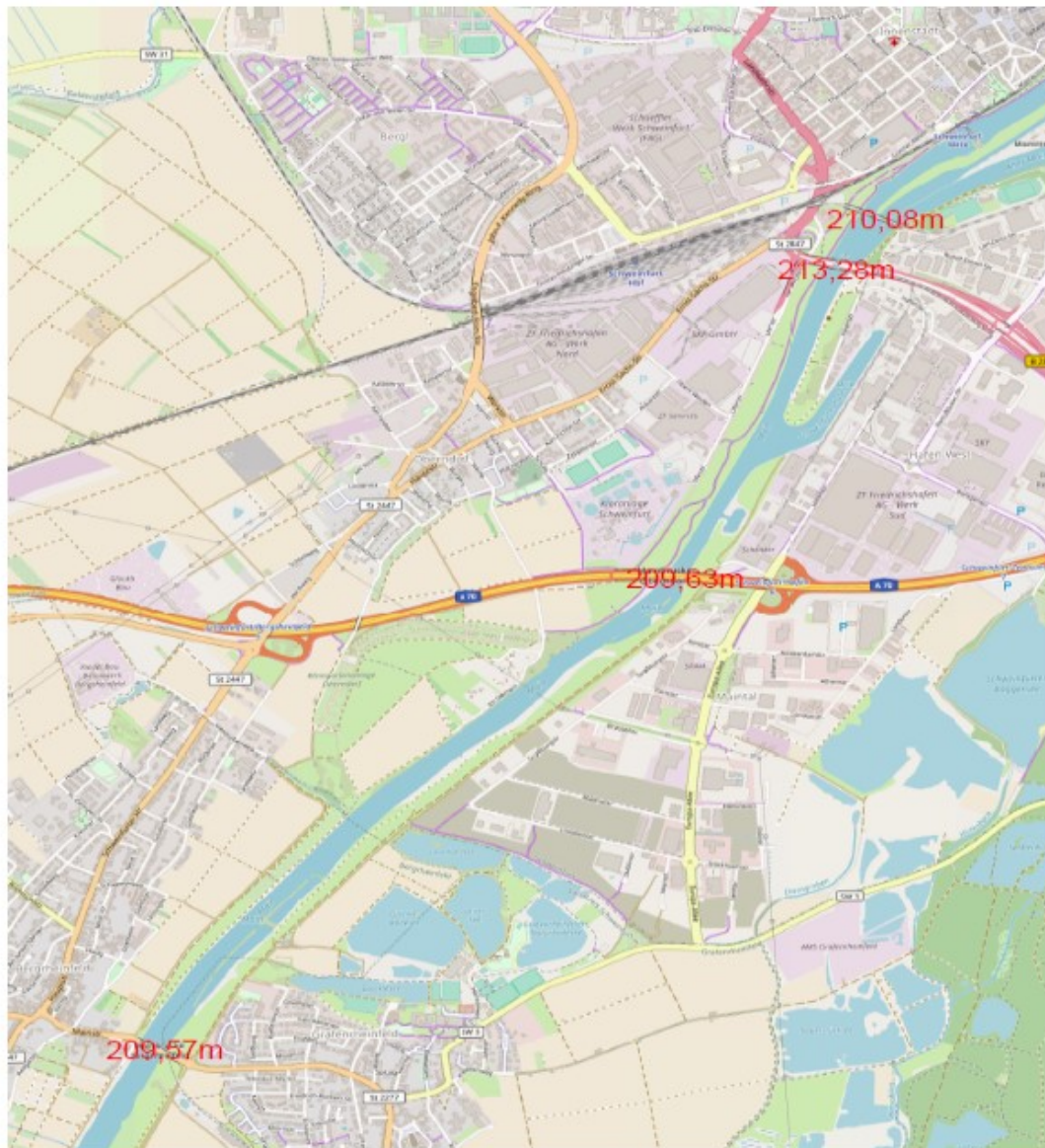
Der Unterwasserbereich der Staustufe Schweinfurt bildet den Raum, in den die freigesetzte Wassermenge im Versagensfall abströmt. Er ist deshalb für die Abschätzung der Schwallwellenausbreitung und der potenziellen Überflutungsflächen zentral. Während die Stauhaltung Schweinfurt den Ausgangsspeicher des Szenarios darstellt, beschreibt der Unterwasserbereich den Wirkungsraum des Ereignisses. In dieser Arbeit wird der Abschnitt vom Unterwasser der Staustufe Schweinfurt bis zur Staustufe Garstadt betrachtet. Damit wird der Flussabschnitt erfasst, in dem sich eine durch das Versagen ausgelöste Welle zunächst ausbreiten und auf vorhandene Gelände-, Ufer- und Bauwerksstrukturen interagiert.

Für den Unterwasserbereich sind die regulierten Wasserstände ebenfalls von Bedeutung. Das Stauziel liegt bei 202,97 m, der Höchststau bei 203,27 m (WSV, 2026). Beide Werte beziehen sich auf DHHN2016. Damit besteht zwischen Oberwasser und Unterwasser der Staustufe Schweinfurt ein deutlicher Höhenunterschied, der im Versagensfall die treibende Kraft der Wasserfreisetzung bildet. Die Stauhaltung Garstadt nimmt in diesem Zusammenhang die Rolle des nachgeordneten Gewässerabschnitts ein. Sie begrenzt den Untersuchungsraum stromabwärts und bildet zugleich einen relevanten Bezugspunkt für die räumliche Modellierung der Wellenausbreitung.

Der betrachtete Unterwasserabschnitt ist nicht nur als Fließstrecke des Mains zu verstehen, sondern auch als potenzieller Überflutungsraum. Neben dem eigentlichen Flussbett sind daher die angrenzenden Uferbereiche, Vorländer und tiefer gelegenen Flächen von Interesse. Ihre Geländehöhen bestimmen, ob und in welchem Umfang Wasser seitlich aus dem Gewässerbett austreten kann. Für die spätere Modellierung ist dieser Raum deshalb besonders wichtig, weil sich die Wirkung der unterschiedlichen Breschenszenarien nicht allein im Gewässerquerschnitt zeigt. Maßgeblich ist vielmehr, wie sich die Wassermenge

im Gelände verteilt und welche Flächen bei erhöhten Wasserständen erreicht werden können.

Im Untersuchungsabschnitt befinden sich zudem mehrere Brücken, die den Main queren. Die bekannten Höhen der Brückenunterkanten liegen bei 209,57 m, 209,63 m, 210,08 m und 213,28 m. Diese Werte werden im Rahmen der Gebietsbeschreibung berücksichtigt, da Brücken bei hohen Wasserständen als hydraulisch relevante Engstellen oder Kontrollpunkte wirken können. Für die Arbeit dienen sie zunächst der räumlichen und höhenbezogenen Einordnung des Unterwasserbereichs. Ob und in welchem Umfang solche Bauwerke die simulierte Wellenausbreitung beeinflussen, wird erst im Zusammenhang mit dem Modellaufbau und der Ergebnisinterpretation betrachtet. Die Untersuchungsstrecke des Mains zwischen der Staustufe Schweinfurt und der Staustufe Garstadt sowie die Lage der vier den Main querenden Brücken sind in Abbildung 2.2 dargestellt.



© Informationstechnikzentrum Bund (ITZBund), geoportal.wsv.res.bund.de



0 200 400 600m
Maßstab 1:20.000
Gedruckt am 22.06.2026 17:24
<https://sh.wsv.de/3T/Jr>

Abbildung 2.2: Untersuchungsstrecke Schweinfurt-Garstadt mit Brückenunterkanten (DHHN2016), Maßstab 1:20.000. (Quelle: WSV GeoPortal (ITZBund), Kartengrundlage: OpenStreetMap-Mitwirkende.)

2.1.3 Risikoeinordnung und Gefährdungspotential

Das technische Versagen einer Staustufe ist als seltenes, aber potenziell folgenschweres Ereignis einzuordnen. Im Unterschied zu regelmäßig auftretenden Hochwasserereignissen steht dabei nicht ein natürlicher Abflussanstieg im Vordergrund, sondern der plötzliche Verlust einer technischen Rückhaltefunktion. Das Risiko ergibt sich aus dem Zusammenwirken von Eintrittswahrscheinlichkeit, freigesetzter Wassermenge, hydraulischer Wirkung und der Empfindlichkeit der betroffenen Räume. Für die Arbeit ist daher nicht die probabilistische Bestimmung einer konkreten Versagenswahrscheinlichkeit maßgeblich, sondern die räumliche Abschätzung möglicher Auswirkungen bei definierten Szenarien. Die Risikoeinordnung dient somit als fachlicher Rahmen, um die später berechneten Schwallwellenhöhen und Überflutungsflächen nicht nur als hydraulische Ergebnisse, sondern auch als mögliche Gefährdungssituation im Unterwasser zu verstehen.

Das Gefährdungspotential hängt wesentlich davon ab, wie schnell und in welcher Höhe sich eine Schwall- oder Flutwelle im Unterwasser ausbreitet. Neben der reinen Überflutungsfläche sind dabei auch die Wassertiefe, die Fließgeschwindigkeit und die Dauer der Überflutung relevante Bewertungsgrößen. Diese Parameter beeinflussen, ob Uferbereiche lediglich kurzzeitig benetzt werden oder ob Nutzflächen, Verkehrswege, technische Anlagen und wassernahe Infrastrukturen stärker betroffen sein können. Besonders kritisch ist die kurze Vorwarnzeit, die bei einem technischen Versagen zu erwarten ist. Dadurch unterscheidet sich ein solches Szenario deutlich von vielen klassischen Hochwasserlagen, bei denen Pegelanstiege häufig über einen längeren Zeitraum beobachtet und bewertet werden können. Die spätere Modellierung muss deshalb nicht nur zeigen, welche Flächen erreicht werden, sondern auch, welche räumlichen Muster und Intensitäten sich aus den unterschiedlichen Breschenszenarien ergeben.

Im Unterwasser der Staustufe Schweinfurt sind unterschiedliche Nutzungen und Schutzgüter zu berücksichtigen. Dazu gehören die Schifffahrt auf dem Main, Uferanlagen, Verkehrs- und Versorgungsinfrastruktur sowie angrenzende Siedlungs- und Gewerbeflächen. Auch sensible Infrastrukturen im weiteren Unterwasserbereich sind für die Risikoeinordnung relevant, etwa wenn sie in räumlicher Nähe zu potenziellen Überflutungsflächen liegen. In diesem Zusammenhang wird das südlich von Schweinfurt am linken Mainufer

gelegene Brennelemente-Zwischenlager Grafenrheinfeld als besonders schutzwürdige Infrastruktur im Unterwasserbereich berücksichtigt. Dort werden hochradioaktive Abfälle in CASTOR-V/19-Behältern aufbewahrt (BGZ, 2026). Die Nennung solcher Objekte dient in dieser Arbeit nicht der Feststellung einer konkreten Betroffenheit, sondern der fachlichen Einordnung möglicher Schadensdimensionen. Damit bildet die Risikoeinordnung eine Verbindung zwischen der hydraulischen Simulation und der späteren Interpretation der Ergebnisse. Erst durch die Betrachtung der betroffenen Räume und Nutzungen wird deutlich, welche Bedeutung die modellierten Überflutungsflächen für Gefahrenvorsorge und Risikomanagement besitzen.

2.2 Verwendete Daten

Der Abschnitt stellt die für die Modellierung verwendeten Datenquellen vor. Dazu gehören die Peildaten des Ober- und Unterwassers, das DGM1 des Ufergeländes, Bauwerksdaten mit den daraus abgeleiteten Breschenweiten sowie Landnutzungs- und Pegeldata. Gemeinsam bilden diese Datengrundlagen die Voraussetzung für den Aufbau des Geländemodells, die Definition der Versagensszenarien und die spätere hydraulische Simulation.

2.2.1 Peildaten Ober- und Unterwasser

Für die Abbildung der Gewässersohle werden Peildaten des Ober- und Unterwassers verwendet. Dabei handelt es sich um 3D-Fächerecholotdaten, mit denen die Höhenlage des Flussbettes unterhalb der Wasseroberfläche erfasst wird (WSV, 2026). Diese Datengrundlage ist für die Arbeit wesentlich, da das DGM1 zwar das Ufergelände und die angrenzenden Landflächen beschreibt, die Topographie des Gewässerbettes jedoch nicht abbilden kann. Gerade für eine hydraulische Modellierung ist die Gewässersohle aber ein zentraler Bestandteil des Geländemodells. Die Peildaten schließen diese Lücke und ermöglichen es, den Flussraum nicht nur entlang der Ufer, sondern auch im Bereich der unter Wasser liegenden Sohle geometrisch zu erfassen.

Die Peildaten liegen getrennt für das Oberwasser der Staustufe Schweinfurt und den Unterwasserbereich bis zur Staustufe Garstadt vor. Diese Trennung entspricht der funktionalen Rolle der beiden Bereiche im Modell. Das Oberwasser bildet den aufgestauten

Speicherraum, aus dem im Versagensfall Wasser freigesetzt wird. Der Unterwasserbereich beschreibt dagegen den Raum, in dem sich die entstehende Schwall- oder Flutwelle ausbreitet. Damit liefern die Peildaten sowohl die Grundlage für die Abschätzung der aufgestauten Wassermenge als auch für die spätere Modellierung der Abfluss- und Überflutungsprozesse im nachgeordneten Flussabschnitt. Ergänzende Uferlinien oder Umringspolygone unterstützen dabei die räumliche Abgrenzung des Gewässerbereichs.

Die Daten werden als Punkt- beziehungsweise Shapefile-Daten verarbeitet und enthalten Höheninformationen der Gewässersohle. Aus diesen Punkten kann im weiteren Arbeitsablauf ein zusammenhängendes Sohlenmodell abgeleitet und mit den terrestrischen Höhendaten des Ufergeländes verbunden werden. Voraussetzung dafür ist eine einheitliche räumliche Referenzierung. Die Peildaten werden daher im Lagebezug ETRS89/UTM Zone 32N und im Höhenbezug DHHN2016 verarbeitet. Dadurch können sie mit dem DGM1, den Bauwerksdaten und weiteren thematischen Datensätzen in einem gemeinsamen Bezugssystem kombiniert werden. Die konkrete Interpolation und Zusammenführung der Peildaten mit dem Ufergelände erfolgt erst im Rahmen der Datenaufbereitung und des Modellaufbaus.

2.2.2 DGM1 des Ufergeländes

Zur Beschreibung des Ufergeländes und der potenziellen Überflutungsflächen wird das Digitale Geländemodell mit einer Gitterweite von einem Meter verwendet (Bayerische Vermessungsverwaltung, 2026). Das DGM1 bildet die Geländeoberfläche der trockenen Landbereiche hochaufgelöst ab und stellt damit eine wesentliche Datengrundlage für die räumliche Analyse im Untersuchungsgebiet dar. Besonders für die Abgrenzung möglicher Überflutungsflächen ist eine detaillierte Erfassung der Geländehöhen erforderlich. Bereits geringe Höhenunterschiede können darüber entscheiden, ob Wasser im Flussbett verbleibt oder in angrenzende Ufer- und Vorlandbereiche austritt. Das DGM1 liefert somit die topographische Grundlage für die spätere Geländemodellierung und die Bewertung der räumlichen Ausbreitung der simulierten Wassermengen.

Die Daten liegen als Kacheln im XYZ- beziehungsweise ASCII-Format vor und decken den Untersuchungsraum in einzelnen Rasterabschnitten ab. Die Kachelstruktur

ermöglicht eine gezielte Verarbeitung der für das Untersuchungsgebiet relevanten Bereiche. Für die Arbeit werden die benötigten Kacheln in der GIS-Umgebung zusammengeführt und auf den räumlichen Untersuchungsbereich zugeschnitten. Dadurch entsteht eine einheitliche topographische Grundlage für die Uferbereiche zwischen der Staustufe Schweinfurt und dem Unterwasserbereich bis Garstadt. Die hohe räumliche Auflösung des DGM1 ist dabei besonders vorteilhaft, weil Uferkanten, Geländeneigungen, Vorlandbereiche und kleinräumige Höhenunterschiede differenziert berücksichtigt werden können.

Gleichzeitig besitzt das DGM1 eine wichtige Einschränkung. Da es die Geländeoberfläche auf Grundlage terrestrischer beziehungsweise luftgestützt erhobener Höhendaten beschreibt, kann es die unter Wasser liegende Gewässersohle nicht erfassen. Im Bereich des Mains bildet das DGM1 daher nicht Flussbettgeometrie ab, sondern muss durch die Peildaten des Ober- und Unterwassers ergänzt werden. Erst durch die Kombination aus DGM1 und Peildaten kann ein durchgehendes Geländemodell erstellt werden, das sowohl die trockenen Uferflächen als auch die Gewässersohle umfasst. Diese Zusammenführung ist eine zentrale Voraussetzung für den späteren Aufbau des hydraulischen Modells in HEC-RAS und für die GIS-gestützte Auswertung der Überflutungsergebnisse.

2.2.3 Bauwerksdaten und Breschenweiten

Zur Definition der Versagensszenarien werden Bauwerksdaten der Staustufe Schweinfurt herangezogen (WSV, 2026). Diese Daten beschreiben die bauliche Gliederung der Anlage und ermöglichen es, die potenziellen Öffnungen im Versagensfall räumlich und geometrisch zu bestimmen. Für die Arbeit sind vor allem die Breiten der einzelnen Bauwerksteile und die zugehörigen Sohlhöhen relevant. Sie bilden die Grundlage, um aus dem mehrteiligen Aufbau der Staustufe konkrete Breschenszenarien abzuleiten. Die Staustufe wird dabei nicht als einheitlich versagendes Sperrbauwerk betrachtet, sondern als künstliches Bauwerk mit mehreren möglichen Versagensstellen.

Aus den Bauwerksdaten werden vier Szenarien abgeleitet. Das erste Szenario betrachtet das Versagen der Schiffsschleuse mit einer Breschenweite von 12 m und einer Sohlhöhe von 203,14 m. Das zweite Szenario bezieht sich auf das Wasserkraftwerk mit einer

Breschenweite von 26 m und einer Sohlhöhe von 200,04 m. Im dritten Szenario wird das Versagen der Wehranlage zusammen mit der Sportbootschleuse angesetzt; hierfür wird eine Breschenweite von 70 m und eine Sohlhöhe von 202,14 m verwendet. Das vierte Szenario beschreibt das Versagen der kompletten Staustufe mit einer Breschenweite von 156 m und einer Sohlhöhe von 200,04 m. Die Werte werden nicht im Sinne einer frei entstehenden Bresche berechnet, sondern im Rahmen einer eigenen Erhebung aus den vorhandenen Bauwerksinformationen festgelegt beziehungsweise abgeleitet. Die Lage der einzelnen Bauwerksteile der Staustufe Schweinfurt sowie die zugehörigen Breschenweiten und Stauziele sind in Abbildung 2.3 dargestellt.

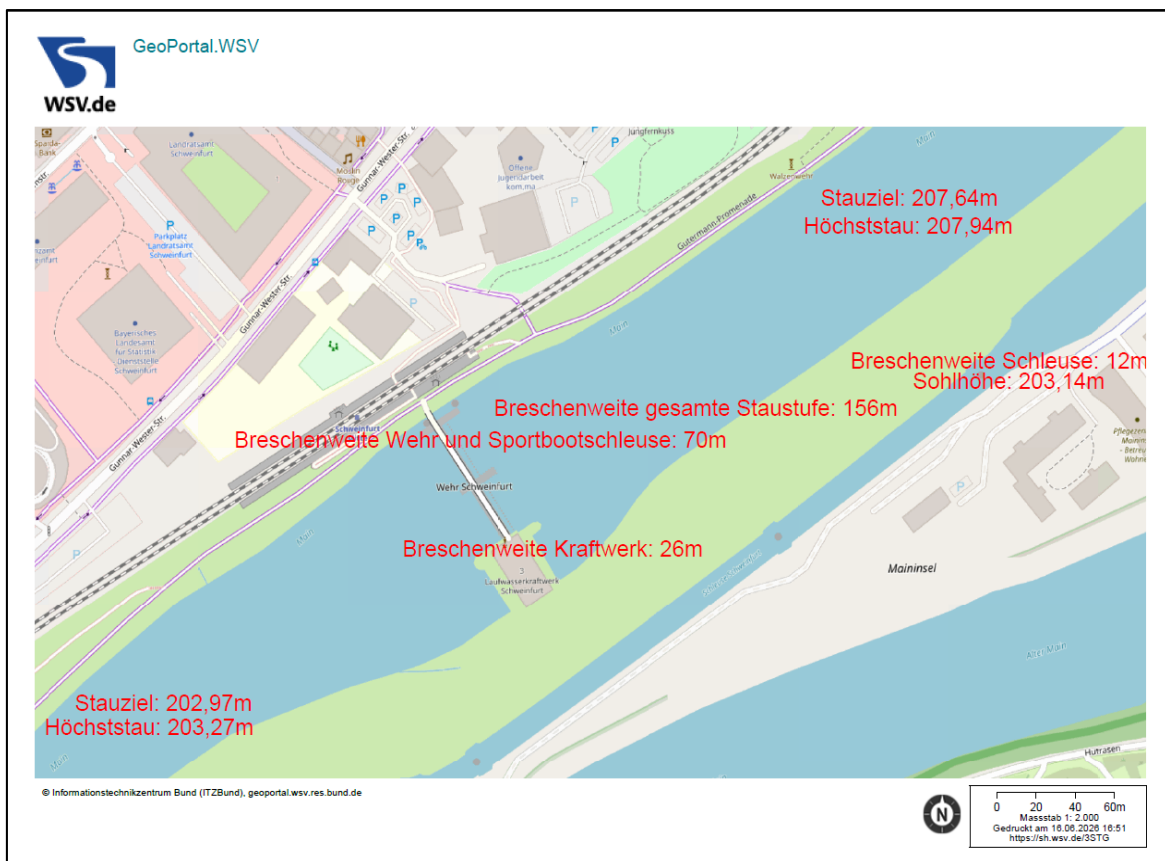


Abbildung 2.3: Staustufe Schweinfurt mit Breschenweiten und Stauzielen (DHHN2016), Maßstab 1:2.000. (Quelle: WSV GeoPortal (ITZBund), Kartengrundlage: OpenStreetMap-Mitwirkende.)

Die Breschenweiten und Sohlhöhen sind zentrale Eingangsgrößen für die hydraulische Modellierung. Sie bestimmen den möglichen Abflussquerschnitt, über den die

aufgestaute Wassermenge vom Oberwasser in das Unterwasser gelangen kann. Besonders die Differenz zwischen Wasserstand und Sohlhöhe beeinflusst die wirksame Überfallhöhe und damit den potenziellen Abfluss im jeweiligen Szenario. Für den gekoppelten Workflow aus GIS und HEC-RAS dienen die Bauwerksdaten daher als Verbindung zwischen der baulichen Realität der Staustufe und der hydraulischen Abbildung des Versagens. Sie ermöglichen es, die vier Szenarien nicht abstrakt, sondern anhand konkreter Geometrien der Staustufe Schweinfurt zu modellieren.

2.2.4 Landnutzung und Pegeldaten

Für die hydraulische Modellierung werden neben Höhen- und Bauwerksdaten auch Landnutzungsdaten verwendet. Die Landnutzung beschreibt, welche Oberflächen und Nutzungsformen im Untersuchungsgebiet vorhanden sind, etwa Gewässerflächen, Uferbereiche, Siedlungsflächen, Verkehrsflächen, Grünland oder bewachsene Flächen. Diese Information ist für ein zweidimensionales hydraulisches Modell relevant, weil unterschiedliche Oberflächen den Abfluss unterschiedlich stark bremsen. In HEC-RAS wird dieser Einfluss über Rauheitsbeiwerte, insbesondere Manning-Werte, abgebildet. Die Landnutzungsdaten dienen daher nicht in erster Linie der kartographischen Darstellung, sondern der räumlichen Zuordnung hydraulischer Rauheiten innerhalb des Modellgebiets.

Als Datengrundlage wird ein Landnutzungsdatensatz für Bayern verwendet, der in einem GeoPackage vorliegt und auf amtlichen Geobasisdaten basiert (Bayerische Vermessungsverwaltung, 2025). Da der vollständige Datensatz den gesamten Freistaat Bayern umfasst und entsprechend groß ist, wird er für die weitere Verarbeitung auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten. Dieser Zugschnitt ist notwendig, um die Datenmenge zu reduzieren und nur die für den Modellraum zwischen der Staustufe Schweinfurt und dem Unterwasserbereich bis Garstadt relevanten Flächen zu berücksichtigen. Die Landnutzung ergänzt damit das Geländemodell um eine thematische Komponente. Während DGM1 und Peildaten die geometrische Form des Geländes und der Gewässersohle beschreiben, liefert die Landnutzung Informationen darüber, wie die überströmten Flächen hydraulisch wirken können.

Zusätzlich werden Pegel­daten des Pegels Schweinfurt Neuer Hafen am Main herangezogen (Bayerisches Landesamt für Umwelt [LfU], 2026). Sie enthalten Abflusskennwerte, Hochwasserkennwerte und die Schlüsselkurve, also die Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluss. Für die Arbeit sind diese Daten aus zwei Gründen wichtig. Zum einen können sie als untere Randbedingung beziehungsweise als hydraulischer Bezugsrahmen für das Modell verwendet werden. Zum anderen bilden sie eine zentrale Grundlage für die spätere Validierung der Simulationsergebnisse. Relevante Abflusskennwerte sind unter anderem Mittlerer Hochwasserabfluss (MHQ) 637 m³/s, Hochwasserabfluss (HQ)10 1100 m³/s, HQ100 2000 m³/s und HQ1000 3000 m³/s. Über den Vergleich mit solchen Kennwerten und der Schlüsselkurve kann eingeordnet werden, ob die modellierten Abflüsse und Wasserstände in einem nachvollziehbaren Verhältnis zu bekannten hydrologischen Referenzgrößen stehen. Die Abflusskenngrößen des Pegels Schweinfurt Neuer Hafen / Main sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Abflusskenngrößen des Pegels Schweinfurt Neuer Hafen / Main. (Quelle: LfU, 2026)

Kenngröße	Abfluss (m³/s)
MHQ	637
HQ1	520
HQ2	680
HQ5	900
HQ10	1100
HQ20	1380
HQ50	1700
HQ100	2000
HQ1000	3000

Tabelle 2.1 zeigt die für die Arbeit relevanten Abflusskenngrößen des Pegels Schweinfurt Neuer Hafen / Main. Die Werte dienen als hydrologischer Referenzrahmen für die spätere Validierung der Simulationsergebnisse. Insbesondere der simulierte Scheitelabfluss kann mit den HQ-Kenngrößen und der Schlüsselkurve verglichen werden, um einzuordnen, ob die berechneten Abflüsse und Wasserstände in einem nachvollziehbaren Verhältnis zu bekannten Hochwasserkennwerten stehen.

2.3 Bezugssysteme und Datenaufbereitung

Der Abschnitt erläutert die räumlichen und höhenbezogenen Referenzsysteme der verwendeten Datensätze sowie deren Bedeutung für eine konsistente Modellierung. Anschließend werden die Datenqualität und die konzeptionellen Schritte der Vorverarbeitung beschrieben, mit denen die unterschiedlichen Geodaten für den weiteren Modellaufbau vereinheitlicht werden.

2.3.1 Lage- und Höhenbezug

Für die räumliche Verarbeitung der verwendeten Geodaten wird das Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989 in Verbindung mit der Universalen Transversalen Mercator-Projektion der Zone 32N verwendet. Das zugehörige Koordinatenreferenzsystem ist unter dem EPSG-Code 25832 definiert. Dieses System ist für das Untersuchungsgebiet geeignet, da Schweinfurt innerhalb der UTM-Zone 32N liegt und die amtlichen Geobasisdaten in Deutschland überwiegend in diesem Lagebezug bereitgestellt werden. Die Verwendung eines einheitlichen Koordinatensystems ermöglicht eine lagegenaue Überlagerung der Peildaten, des DGM1, der Landnutzungsdaten und der Bauwerksinformationen. Zugleich wird dadurch sichergestellt, dass Entfernungen, Flächengrößen und räumliche Beziehungen innerhalb des Untersuchungsgebiets konsistent bestimmt werden können. Dieses ist besonders für die spätere Abgrenzung der Überflutungsflächen und die räumliche Zuordnung der hydraulischen Ergebnisse von Bedeutung.

Der Höhenbezug erfolgt einheitlich im DHHN2016. Dadurch werden die Höhenwerte der Gewässersohle, des Ufergeländes, der Bauwerkssohlen sowie der Stauziele auf dieselbe vertikale Referenz bezogen. Diese Vereinheitlichung ist für die hydraulische Modellierung besonders wichtig, da bereits geringe Abweichungen im Höhenbezug die berechneten Wasserstandsdifferenzen, Abflussquerschnitte und Überflutungsflächen beeinflussen können. Eine Vermischung unterschiedlicher Höhensysteme führt daher zu systematischen Fehlern im Geländemodell und in den daraus abgeleiteten hydraulischen Größen. Besonders kritisch sind solche Abweichungen bei der Bestimmung der wirksamen Überfallhöhe zwischen Stauziel und Sohlhöhe. Der einheitliche Höhenbezug schafft deshalb eine verlässliche Grundlage für die Berechnung der aufgestauten Wassermenge und für den Vergleich der einzelnen Versagensszenarien.

Das Projektkoordinatensystem wird in QGIS von Beginn an auf EPSG:25832 festgelegt. Alle eingehenden Datensätze werden hinsichtlich ihres Lage- und Höhenbezugs geprüft und bei Bedarf in das gemeinsame Referenzsystem überführt. Dadurch wird verhindert, dass einzelne Layer räumlich versetzt erscheinen oder beim Zusammenführen geometrische Inkonsistenzen entstehen. Neben der korrekten Projektion wird auch kontrolliert, ob die Höhenangaben der verschiedenen Datensätze tatsächlich auf DHHN2016 bezogen sind. Erst nach dieser Prüfung können die Datensätze gemeinsam weiterverarbeitet und in ein durchgehendes Geländemodell überführt werden. Der einheitliche Lage- und Höhenbezug bildet damit die technische Voraussetzung für den zuverlässigen Datenaustausch zwischen QGIS und HEC-RAS sowie für eine konsistente räumliche Auswertung der Simulationsergebnisse.

2.3.2 Datenqualität und Vorverarbeitung

Die Qualität der Eingangsdaten beeinflusst unmittelbar die Aussagekraft des hydraulischen Modells. Deshalb werden die verwendeten Datensätze zunächst hinsichtlich räumlicher Vollständigkeit, Höhenkonsistenz und geometrischer Plausibilität geprüft. Bei den Peildaten ist insbesondere zu kontrollieren, ob die Messpunkte den Gewässerraum ausreichend dicht abdecken und ob Ausreißer oder offensichtliche Fehlmessungen vorliegen. Für das DGM1 ist zu prüfen, ob alle benötigten Kacheln vollständig vorhanden sind und ohne Lücken aneinander anschließen. Auch die Landnutzungs- und Bauwerksdaten müssen räumlich mit dem Untersuchungsgebiet übereinstimmen. Unterschiedliche Erfassungszeitpunkte, Generalisierungsgrade oder Datenformate können dabei zu Abweichungen führen, die vor der weiteren Verarbeitung erkannt und bewertet werden müssen.

Die Vorverarbeitung dient dazu, die heterogenen Datensätze in eine einheitliche und modellfähige Struktur zu überführen. Aus den Peildaten des Ober- und Unterwassers wird jeweils eine zusammenhängende Oberfläche der Gewässersohle abgeleitet. Die DGM1-Kacheln werden zu einem flächendeckenden Raster zusammengeführt, damit das Ufergelände und die potenziellen Überflutungsbereiche ohne Kachelgrenzen verarbeitet werden können. Der bundeslandweite Landnutzungsdatensatz wird auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten, wodurch die Datenmenge reduziert und die spätere Zuordnung

hydraulischer Rauheiten vereinfacht wird. Zusätzlich werden die räumlichen Begrenzungen des Oberwassers, des Unterwassers und der relevanten Vorlandbereiche vereinheitlicht, damit alle Datensätze denselben Modellraum beschreiben.

Ein zentraler Arbeitsschritt ist die Zusammenführung der unter Wasser erfassten Peildaten mit dem oberhalb der Wasserlinie liegenden DGM1. Beide Datenquellen ergänzen sich, besitzen jedoch unterschiedliche Erfassungsmethoden und räumliche Eigenschaften. Übergangsbereiche an den Uferlinien müssen deshalb besonders sorgfältig kontrolliert werden, damit keine künstlichen Höhengsprünge, Lücken oder Überschneidungen entstehen. Auch die Vollständigkeit der Bauwerksinformationen und die Lage der angesetzten Breschen werden vor dem Modellaufbau geprüft. Ziel der Vorverarbeitung ist ein konsistenter Datenbestand, aus dem ein durchgehendes Geländemodell sowie die für HEC-RAS erforderlichen Geometrie- und Rauheitsinformationen abgeleitet werden können. Die konkrete technische Umsetzung, die verwendeten Werkzeugeinstellungen und die daraus entstehenden Modellprodukte werden im Rahmen des Modellaufbaus in Kapitel 3 dokumentiert.

2.4 Wahl des Simulationsansatzes

Der Abschnitt vergleicht eindimensionale, zweidimensionale und dreidimensionale Ansätze zur hydraulischen Simulation im Hinblick auf ihre Eignung für das Untersuchungsziel. Darauf aufbauend wird der gewählte Modellierungsansatz begründet und in die gekoppelte Arbeitsweise von QGIS und HEC-RAS eingeordnet.

2.4.1 Vergleich von 1D, 2D und 3D

Eindimensionale, zweidimensionale und dreidimensionale Modelle unterscheiden sich vor allem darin, wie stark sie die räumliche Struktur einer Strömung vereinfachen. Die Wahl der Modelldimension beeinflusst sowohl die darstellbaren hydraulischen Prozesse als auch den erforderlichen Daten- und Rechenaufwand. Für die Untersuchung eines Staustufenversagens ist insbesondere zu prüfen, ob ein Ansatz lediglich die Ausbreitung entlang des Flusslaufs beschreibt. Darüber hinaus ist zu untersuchen, ob er auch die seitliche Verteilung des Wassers in Ufer- und Vorlandbereichen erfassen kann. Die geeignete Modelldimension hängt deshalb unmittelbar von den angestrebten Ergebnissen ab.

Eindimensionale Modelle bilden die Strömung entlang einer festgelegten Hauptfließrichtung ab. Wasserstand, Abfluss und Fließgeschwindigkeit werden für einzelne Querprofile oder Berechnungsknoten bestimmt. Dieser Ansatz eignet sich besonders für langgestreckte und klar abgegrenzte Gewässerabschnitte, in denen die Strömung überwiegend parallel zur Flussachse verläuft. Vorteile bestehen im vergleichsweise geringen Rechenaufwand und in der überschaubaren Datenmenge. Für die Simulation einer Schwallwelle im Hauptgerinne kann ein 1D-Modell daher grundsätzlich geeignete zeitliche Verläufe von Wasserstand und Abfluss liefern. Seine Aussagekraft ist jedoch eingeschränkt, sobald Wasser seitlich aus dem Flussbett austritt und sich über unterschiedlich hoch gelegene Flächen verteilt. Potenzielle Überflutungswege, lokale Senken und quer zur Fließrichtung auftretende Strömungen werden nur vereinfacht oder indirekt abgebildet (Gharbi et al., 2016).

Zweidimensionale Modelle berechnen die Strömung sowohl in Längs- als auch in Querrichtung. Der Modellraum wird hierzu in einzelne Berechnungszellen unterteilt, zwischen denen Wasser in Abhängigkeit von Geländeform, Wasserstand und hydraulischen Widerständen ausgetauscht wird. Dadurch lassen sich die seitliche Ausbreitung einer Flutwelle, räumlich unterschiedliche Wassertiefen und bevorzugte Fließwege im Gelände darstellen. Dieser Ansatz ist besonders für die Analyse von Überflutungsflächen geeignet, da nicht nur der Zustand im Hauptgerinne, sondern auch die Dynamik auf Uferflächen und Vorländern berücksichtigt werden kann. Gleichzeitig steigt der Aufwand gegenüber einem 1D-Modell. Die Qualität der Ergebnisse hängt stärker von der Auflösung und Genauigkeit des Geländemodells, der Wahl der Rauheitswerte sowie der Größe des Berechnungsnetzes ab (Vozinaki et al., 2017).

Dreidimensionale Modelle erfassen zusätzlich die vertikale Komponente der Strömung. Sie können komplexe Prozesse wie lokale Wirbel, vertikale Geschwindigkeitsverteilungen, Turbulenzen oder Strömungsablösungen an einzelnen Bauwerken detailliert abbilden. Diese Modellklasse ist vor allem dann sinnvoll, wenn kleinräumige hydraulische Vorgänge an Schleusen, Wehrkörpern oder Turbineneinläufen untersucht werden sollen. Für eine großräumige Überflutungssimulation zwischen Schweinfurt und Garstadt ist der

dafür erforderliche Daten-, Kalibrierungs- und Rechenaufwand jedoch erheblich. Zudem führt der zusätzliche Detaillierungsgrad nicht zwangsläufig zu einem entsprechenden Erkenntnisgewinn für die räumliche Abgrenzung der Überflutungsflächen (Nguyen, 2015).

Neben den reinen 1D-, 2D- und 3D-Ansätzen können gekoppelte Modelle eingesetzt werden. Dabei wird das Hauptgerinne beispielsweise eindimensional dargestellt, während seitliche Überflutungsbereiche zweidimensional berechnet werden. Ein solcher 1D/2D-Ansatz verbindet die effiziente Abbildung der Fließbewegung im Gewässer mit einer differenzierten Darstellung der Ausbreitung im Vorland. Die Kopplung kann besonders bei langen Flussabschnitten vorteilhaft sein, wenn der Hauptkanal klar definiert ist und zugleich räumlich komplexe Überflutungsflächen berücksichtigt werden müssen. Sie erhöht jedoch die Anforderungen an die Abstimmung der Modellkomponenten und an die Definition der Austauschbereiche (Samarasinghe et al., 2022).

Für die Untersuchung sind vor allem die räumliche Ausdehnung der Überflutung, die Schwallwellenhöhe sowie die Verteilung der Wassertiefen im Unterwasser relevant. Ein rein eindimensionaler Ansatz kann die seitliche Ausbreitung nur begrenzt erfassen, während ein dreidimensionales Modell für den großräumigen Untersuchungsraum einen unverhältnismäßig hohen Aufwand verursacht. Zweidimensionale und gekoppelte 1D/2D-Modelle bieten deshalb grundsätzlich die geeigneteren Voraussetzungen, um die hydraulischen Auswirkungen der unterschiedlichen Breschenszenarien räumlich differenziert abzubilden. Die wesentlichen Unterschiede der drei Modellansätze hinsichtlich ihrer räumlichen Abbildung, ihrer Anwendungsbereiche sowie ihres Daten- und Rechenaufwands sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst. Die Gegenüberstellung verdeutlicht, dass der zweidimensionale Ansatz für die Untersuchung das ausgewogenste Verhältnis zwischen räumlicher Aussagekraft und modelltechnischem Aufwand bietet.

Tabelle 2.2: Vergleich eindimensionaler, zweidimensionaler und dreidimensionaler Simulationsansätze. (Quelle: Eigene Darstellung.)

Kriterium	1D-Modell	2D-Modell	3D-Modell
Räumliche Abbildung	Hauptfließrichtung	Längs- und Querrichtung	Längs-, Quer- und Vertikalrichtung
Geeignete Anwendung	Kanalartige Flussabschnitte	Überflutungsflächen und Vorländer	Lokale Strömungsprozesse an Bauwerken
Seitliche Ausbreitung	Nur eingeschränkt	Räumlich differenziert	Vollständig abbildbar
Datenbedarf	Gering bis mittel	Mittel bis hoch	Sehr hoch
Rechenaufwand	Gering	Mittel bis hoch	Sehr hoch
Eignung für diese Arbeit	Eingeschränkt	Hoch	Unverhältnismäßig aufwendig

2.4.2 Begründung des gewählten Ansatzes

Für die Arbeit wird ein zweidimensionaler Simulationsansatz gewählt, da die räumliche Ausbreitung der Schwallwelle im Unterwasser im Mittelpunkt der Untersuchung steht. Ziel ist nicht nur die Berechnung eines zeitlichen Abflussverlaufs des Mains, sondern auch die Ermittlung potenzieller Überflutungsflächen, Wassertiefen und bevorzugter Fließwege in den angrenzenden Ufer- und Vorlandbereichen. Ein rein eindimensionales Modell ist hierfür nur eingeschränkt geeignet, da es die seitliche Ausbreitung des Wassers nicht ausreichend differenziert abbilden kann. Ein dreidimensionaler Ansatz verursacht dagegen einen deutlich höheren Daten- und Rechenaufwand, ohne für die großräumige Überflutungsprognose einen entsprechenden zusätzlichen Erkenntnisgewinn zu liefern. Der zweidimensionale Ansatz stellt deshalb einen angemessenen Kompromiss zwischen räumlicher Aussagekraft, Datenverfügbarkeit und Rechenaufwand dar.

Die hydraulische Modellierung erfolgt in HEC-RAS über eine gekoppelte Struktur aus Speicherraum und zweidimensionalem Berechnungsgebiet. Die Stauhaltung im Oberwasser wird als Storage Area abgebildet, in der das aufgestaute Wasservolumen gespeichert wird. Der Unterwasserabschnitt zwischen Schweinfurt und Garstadt wird als 2D Flow Area modelliert. Beide Bereiche werden über die jeweilige Breschengeometrie miteinander verbunden. Auf diese Weise können die unterschiedlichen Öffnungsbreiten und

Sohlhöhen der vier Versagensszenarien unmittelbar in die hydraulische Berechnung einfließen. Das hochaufgelöste Geländemodell aus DGM1 und Peildaten schafft zugleich die notwendige Grundlage, um die seitliche Ausbreitung der freigesetzten Wassermenge im Unterwasser räumlich differenziert zu erfassen.

Der Modellansatz basiert auf einem hydrostatischen Ausgangszustand. Zu Beginn der Simulation wird angenommen, dass die Stauhaltung gefüllt ist und kein zusätzlicher relevanter Zufluss aus dem Oberwasser in das System eintritt. Dadurch lässt sich die hydraulische Wirkung des technischen Versagens isoliert untersuchen, ohne sie mit einem gleichzeitig auftretenden Hochwasserereignis zu überlagern. Als Ausgangswasserstand der Simulationen wird der um 0,30 m über dem regulären Stauziel liegende Höchststau verwendet. Das reguläre Stauziel dient dabei als Referenz für die Berechnung der aufgestauten Wassermenge in Abschnitt 3.1.2. Der Höchststau beschreibt dabei den ungünstigeren Ausgangszustand, da ein größeres gespeichertes Wasservolumen zur Verfügung steht und somit höhere Abflüsse und stärkere Schwallwellen möglich sind. Die Einbeziehung dynamischer Zuflüsse oder kombinierter Hochwasser- und Versagensereignisse bleibt einer weiterführenden Modellierung vorbehalten.

2.5 Hydraulische Grundlagen

Der Abschnitt erläutert die hydraulischen Grundlagen der Schwallwellenberechnung und die Bedeutung der Breschengeometrie für den resultierenden Abfluss. Zudem wird die Kopplung der räumlichen Datenverarbeitung in QGIS mit der hydraulischen Simulation in HEC-RAS beschrieben.

2.5.1 Schwallwellenberechnung nach Poleni

Die Poleni-Formel dient zur Abschätzung des Abflusses über ein Wehr oder eine vergleichbare freie Überfallkante. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Bresche vereinfacht als hydraulische Öffnung betrachtet, über die das im Oberwasser aufgestaute Wasser in das Unterwasser abgegeben wird. Der Abfluss lässt sich in vereinfachter Form mit

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{\frac{3}{2}} \quad (2.1)$$

beschreiben. Dabei bezeichnet Q den Abfluss in m^3/s , μ den dimensionslosen Überfallbeiwert, b die wirksame Breite der Öffnung in Metern, g die Erdbeschleunigung und h die wirksame Überfallhöhe. Die Formel zeigt, dass der Abfluss linear mit der Breschenweite, jedoch überproportional mit der Überfallhöhe zunimmt. Bereits geringe Veränderungen des Wasserstands können deshalb einen deutlichen Einfluss auf den resultierenden Abfluss haben (Afzalimehr & Bagheri, 2009).

Für die vier Versagensszenarien werden die jeweiligen Breschenweiten und Sohlhöhen als geometrische Eingangsgrößen verwendet. Die wirksame Überfallhöhe ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Wasserstand im Oberwasser und der Sohlhöhe der betrachteten Öffnung. Damit besitzt jedes Szenario eine eigene Kombination aus Breite und Überfallhöhe. Die Schiffsschleuse weist eine vergleichsweise geringe Breschenweite auf, während beim vollständigen Versagen der Staustufe ein deutlich größerer Abflussquerschnitt entsteht. Zusätzlich werden das reguläre Stauziel und der Höchststau berücksichtigt. Durch den um 0,30 m höheren Höchststau erhöht sich die wirksame Überfallhöhe und damit auch der theoretisch mögliche Abfluss.

Die Anwendung der Poleni-Formel setzt vereinfachende hydraulische Annahmen voraus. Dazu gehören eine definierte Überfallkante, eine annähernd gleichmäßige Anströmung und ein zunächst hydrostatischer Wasserstand im Oberwasser. Der Überfallbeiwert μ fasst Einflüsse der Geometrie, der Anströmung und der Energieverluste zusammen und muss an die jeweilige Öffnung angepasst werden. Auch der Wasserstand im Unterwasser ist relevant. Bei einem freien Überfall wird der Abfluss im Wesentlichen durch den Oberwasserstand bestimmt. Steigt der Unterwasserstand so weit an, dass die Bresche eingestaut wird, kann sich der Abfluss verringern. Die Poleni-Formel liefert daher eine vereinfachte hydraulische Abschätzung und ersetzt keine instationäre Berechnung der Wellenausbreitung (Azimi et al., 2014; Pugh et al., 2025).

Für die Arbeit wird die Poleni-Berechnung als theoretischer Bezugsrahmen für den Abfluss durch die einzelnen Breschen verwendet. Sie ermöglicht eine nachvollziehbare Gegenüberstellung der vier Öffnungsgeometrien und unterstützt die Einordnung der später simulierten Scheitelabflüsse. Die zeitliche und räumliche Ausbreitung der Schwallwelle

wird dagegen mit HEC-RAS berechnet. Dabei verändern sich Wasserstand, Fließgeschwindigkeit und Wellenhöhe entlang des Unterwasserabschnitts in Abhängigkeit von Gelände, Gewässergeometrie, Rauheit und Rückstaueffekten. Eine konstante Wellenhöhe wird daher nicht für die gesamte Untersuchungsstrecke angenommen. Die vereinfachende Annahme einer gleichmäßigen Wasserhöhe bezieht sich lediglich auf den Ausgangszustand an der jeweiligen Breschenöffnung.

2.5.2 Kopplung von GIS und hydraulischem Solver (HEC-RAS)

Die hydraulische Modellierung basiert auf einer gekoppelten Arbeitsweise zwischen dem Geoinformationssystem QGIS und dem hydraulischen Solver HEC-RAS. Beide Programme übernehmen dabei klar voneinander getrennte Aufgaben. QGIS dient der räumlichen Aufbereitung, Prüfung und Zusammenführung der Eingangsdaten. HEC-RAS übernimmt dagegen die instationäre hydraulische Berechnung der Schwallwellen- und Überflutungsprozesse. Durch diese Aufgabenteilung können die geographischen und topographischen Informationen des Untersuchungsgebiets mit einem physikalisch begründeten Strömungsmodell verbunden werden.

In QGIS werden zunächst die für die Simulation erforderlichen räumlichen Grundlagen vorbereitet. Dazu gehören das aus DGM1 und Peildaten abgeleitete Geländemodell, die Geometrien der Staustufe und der Breschen sowie die Landnutzungsdaten des Untersuchungsgebiets. Das zusammengeführte Geländemodell beschreibt sowohl die Gewässersole als auch die angrenzenden Ufer- und Vorlandbereiche. Die Landnutzungsdaten werden verwendet, um den unterschiedlichen Oberflächen räumlich differenzierte Rauheitswerte zuzuordnen. Auch die Lage der vier Versagensöffnungen wird auf Grundlage der Bauwerksdaten geometrisch festgelegt. Die aufbereiteten Daten bilden damit die topographische und räumliche Eingangsgrundlage für das hydraulische Modell.

HEC-RAS verarbeitet diese Daten innerhalb eines instationären zweidimensionalen Modells. Das Geländemodell wird als Terrain eingebunden, während der Unterwasserbereich als 2D Flow Area abgebildet wird. Die Stauhaltung im Oberwasser wird als Storage Area definiert und über die jeweilige Breschengeometrie mit dem zweidimensionalen Berechnungsgebiet verbunden. Die aus der Landnutzung abgeleiteten Manning-Werte

beschreiben den hydraulischen Widerstand der überströmten Flächen. Als untere Randbedingung kann die Schlüsselkurve des Pegels Schweinfurt Neuer Hafen verwendet werden, da sie die Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluss beschreibt. Auf dieser Grundlage berechnet HEC-RAS die zeitliche und räumliche Entwicklung von Wasserständen, Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten und Abflüssen (USACE, 2014).

Nach Abschluss der hydraulischen Berechnung werden die Simulationsergebnisse erneut in einer GIS-Umgebung ausgewertet. Die von HEC-RAS erzeugten räumlichen Ergebnisdaten können in QGIS übernommen, mit weiteren Geodaten überlagert und kartographisch dargestellt werden. Dadurch lassen sich maximale Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten und potenzielle Überflutungsflächen für die einzelnen Breschenszenarien vergleichen. Die Kopplung ermöglicht somit einen durchgängigen Workflow von der Datenaufbereitung über die hydraulische Berechnung bis zur räumlichen Interpretation der Ergebnisse. Gleichzeitig bleibt nachvollziehbar, dass QGIS die geoinformatische Verarbeitung übernimmt, während die eigentliche hydraulische Simulation in HEC-RAS erfolgt.

Der gesamte Ablauf des gekoppelten Modellierungsansatzes ist in Abbildung 2.4 zusammengefasst. Die Darstellung zeigt, dass die räumlichen Eingangsdaten zunächst in QGIS geprüft, vereinheitlicht und für die hydraulische Modellierung vorbereitet werden. Anschließend erfolgt in HEC-RAS der Aufbau des Speicherraums und des zweidimensionalen Berechnungsgebiets sowie die instationäre Simulation der vier Breschenszenarien. Die erzeugten Wasserstände, Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten und Überflutungsflächen werden danach erneut in QGIS räumlich ausgewertet und kartographisch dargestellt. Die Validierung bildet einen rückgekoppelten Prüfschritt, da bei relevanten Abweichungen Modellparameter überprüft und die Simulation gegebenenfalls erneut durchgeführt werden können. Die einzelnen Schritte der GIS-gestützten Datenverarbeitung wurden in der QGIS- bzw. OSGeo4W-Umgebung mit GDAL-basierten Python-Skripten umgesetzt. Ein Überblick über diese Skripte und ihre Funktion findet sich in Anhang A.

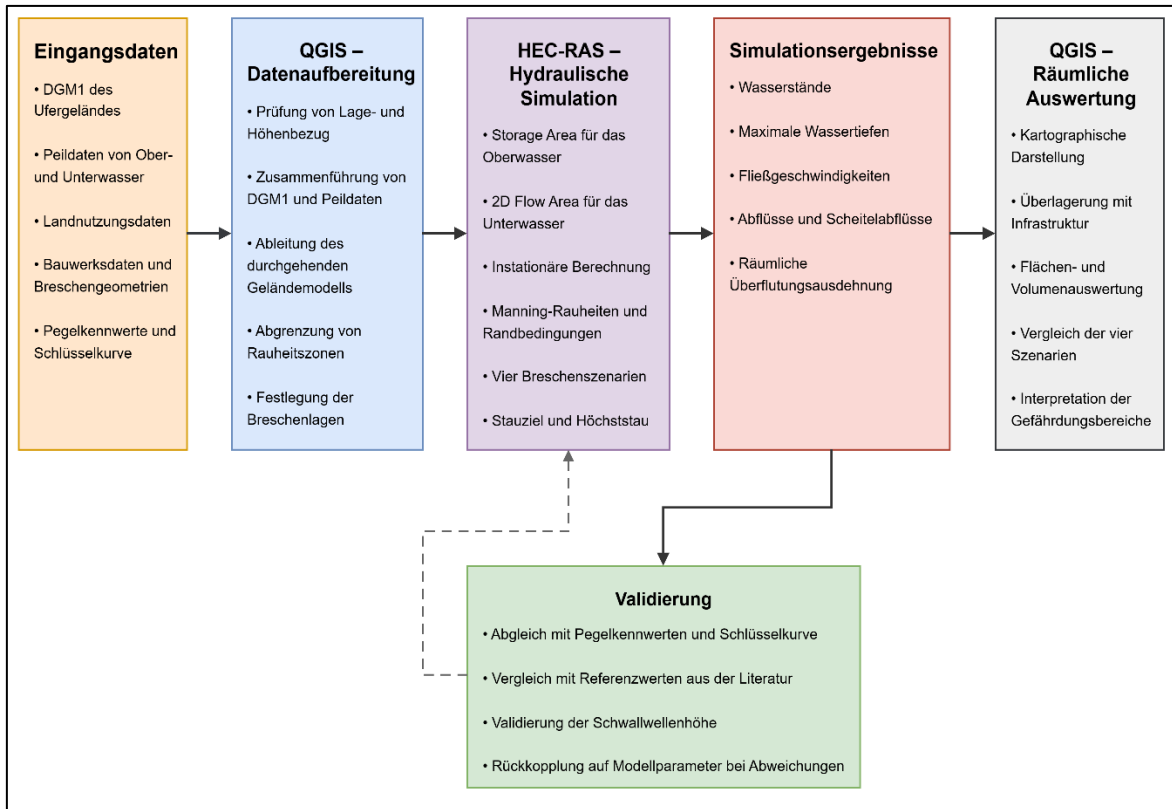


Abbildung 2.4: GIS-gestützter Workflow der hydraulischen Modellierung mit QGIS und HEC-RAS. (Quelle: Eigene Darstellung.)

3 Ergebnisse

Dieses Kapitel stellt die Ergebnisse des Modellaufbaus, der vier simulierten Versagensszenarien und der anschließenden Validierung dar. Dabei werden zunächst die Erstellung des Geländemodells und die hydraulische Modellkonfiguration erläutert, bevor die Simulationsergebnisse und deren Abgleich mit Pegel- und Literaturwerten präsentiert werden.

3.1 Modellaufbau

Dieser Abschnitt beschreibt den Aufbau des für die Simulation verwendeten Modells. Dazu werden die Erstellung des durchgehenden Geländemodells, die Berechnung der aufgestauten Wassermenge, die Festlegung der Breschenweiten und Sohlhöhen sowie die Konfiguration des gekoppelten hydraulischen Modells dargestellt.

3.1.1 Erstellung des durchgehenden Geländemodells

Die zweidimensionale hydraulische Simulation benötigt ein durchgehendes Geländemodell. Dieses Modell vereint das trockene Ufergelände und die überströmte Gewässersohle in einer einzigen Höhenfläche. Das DGM1 aus der Laserscannerbefliegung erfasst allein das trockene Gelände, denn die verwendeten Laserstrahlen durchdringen die Wasseroberfläche nicht. Über dem Fluss fehlen daher die Daten der Sohle. Aus diesem Grund werden die Peildaten der Gewässersohle mit dem DGM1 zu einem nahtlosen Modell verbunden. Alle Daten liegen im Koordinatensystem ETRS89 UTM Zone 32N (EPSG:25832) und im Höhenbezug DHHN2016 vor. Das Zielraster besitzt eine Auflösung von einem Meter.

Das trockene Gelände stammt aus dem DGM1 der Bayerischen Vermessungsverwaltung. Für den Raum zwischen Schweinfurt und Garstadt liegen 20 Kacheln von je einem Quadratkilometer vor. Jede Kachel besitzt eine Rasterweite von einem Meter. Aus den einzelnen Kacheln entsteht durch Zusammenfügen ein einheitliches Mosaik. Abbildung 3.1 zeigt dieses Mosaik mit einer überlagerten Schummerung. Der diagonale Streifen zeigt die Ausdehnung der 20 Kacheln entlang des Maintals. Der Talzug des Mains verläuft von Nordosten nach Südwesten und tieft sich als schmales Band in die höher gelegene Umgebung ein. Im Nordosten hebt sich das bebaute Stadtgebiet von Schweinfurt mit seiner kleinteiligen Struktur ab. Entlang des Flusses lässt die Schummerung Dämme, Wege und

einzelne Bauwerke erkennen. Die Geländehöhen reichen von 199,75 bis 242,64 m. Die grauen Flächen am Rand liegen außerhalb der verwendeten Kacheln.

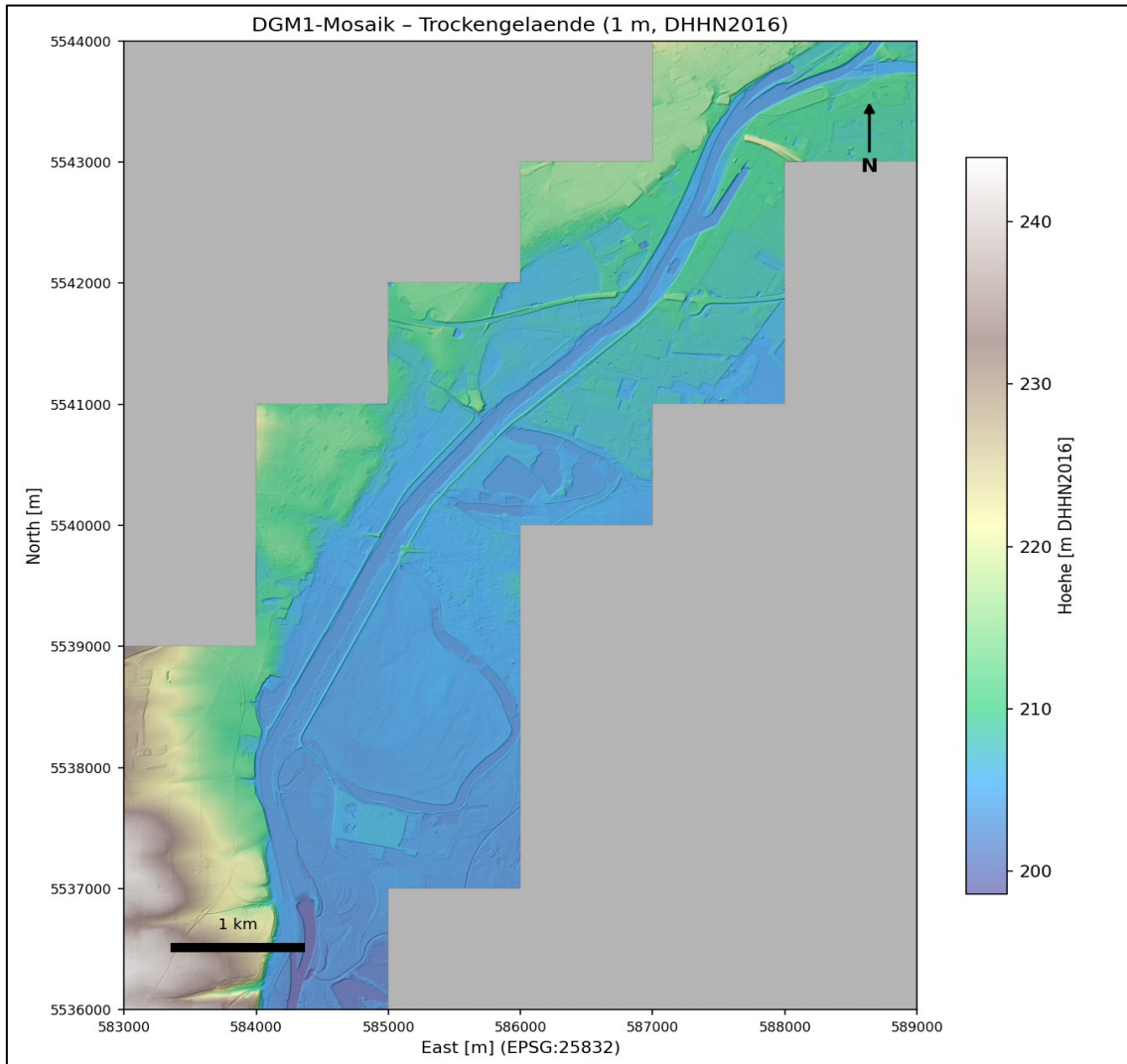


Abbildung 3.1: DGM1-Mosaik des Trockengeländes mit überlagerter Schummerung. (Quelle: Eigene Darstellung.)

Die Gewässersohle beruht auf Peildaten der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung, die mit einem Fächerecholot erfasst wurden. Für das Oberwasser liegen 850.043 Messpunkte vor, für das Unterwasser bis Garstadt weitere 688.131 Punkte. Die Punktdichte ist sehr hoch und der mittlere Abstand bleibt unter einem Meter. Deshalb reicht eine zellenweise Mittelung der Punkte auf das Raster aus. Eine aufwendige Flächeninterpolation ist nicht nötig und glättet die gemessene Sohle nur. Wenige verbleibende Lücken werden

über kurze Distanz aufgefüllt. Die berechnete Fläche bleibt dabei auf den vermessenen Bereich begrenzt. Abbildung 3.2 stellt die Sohle farbige vor der Geländeschummerung dar. Zur Mitte des Flusses hin wird der Untergrund tiefer, sodass die Farbe von Grün an den Ufern nach Blau in der Stromrinne wechselt. Die Farbe wechselt von Grün in Ufernähe zu Blau in der Fahrrinne und bildet so die Eintiefung des Flussbetts ab. Der tiefste Bereich bildet den durchgehenden Talweg. Im Oberwasser liegt die Sohle zwischen 198,35 und 208,46 m, im Unterwasser zwischen 194,06 und 204,42 m. Die Peildaten des Oberwassers reichen weiter flussaufwärts als das DGM1. Die vollständige Sohle des Staureaums dient später der Volumenberechnung in Abschnitt 3.1.2.

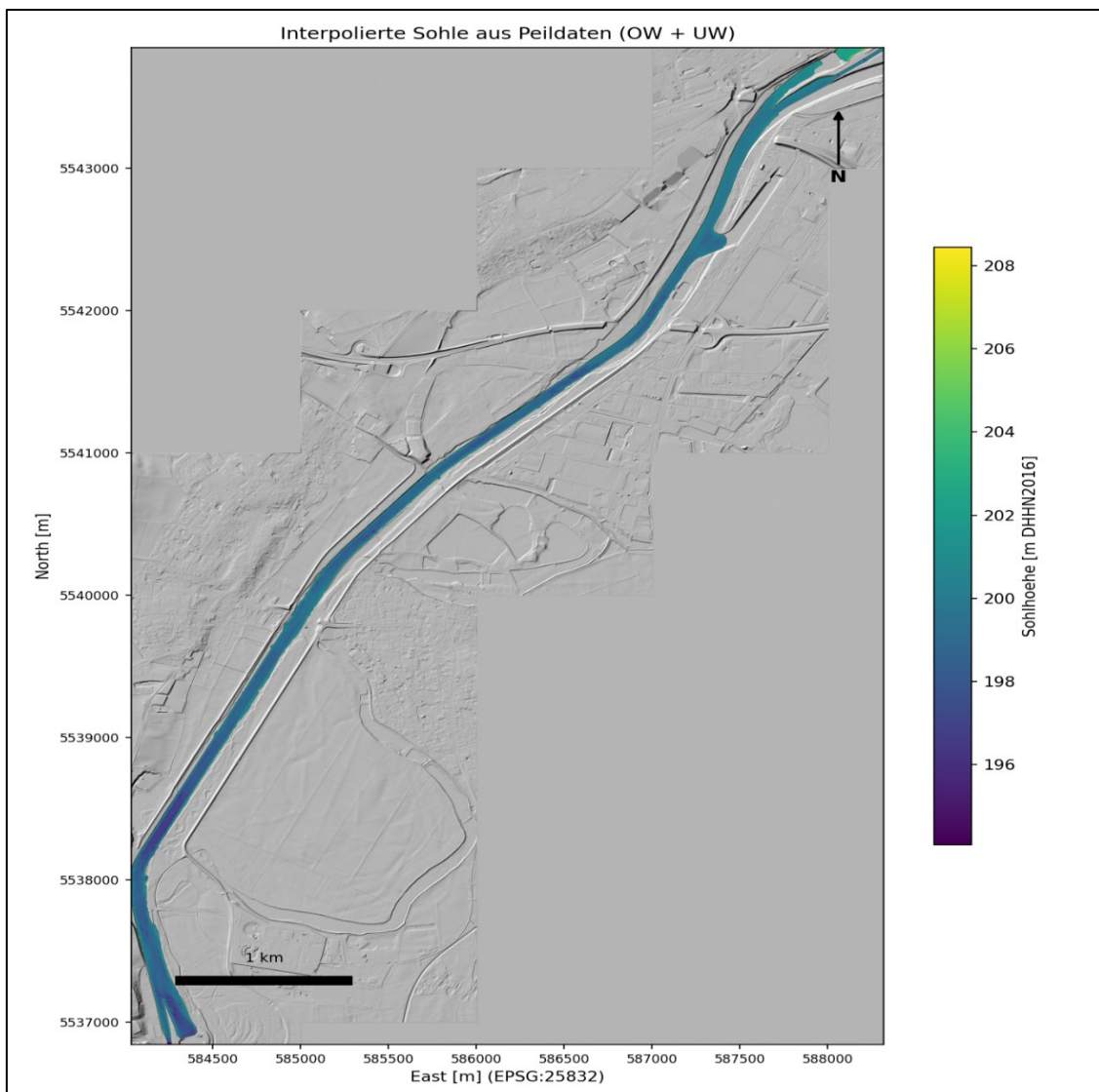


Abbildung 3.2: Aus den Peildaten abgeleitete Gewässersohle für Ober- und Unterwasser. Die überlagerte Schummerung stammt aus dem DGM1. (Quelle: Eigene Darstellung.)

Für das durchgehende Modell werden beide Datensätze miteinander verschnitten. Außerhalb der Wasseroberfläche gilt die Höhe des DGM1, innerhalb der Wasseroberfläche die Sohle aus den Peildaten. An der Staustufe überlappen sich Ober- und Unterwasser auf einem schmalen Streifen, wo der Mittelwert beider Sohlflächen gebildet wird. Gegenüber dem DGM1 liegt die eingesetzte Sohle im Mittel 3,94 m tiefer. Dieser Betrag entspricht der natürlichen Tiefe des Flussbetts, ein Höhengsprung an der Uferlinie entsteht dadurch nicht. Abbildung 3.4 zeigt das fertige Geländemodell mit der nahtlos eingebetteten Stromrinne. Der Flusslauf ist von Schweinfurt bis Garstadt vollständig abgebildet. Abbildung 3.3 vergrößert einen Abschnitt in der Flussmitte und macht die Qualität der Naht sichtbar. Die farbige Sohle geht an beiden Ufern ruhig in das trockene Gelände über, während Dämme und Wege klar sichtbar bleiben. Ein künstlicher Absatz ist nicht zu erkennen. Das Modell umfasst 6.000×8.000 Zellen und deckt eine gültige Fläche von rund 20 km² ab. Seine Höhen reichen von 194,06 bis 244,00 m. Damit bildet es die Grundlage für den hydraulischen Modellaufbau in Abschnitt 3.1.4 und für die Berechnung der aufgestauten Wassermenge in Abschnitt 3.1.2. Die wichtigsten Eingangsdaten und Ergebnisse des Modells sind abschließend in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

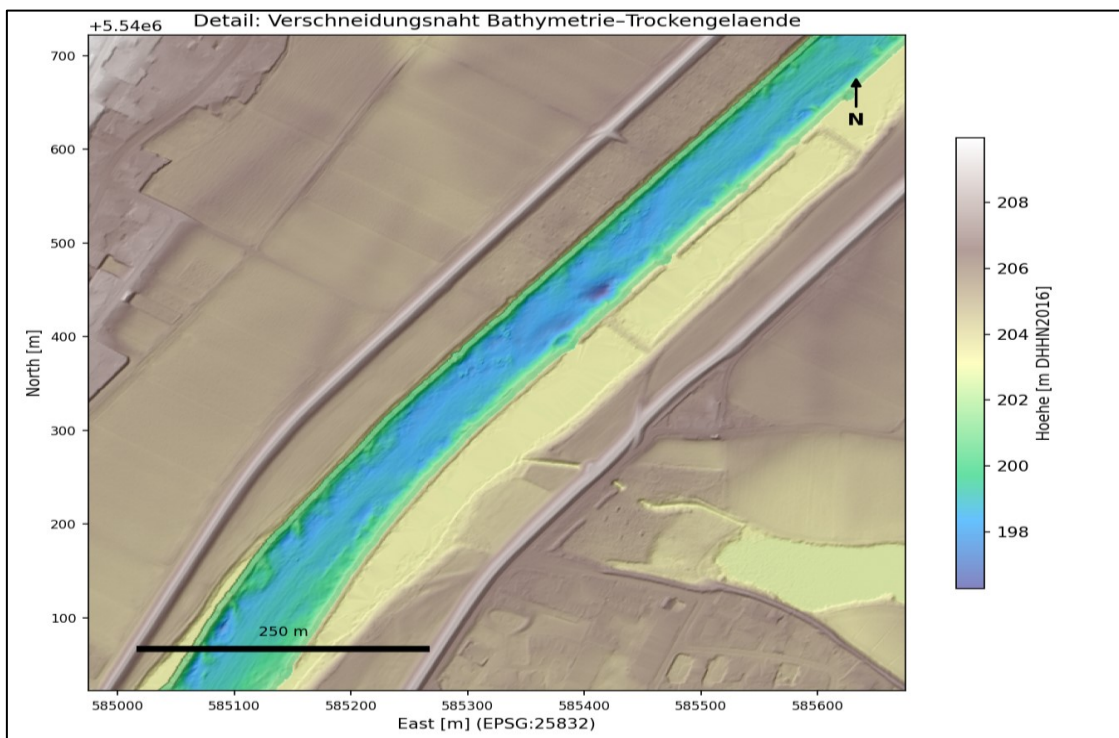


Abbildung 3.3: Vergrößerter Ausschnitt aus dem mittleren Flussabschnitt. (Quelle: Eigene Darstellung.)

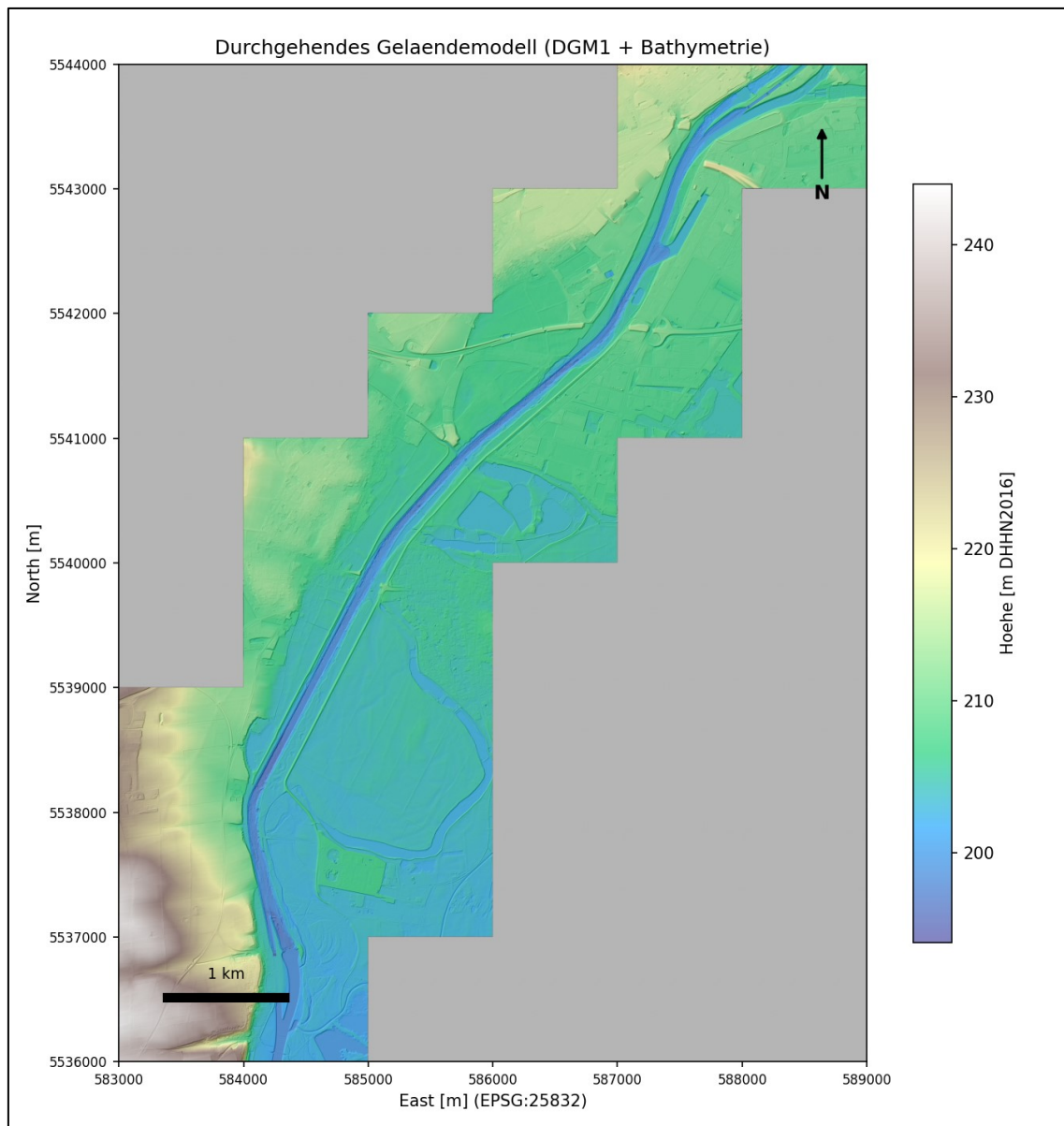


Abbildung 3.4: Durchgehendes Geländemodell aus DGM1 und Bathymetrie. (Quelle: Eigene Darstellung.)

Tabelle 3.1: Kennwerte des durchgehenden Geländemodells (Quelle: Eigene Darstellung.)

Größe	Wert
Lagebezug / Höhenbezug	ETRS89 UTM 32N (EPSG:25832) / DHHN2016
Auflösung	1 m
DGM1-Kacheln	20 (je 1 km ²)
Peilpunkte Oberwasser	850.043
Peilpunkte Unterwasser	688.131
Sohle Oberwasser	198,35-208,46 m
Sohle Unterwasser	194,06-204,42 m
Modellhöhen (min–max)	194,06-244,00 m
Rasterrahmen	6.000 × 8.000 Zellen
Gültige Modellfläche	rund 20 km ²

3.1.2 Berechnung der aufgestauten Wassermenge

Bei einem Versagen der Staustufe wird das im Oberwasser aufgestaute Wasser schlagartig freigesetzt. Dieses Volumen bestimmt maßgeblich die Höhe und die Ausbreitung der Schwallwelle im Unterwasser. Es ist damit die zentrale Eingangsgröße für die spätere Flutsimulation. Die Wassermenge wird hydrostatisch aus der Gewässersohle und dem Wasserspiegel bestimmt. Die Sohle stammt aus den Peildaten des Oberwassers (Abschnitt 3.1.1). Für jede Rasterzelle ergibt sich die Wassertiefe aus der Differenz zwischen Wasserspiegel und Sohle. Das Volumen ist die Summe dieser Tiefen multipliziert mit der Zellfläche von einem Quadratmeter.

Der Berechnung liegen mehrere Annahmen zugrunde. Der Wasserspiegel wird als horizontale Fläche angenommen, da das Gefälle im Stauraum sehr gering ist. Ein zusätzlicher Zufluss aus einem Hochwasser bleibt hier unberücksichtigt. Betrachtet wird allein das statisch aufgestaute Volumen. Die Berechnung erfolgt für zwei Wasserstände. Der erste ist das Stauziel bei 207,64 m. Der zweite ist der sommerliche Höchststau bei 207,94 m. Der Höchststau bildet den ungünstigsten Fall ab und liefert das größte freisetzbare Volumen.

Beim Stauziel beträgt das aufgestaute Volumen rund 3,49 Mio. m³. Die überstaute Fläche umfasst 0,98 km². Die mittlere Wassertiefe liegt bei 3,56 m und die größte Tiefe bei 9,29

m. Beim Höchststau steigt das Volumen auf rund 3,78 Mio. m³. Der um 0,30 m höhere Wasserstand fügt somit etwa 0,29 Mio. m³ hinzu. Abbildung 3.5 zeigt die Verteilung der Wassertiefe beim Stauziel. Die größten Tiefen treten in der Fahrrinne und vor dem Wehr auf, während das Wasser zu den Ufern hin flach ausläuft. Tabelle 3.2 fasst die Volumenkennwerte für beide Wasserstände zusammen.

Tabelle 3.2: Aufgestautes Volumen bei Stauziel und Höchststau (Quelle: Eigene Darstellung.)

Wasserstand	Fläche	Volumen	mittlere Tiefe	größte Tiefe
Stauziel 207,64 m	0,98 km ²	3,49 Mio. m ³	3,56 m	9,29 m
Höchststau 207,94 m	0,98 km ²	3,78 Mio. m ³	3,86 m	9,59 m

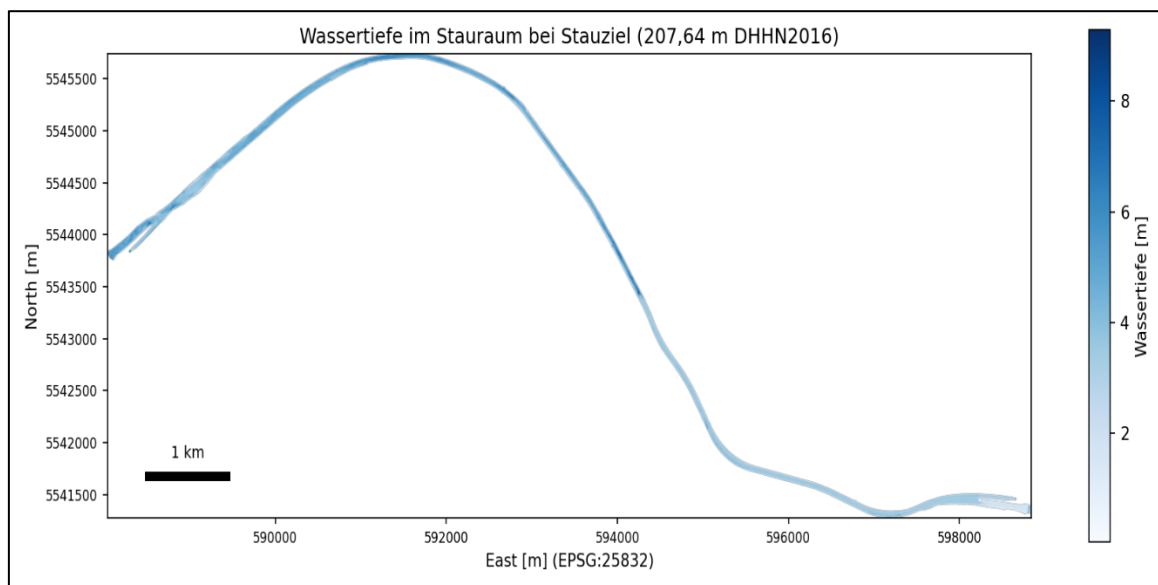


Abbildung 3.5: Wassertiefe im Stauraum beim Stauziel (207,64 m). (Quelle: Eigene Darstellung.)

Ergänzend wird die Beziehung zwischen Wasserstand, Fläche und Volumen über den gesamten Höhenbereich bestimmt. Die Stauraumkennlinie wird durch eine rasterbasierte Volumenberechnung aus dem durchgehenden Geländemodell abgeleitet. Für jeden Wasserstand werden die überstauten Rasterzellen bestimmt. Das Volumen ergibt sich aus der Summe der Wassertiefen dieser Zellen multipliziert mit der Zellfläche, die überstaute Fläche aus ihrer Anzahl. Diese Berechnung entspricht dem QGIS-Werkzeug „Raster Surface Volume“ und wurde in der QGIS- bzw. OSGeo4W-Umgebung mit GDAL-

gestützter Rasterverarbeitung durchgeführt. Abbildung 3.6 stellt diese Stauraumkennlinie dar. Das Volumen wächst mit steigendem Wasserstand stetig an. Die überstaute Fläche nimmt zunächst rasch zu und erreicht oberhalb von etwa 207,0 m ihren vollen Wert von rund 0,98 km². Ab diesem Punkt füllt das Wasser die gesamte Breite des Stauraums aus und ein weiterer Anstieg vergrößert vor allem die Tiefe. Die Kennlinie beschreibt das Speicherverhalten des Oberwassers vollständig. Sie dient im Abschnitt 3.1.4 unmittelbar als Grundlage für die Speicherzelle des hydraulischen Modells.

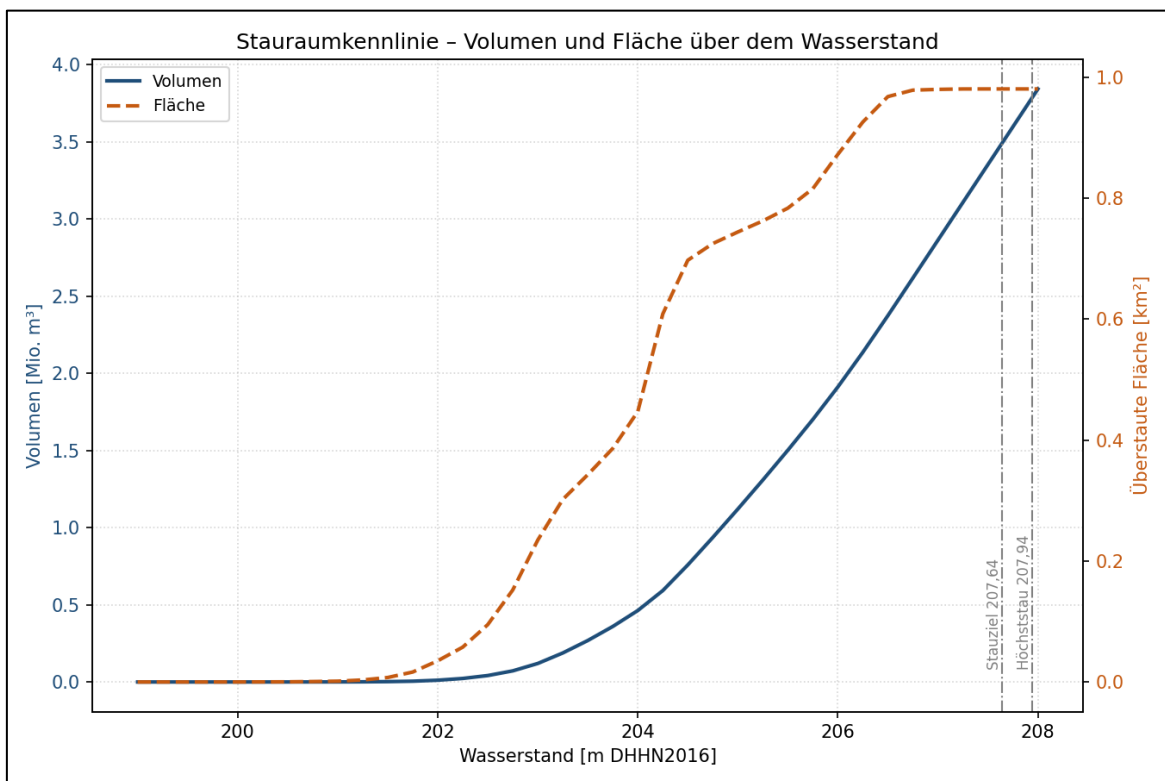


Abbildung 3.6: Stauraumkennlinie mit Volumen und Fläche über dem Wasserstand.
(Quelle: Eigene Darstellung.)

Die berechnete Wasserfläche stützt sich auf den vermessenen Bereich der Sohle. Zu den Ufern hin geht die Wassertiefe gegen null, sodass nicht vermessene flache Randstreifen kaum zum Volumen beitragen. Der Vergleich der beiden Wasserstände bestätigt die Berechnung. Der Zuwachs von 0,29 Mio. m³ entspricht genau der überstaute Fläche multipliziert mit der Spiegeldifferenz von 0,30 m. Das aufgestaute Volumen steht damit als belastbare Eingangsgröße für die Simulation der einzelnen Versagensszenarien zur Verfügung.

3.1.3 Festlegung der Breschenweiten und Sohlhöhen

Das Versagen der Staustufe wird über vier Szenarien beschrieben. Jedes Szenario steht für den Bruch eines Bauwerksteils. Betrachtet werden die Schiffsschleuse, das Wasserkraftwerk, die Wehranlage mit Sportbootschleuse und die komplette Staustufe. Für jedes Szenario sind eine Breschenweite und eine Sohlhöhe festgelegt. Die Breschenweite gibt die Breite der Öffnung an. Die Sohlhöhe gibt die Höhe der Unterkante an, über die das Wasser abfließt. Beide Werte beruhen auf den Bauwerksdaten der Staustufe Schweinfurt.

Aus Breschenweite und Sohlhöhe ergeben sich die maßgebenden hydraulischen Größen. Die wirksame Überfallhöhe ist die Differenz zwischen dem Wasserspiegel im Oberwasser und der Sohlhöhe der Bresche. Beim Stauziel von 207,64 m reicht sie von 4,50 m an der Schiffsschleuse bis 7,60 m am Wasserkraftwerk. Der Abflussquerschnitt ist das Produkt aus Breschenweite und Überfallhöhe. Er beschreibt die Fläche, über die das aufgestaute Wasser in das Unterwasser gelangt. An der Schiffsschleuse beträgt er rund 54 m². An der kompletten Staustufe erreicht er rund 1.186 m². Tabelle 3.3 fasst die Werte für alle vier Szenarien zusammen.

Tabelle 3.3: Breschenweiten, Sohlhöhen und abgeleitete hydraulische Kennwerte der vier Szenarien (Quelle: Eigene Darstellung)

Szenario	Breschenweite	Sohlhöhe	wirksame Überfallhöhe (Stauziel)	Abflussquerschnitt (Stauziel)
Schiffsschleuse	12 m	203,14 m	4,50 m	54 m ²
Wasserkraftwerk	26 m	200,04 m	7,60 m	198 m ²
Wehr + Sportbootschleuse	70 m	202,14 m	5,50 m	385 m ²
Komplette Staustufe	156 m	200,04 m	7,60 m	1.186 m ²

Abbildung 3.7 stellt die vier Breschen maßstäblich gegenüber. Jede Öffnung ist als Rechteck von der jeweiligen Sohlhöhe bis zum Stauziel dargestellt. Die Breite entspricht der Breschenweite und die Höhe der Überfallhöhe. Auf diese Weise wird der Abflussquerschnitt unmittelbar sichtbar. Die Schiffsschleuse bildet mit schmaler Breite und geringer Höhe den kleinsten Querschnitt. Das Wasserkraftwerk ist ebenfalls schmal, reicht mit seiner tiefen Sohle aber weit hinab. Die Wehranlage mit Sportbootschleuse ist deutlich

breiter. Die komplette Staustufe vereint große Breite und große Tiefe und besitzt damit den mit Abstand größten Querschnitt. Die eingezeichnete Linie des Höchststaus zeigt, dass ein um 0,30 m höherer Wasserstand alle Querschnitte nur geringfügig vergrößert. Die Breschenweiten, die Sohlhöhen und die daraus abgeleiteten Querschnitte bilden zusammen mit dem Geländemodell und der aufgestauten Wassermenge die vollständige Grundlage für die Simulation der einzelnen Versagensszenarien.

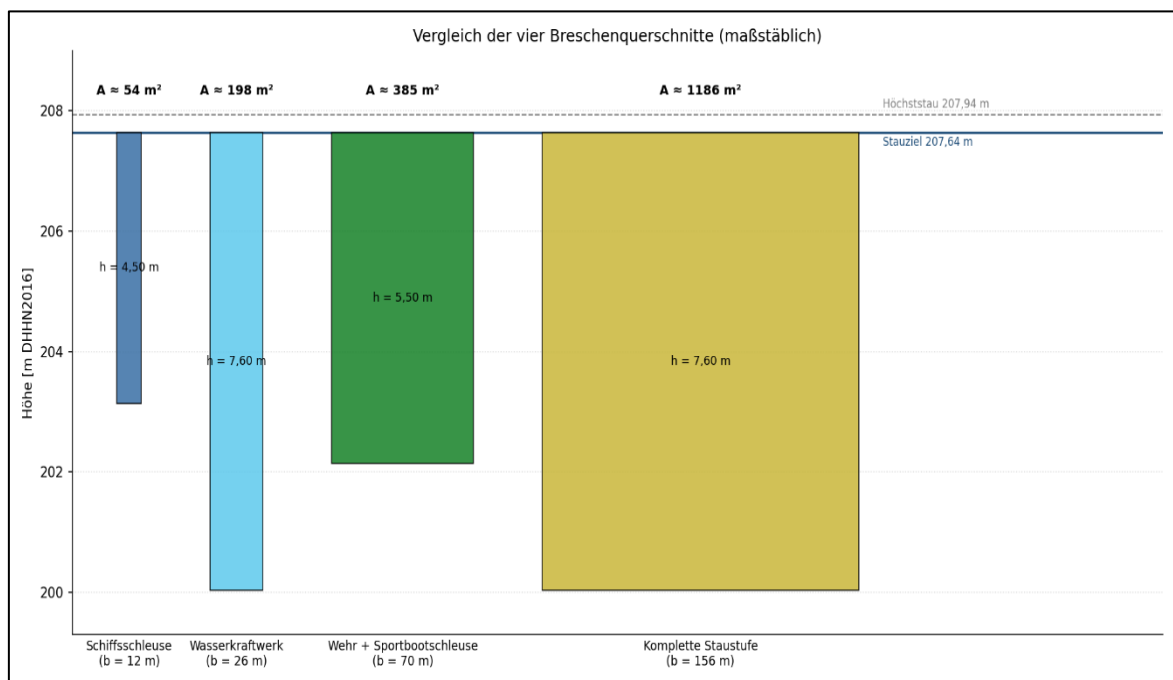


Abbildung 3.7: Maßstäblicher Vergleich der vier Breschenquerschnitte. (Quelle: Eigene Darstellung)

3.1.4 Aufbau des GIS-gestützt hydraulischen Modells

Das hydraulische Modell wird in HEC-RAS als gekoppeltes System aufgebaut. Das Oberwasser bildet dabei eine Speicherzelle, das Unterwasser ein zweidimensionales Rechengebiet. Beide Teile sind über die Bresche miteinander verbunden. Diese Aufteilung bildet den physikalischen Ablauf des Versagens ab. Der aufgestaute Staupraum entleert sich durch die Bresche schlagartig in den nachgeordneten Flussabschnitt. Der Ansatz folgt dem etablierten Vorgehen für gekoppelte Speicher-2D-Modelle (USACE, 2014). Abbildung 3.8 zeigt den Gesamtaufbau des Modells. Der Staupraum „Oberwasser“ folgt dem Main nach Nordosten, während das 2D-Gebiet „Unterwasser“ den Talraum von

Schweinfurt bis Garstadt überdeckt. Der kurze dunkle Querriegel an der Staustufe markiert die Bresche, über die beide Bereiche gekoppelt sind.

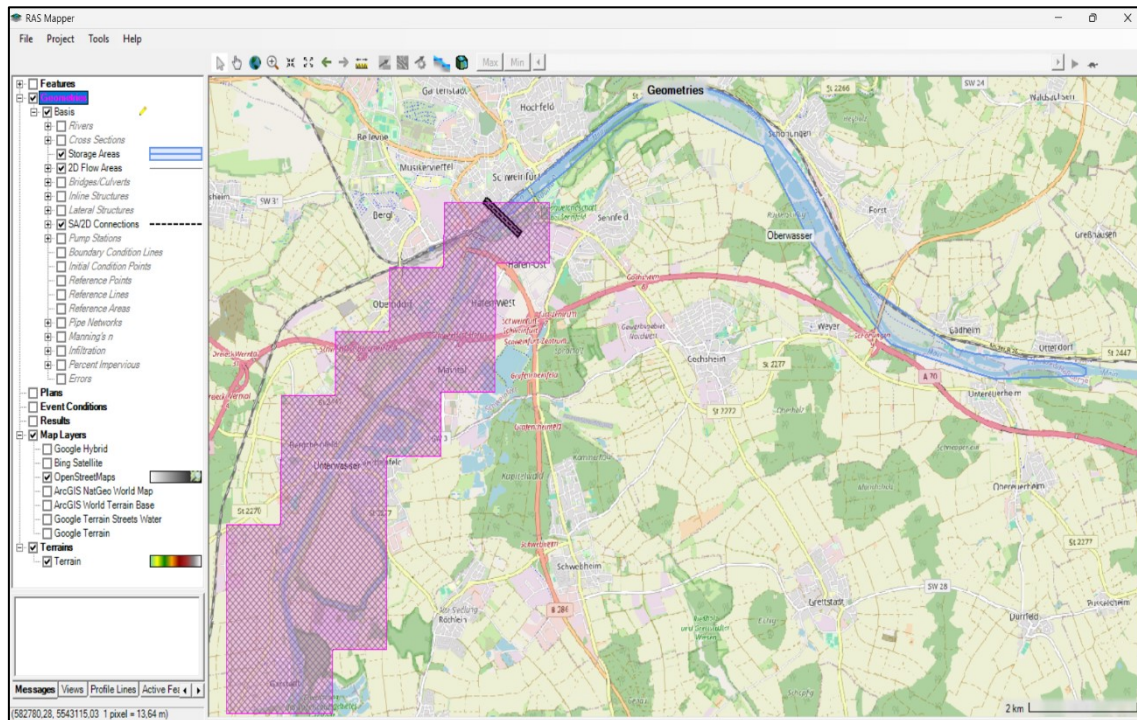


Abbildung 3.8: Gesamtaufbau des gekoppelten Modells mit Speicherzelle (Oberwasser), 2D-Gebiet (Unterwasser) und Bresche. (Quelle: Eigene Darstellung; Software HEC-RAS, Kartengrundlage OpenStreetMap-Mitwirkende.)

Als Geländegrundlage dient das durchgehende Geländemodell aus Abschnitt 3.1.1. Es bildet das geometrische Rückgrat des gesamten Modells. Für jede Rechenzelle liefert es die Höhe von Sohle und Ufergelände. Damit beruhen sowohl das Speichervolumen des Oberwassers als auch die Ausbreitung der Welle im Unterwasser auf derselben Höhengrundlage. Das Modell wird in HEC-RAS als Terrain eingebunden und behält seine Auflösung von einem Meter. Diese einheitliche Grundlage stellt sicher, dass Stauraum und Überflutungsraum ohne Bruch aneinander anschließen.

Das Oberwasser wird als Speicherzelle abgebildet. Es liegt überwiegend flussaufwärts der eigentlichen Überflutungsstrecke und wirkt im Versagensfall als Wasserreservoir. Eine flächenhafte 2D-Berechnung ist hier nicht erforderlich, da das Gefälle im Stauraum sehr gering ist und der Wasserspiegel näherungsweise waagrecht bleibt. Der Wassergehalt folgt daher der Stauraumkennlinie aus Abschnitt 3.1.2, die als Beziehung zwischen

Wasserstand und Volumen hinterlegt ist. Der Stauraum verhält sich damit als Level-Pool-Speicher, dessen Wasserstand sich beim Ausströmen gleichmäßig absenkt. Als Anfangswasserstand der Simulationen wird der Höchststau von 207,94 m als ungünstigster Fall verwendet. Das Stauziel von 207,64 m dient als Referenz für die Volumenberechnung in Abschnitt 3.1.2. Abbildung 3.9 zeigt die Ausdehnung der Speicherzelle, die dem aufgestauten Main von der Staustufe Schweinfurt über Schonungen bis in den Bereich von Gädheim folgt.

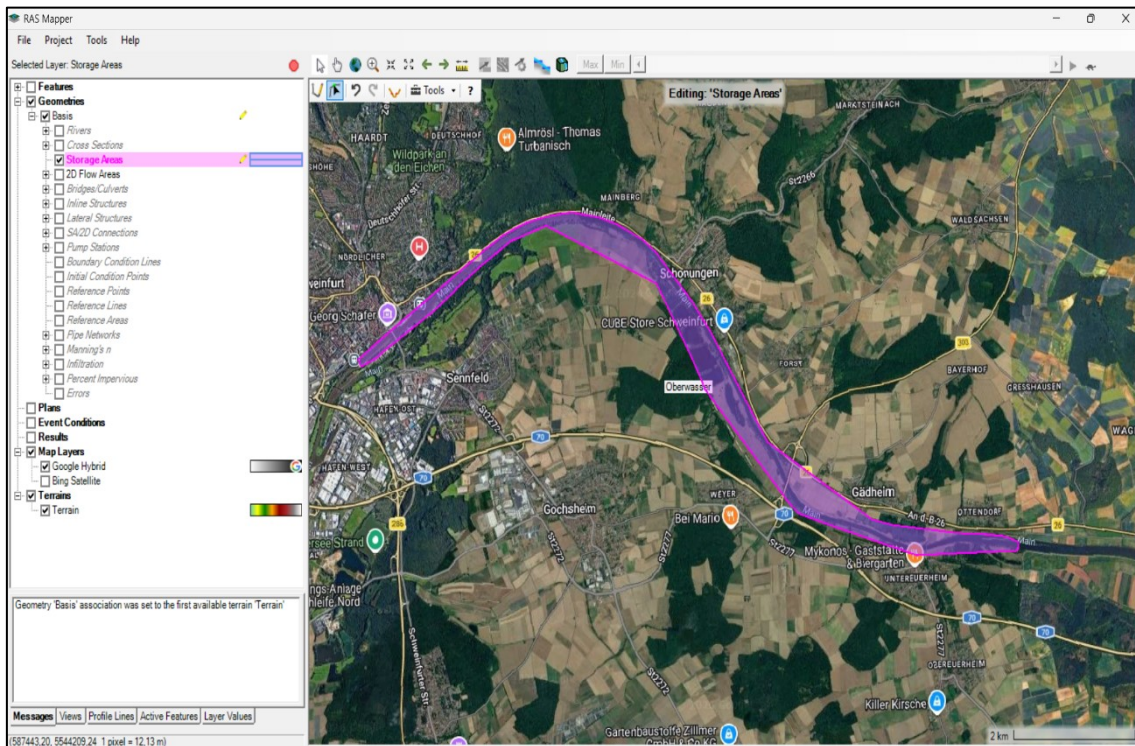


Abbildung 3.9: Ausdehnung der Speicherzelle Oberwasser entlang des aufgestauten Mains. (Quelle: Eigene Darstellung; Software HEC-RAS, Kartengrundlage Google.)

Das Unterwasser wird als zweidimensionales Rechengebiet abgebildet. Hier ist die flächenhafte Berechnung maßgeblich, denn erst sie liefert die räumliche Ausdehnung der Überflutung sowie die Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten. Das Gebiet umfasst den Talraum von Schweinfurt bis Garstadt mit einer Fläche von rund 19 km². Das Rechennetz besitzt eine Zellweite von 20 m, woraus sich rund 46.500 Zellen mit einer mittleren Zellfläche von 400 m² ergeben. Abbildung 3.10 zeigt dieses Netz über dem Luftbild sowie die zugehörigen Kennwerte im Editor. Die gewählte Zellweite bildet den Talraum

ausreichend genau ab und hält zugleich den Rechenaufwand vertretbar. Bei Bedarf lässt sich das Netz im Bereich der Bresche später durch zusätzliche Bruchkanten verfeinern.

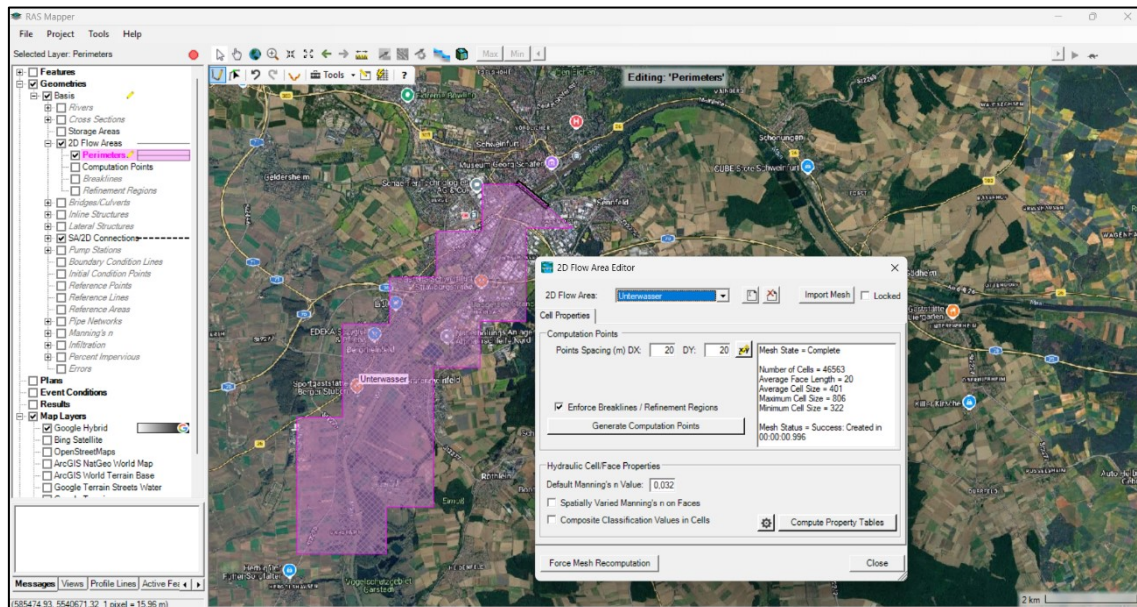


Abbildung 3.10: 2D-Rechnetz des Unterwassers mit einer Zellweite von 20 m und rund 46.500 Zellen. (Quelle: Eigene Darstellung; Software HEC-RAS, Kartengrundlage Google.)

Die Oberflächenrauheit wird über Manning-Beiwerte berücksichtigt. Sie steuert den Fließwiderstand und beeinflusst damit die Geschwindigkeit und die Ausbreitung der Welle im Unterwasser. Die Beiwerte werden aus der Landnutzung abgeleitet, die als amtlicher Datensatz der tatsächlichen Nutzung vorliegt (Bayerische Vermessungsverwaltung, 2025). Jeder Nutzungsart wird ein Manning-Wert zugeordnet und dem 2D-Gebiet flächenhaft zugewiesen. Die verwendeten Beiwerte reichen von 0,025 für versiegelte Verkehrsflächen bis 0,120 für Wald und sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst. Abbildung 3.11 zeigt die räumliche Verteilung im Untersuchungsgebiet. Landwirtschaftliche Flächen und Grünland prägen weite Teile der Talaue, während die bebauten Bereiche von Schweinfurt und den umliegenden Ortschaften höhere Beiwerte aufweisen. Die eigentliche Stromrinne erhält einen Wert von 0,032, der einem naturnahen Flussbett entspricht.

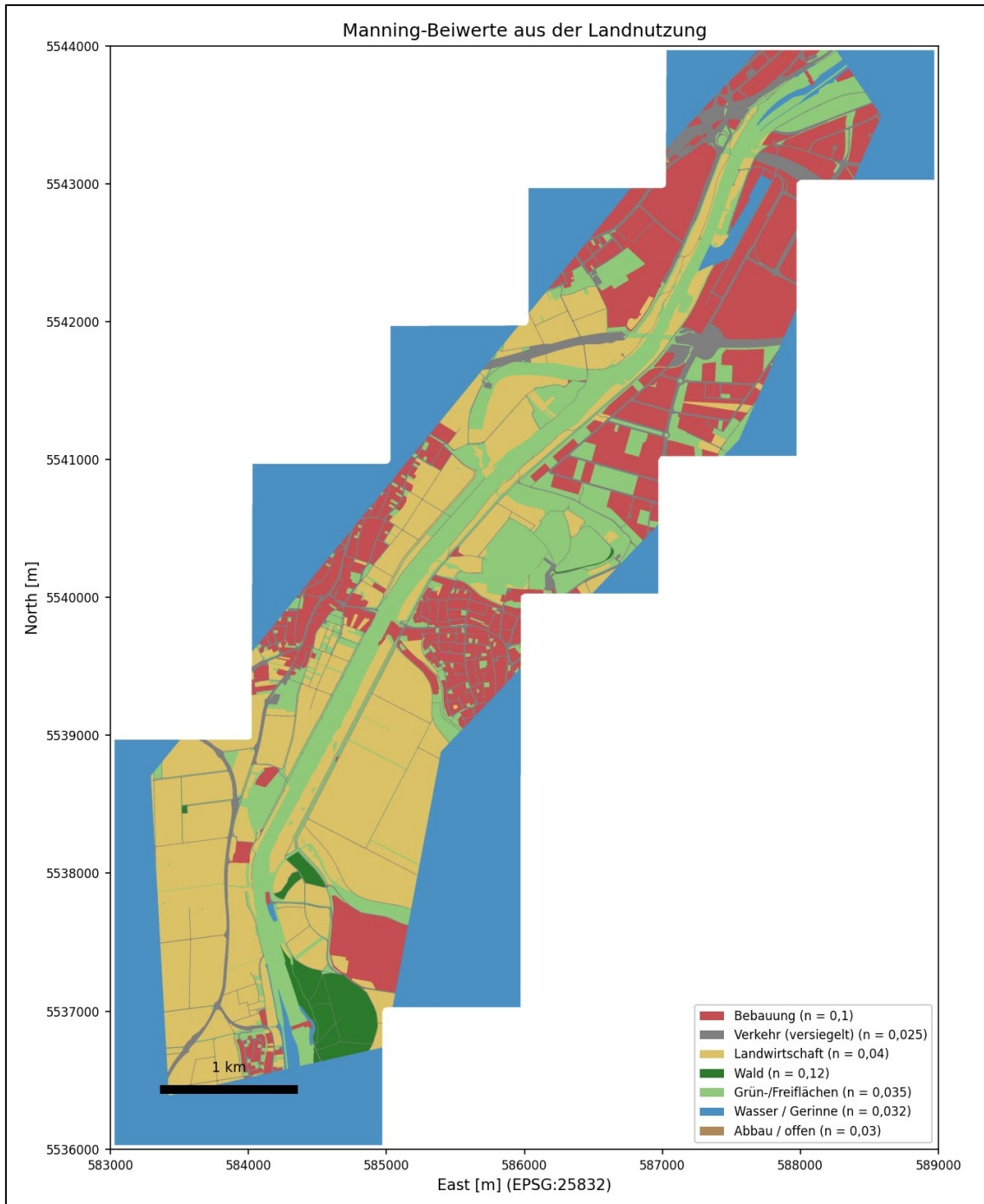


Abbildung 3.11: Räumliche Verteilung der Manning-Beiwerte im 2D-Gebiet, abgeleitet aus der Landnutzung. (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage Bayerische Vermessungsverwaltung, 2025.)

Tabelle 3.4: Manning-Beiwerte je Landnutzungs-kategorie (Quelle: Eigene Darstellung)

Landnutzung	Manning n
Versiegelter Verkehr (Straßen, Wege, Bahn)	0,025
Wasser / Stromrinne	0,032
Grün- und Freiflächen	0,035
Landwirtschaft	0,040
Bebauung (Wohnen, Gewerbe, Industrie u. a.)	0,100
Wald	0,120

Die Bresche wird als Verbindung zwischen Speicherzelle und 2D-Gebiet an der Staustufe Schweinfurt angeordnet. Sie stellt die Öffnung dar, durch die das Wasser im Versagensfall vom Oberwasser in das Unterwasser gelangt. Ihre Lage ist in Abbildung 3.8 als Querriegel im Bereich der Staustufe erkennbar. Für jedes der vier Szenarien werden die in Abschnitt 3.1.3 festgelegte Breschenweite und Sohlhöhe übernommen, sodass sich die Szenarien allein in der Geometrie der Bresche unterscheiden. Da ein technisches Versagen betrachtet wird, wird ein schlagartiges Öffnen der Bresche angenommen und die Breschenbildungszeit nahezu null gesetzt. Diese Annahme entspricht dem plötzlichen Versagen eines massiven Betonbauwerks, das nicht wie ein Erddamm allmählich erodiert.

Die Randbedingungen bilden den hydrostatischen Ausgangszustand ab. Am oberen Rand wird kein Zufluss angesetzt, sodass allein das aufgestaute Volumen freigesetzt wird und ein überlagerndes Hochwasser unberücksichtigt bleibt. Am unteren Rand bei Garstadt wird eine Normalabfluss-Randbedingung verwendet, über die die Welle das Rechengebiet verlassen kann, ohne künstlich aufgestaut zu werden. Zu Beginn der Berechnung ist die Speicherzelle bis zum Stauziel gefüllt, während das 2D-Gebiet trocken ist. Erst mit dem Öffnen der Bresche setzt die Strömung ein. Diese Festlegung bildet den ungünstigen, aber klar definierten Ausgangszustand des reinen Stauraumversagens ab.

Die Berechnung erfolgt instationär, da sich Wasserstände und Geschwindigkeiten während des Versagens rasch ändern. Der Rechenzeitschritt wird so klein gewählt, dass die Courant-Bedingung eingehalten wird. Für Dammbrechberechnungen wird hierfür ein Wert von höchstens eins empfohlen (USACE, 2014). Damit bleibt die Berechnung stabil und die schnelle Wellenfront wird zeitlich ausreichend aufgelöst. Die Simulationsdauer

wird so lang gewählt, dass die Schwallwelle den Bereich Garstadt vollständig durchlaufen hat. Die Ergebnisse werden in festen Zeitabständen ausgegeben, um den zeitlichen Verlauf der Überflutung auswerten zu können. Mit diesem Aufbau werden die vier Versagensszenarien in Abschnitt 3.2 nacheinander simuliert. Tabelle 3.5 fasst die wesentlichen Modellparameter zusammen.

Tabelle 3.5: Wesentliche Parameter des hydraulischen Modells (Quelle: Eigene Darstellung)

Komponente	Festlegung
Terrain	durchgehendes Geländemodell, 1 m, DHHN2016 (Abschnitt 3.1.1)
Oberwasser	Speicherzelle, Level-Pool, Wasserstand-Volumen aus Stauraumkennlinie
Anfangswasserstand	207,94 m (Höchststau; Stauziel 207,64 m als Referenz)
Unterwasser	2D-Gebiet, rund 19 km ² , Zellweite 20 m, rund 46.500 Zellen
Rauheit	aus Landnutzung abgeleitet, $n = 0,025-0,120$ (Tabelle 3.4)
Bresche	SA/2D-Verbindung, Weite und Sohlhöhe je Szenario (Tabelle 3.3), schlagartig
Oberer Rand	kein Zufluss (hydrostatisch)
Unterer Rand	Normalabfluss bei Garstadt
Berechnung	instationär, Zeitschritt nach Courant-Bedingung (höchstens eins)

3.2 Simulation des Staustufenversagens

Der folgende Abschnitt stellt die Ergebnisse der Überflutungssimulationen für die vier Versagensszenarien der Staustufe Schweinfurt vor. Nacheinander werden das Versagen der Schiffsschleuse, des Wasserkraftwerks, der Wehranlage mit Sportbootschleuse und der kompletten Staustufe betrachtet und hinsichtlich der Überflutungsfläche und der Schwallwellenhöhe im Unterwasser ausgewertet.

3.2.1 Vorgehen bei der Simulation und Überblick über die Ergebnisse

Für jedes Szenario wird zunächst die Breschenganglinie bestimmt und anschließend als Randbedingung in das zweidimensionale Modell eingespeist. Die Ganglinie beschreibt den zeitlichen Verlauf des Abflusses durch die Bresche. Sie wird nach dem Überfallgesetz von Poleni berechnet und über die Stauraumkennlinie aus Abschnitt 3.1.2 zeitabhängig begrenzt. Dadurch entspricht das insgesamt freigesetzte Volumen genau dem im Oberwasser gespeicherten Wasser. Der Grund für dieses Vorgehen liegt im Verhalten der direkten Kopplung. Bei einer unmittelbaren Verbindung von Speicherzelle und 2D-

Gebiet über die Bresche traten bei den großen Öffnungen erhebliche Abweichungen in der Wasserbilanz auf. Der übertragene Abfluss und die tatsächliche Absenkung des Stau-raums stimmten dann nicht überein. Die vorgeschaltete Berechnung der Ganglinie vermeidet dieses Problem, weil das freizusetzende Volumen bereits aus der Speicherkennlinie festgelegt ist. Das 2D-Modell löst anschließend nur noch die Ausbreitung der Welle im Unterwasser. Dieses Vorgehen trennt somit die Volumenerhaltung an der Breschenstelle von der Ausbreitungsrechnung im Unterwasser.

Die Geometrie der Bresche wird für jedes Szenario im Bruchdaten-Editor von HEC-RAS festgelegt. Abbildung 3.12 zeigt diese Eingabe am Beispiel der kompletten Staustufe. Eingetragen werden die Breschenweite, die Sohlhöhe der Bresche und der Ausgangswasserstand. Für die komplette Staustufe betragen diese Werte 156 m, 200,04 m und 207,94 m. Der Überfallbeiwert der Bresche wird mit 1,44 angesetzt, was einem breitkronigen Wehr entspricht. Dieser Wert entspricht dem Überfallbeiwert μ von 0,60 aus der Poleni-Formel in der von HEC-RAS verwendeten Schreibweise. Die Breschenbildungszeit wird mit 0,01 Stunden nahezu null gesetzt, da ein schlagartiges Versagen des massiven Betonbauwerks angenommen wird. Als Versagensart wird ein Überströmen gewählt. Aus diesen Angaben ergibt sich für jedes Szenario der zeitliche Verlauf des Breschenabflusses. Die übrigen drei Szenarien werden mit den in Abschnitt 3.1.3 festgelegten Weiten und Sohlhöhen auf die gleiche Weise beschrieben.

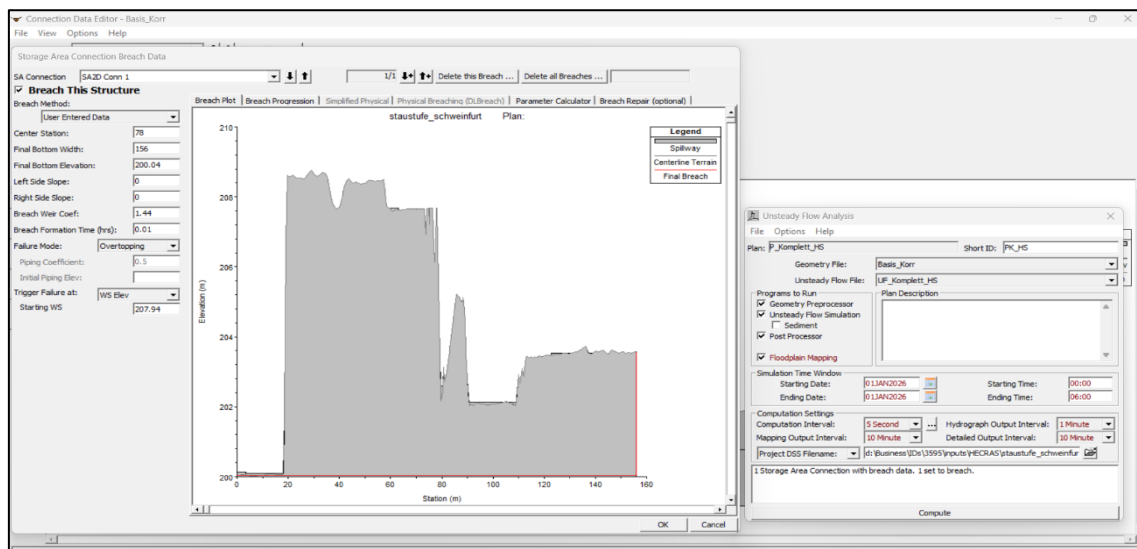


Abbildung 3.12: Eingabe der Breschengeometrie im Bruchdaten-Editor am Beispiel der kompletten Staustufe. (Quelle: Eigene Darstellung; Software HEC-RAS.)

Abbildung 3.13 zeigt die vier Breschenganglinien im Vergleich. Der Abfluss steigt in allen Fällen innerhalb weniger Minuten steil an. Danach klingt er mit sinkendem Stau-raumspiegel wieder ab. Die Höhe und die Steilheit des Scheitels hängen von der Breite und der Sohlhöhe der jeweiligen Bresche ab. Eine breite und tief liegende Bresche wie bei der kompletten Staustufe erzeugt einen sehr hohen und kurzen Scheitel. Eine schmale und hoch liegende Bresche wie bei der Schiffsschleuse erzeugt einen niedrigen und lang gestreckten Verlauf. Die Fläche unter jeder Ganglinie entspricht dem freigesetzten Volumen des jeweiligen Szenarios. Damit ist die Massenerhaltung bereits in der Randbedingung sichergestellt. Die Ganglinien bilden so die gemeinsame Grundlage für alle vier Simulationen.

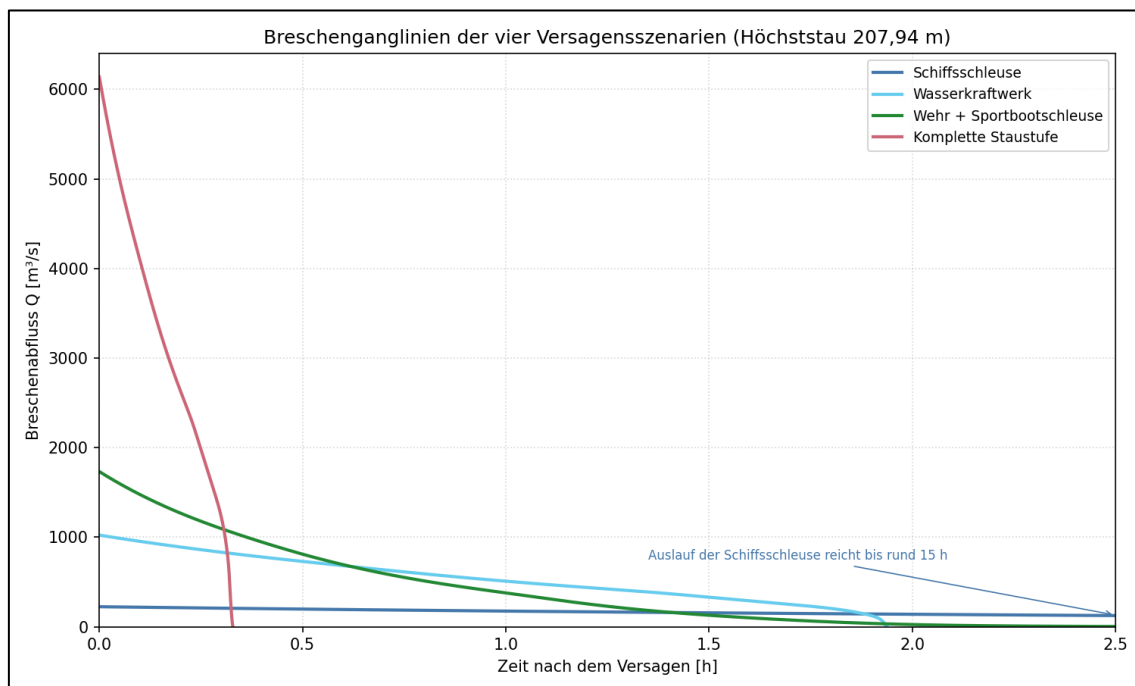


Abbildung 3.13: Breschenganglinien der vier Versagensszenarien beim Höchststau. (Quelle: Eigene Darstellung.)

Die Ganglinie wird der Bresche als Zuflussrandbedingung an der Nordostgrenze des 2D-Gebietes zugewiesen. Abbildung 3.14 zeigt die Lage der Bresche und der Randbedingungslinien an der Staustufe Schweinfurt im RAS Mapper. Die Randbedingung liegt genau an der Stelle des Bauwerks, an der das Wasser in das Unterwasser eintritt. Am unteren

Rand bei Garstadt wirkt weiterhin die Normalabfluss-Randbedingung, über die die Welle das Gebiet verlassen kann. Alle Läufe starten mit dem Höchststau von 207,94 m als ungünstigstem Fall. Der Flussschlauch des Unterwassers ist zu Beginn bis zum Stauziel des Unterwassers von 202,97 m gefüllt. Erst mit dem Einsetzen der Ganglinie beginnt die eigentliche Überflutung. Diese Festlegung bildet den ungünstigen, aber klar definierten Ausgangszustand des reinen Stauraumversagens ab.

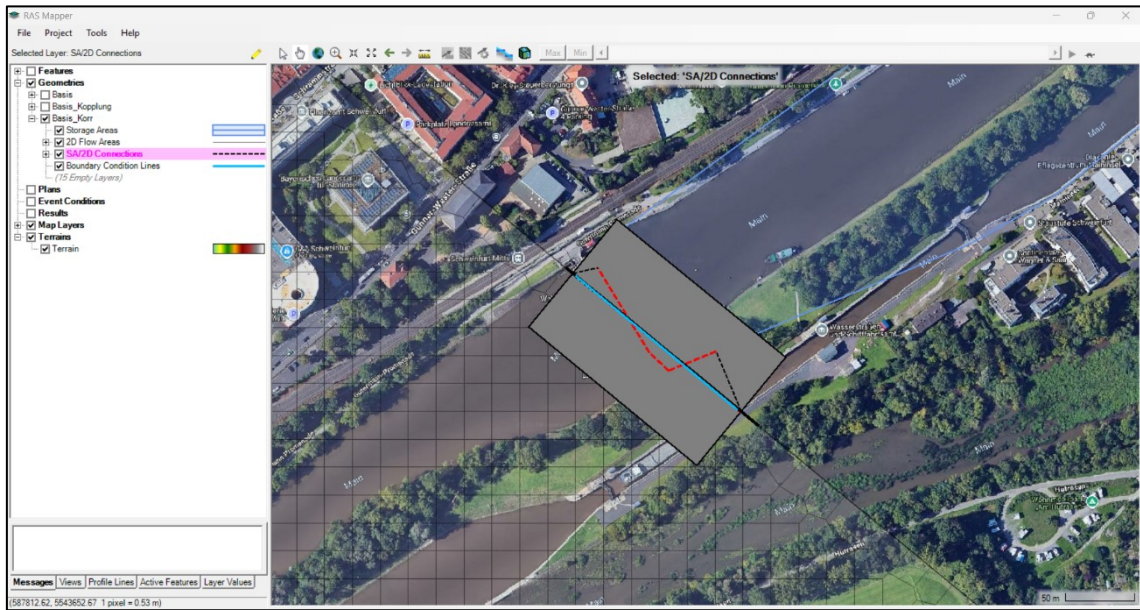


Abbildung 3.14: Lage der Bresche und der Randbedingungslinien an der Staustufe Schweinfurt. (Quelle: Eigene Darstellung; Software HEC-RAS, Kartengrundlage Google.)

Die Berechnung erfolgt instationär mit den vollständigen Flachwassergleichungen. Diese bestehen aus der Kontinuitätsgleichung und den beiden Impulsgleichungen. Die Kontinuitätsgleichung beschreibt die Massenerhaltung (US Army Corps of Engineers, 2016).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q \quad (3.1)$$

Die Impulsgleichungen beschreiben die Erhaltung des Impulses in x- und y-Richtung.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v - f u \quad (3.3)$$

Der Bodenreibungsbeiwert wird über die Manning-Formel bestimmt.

$$c_f = \frac{gn^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3.4)$$

Darin bezeichnen H den Wasserspiegel, h die Wassertiefe, u und v die tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten in x - und y -Richtung, g die Erdbeschleunigung, ν_t die turbulente Wirbelviskosität, c_f den Bodenreibungsbeiwert, n den Manning-Beiwert, f den Coriolis-Parameter und q einen Quellterm. Abbildung 3.15 zeigt die zugehörigen Berechnungseinstellungen im 2D-Rechenkern. Als Gleichungssatz wird das Verfahren SWE-ELM verwendet, das auch bei schnellen Wellenfronten stabil bleibt. Der Rechenzeitschritt wird klein genug gewählt, um die Courant-Bedingung einzuhalten. Die Wasserstands- und Volumentoleranzen sind eng gesetzt, sodass die iterative Lösung je Zeitschritt sicher konvergiert. Abbildung 3.16 zeigt beispielhaft das Rechenprotokoll des Laufs der kompletten Staustufe. Der dort ausgewiesene Volumenbilanzfehler bleibt sehr klein. Über alle vier Läufe liegt er unter 0,03 Prozent, wie Tabelle 3.6 belegt. Damit sind die Rechnungen numerisch stabil und massenerhaltend und die Ergebnisse können quantitativ ausgewertet werden. Die Simulationen wurden auf einem Notebook mit einem Prozessor AMD Ryzen 7 5800HS (8 Kerne, 16 Threads) und 16 GB Arbeitsspeicher unter Windows 11 durchgeführt. Die Rechenzeit lag je Szenario bei etwa 10 bis 17 Minuten für den gesamten Rechenlauf. Für die zweidimensionale Berechnung nutzt HEC-RAS ausschließlich die CPU, eine GPU-Beschleunigung kommt nicht zum Einsatz.

HEC-RAS Unsteady Computation Options and Tolerances

General | 2D Flow Options | Pipe Systems | 1D/2D Options | Advanced Time Step Control | 1D Mixed Flow Options |

☐ Use Coriolis Effects (not used with Diffusion Wave equation)

Parameter	(Default)	Unterwasser
1 Equation Set	SWE-ELM (original)	SWE-ELM (original)
2 Solver Cores (Max 8P, 0E)	All Available	All Available
3 Number of Time Slices (Integer Value)	1	1
4 Boundary Condition Volume Check	☐	☐
5 Latitude for Coriolis (-90 to 90)		
6 Theta (0.5-1.0)	1	1
Initial Conditions		
1 Initial Conditions Time (hrs)		
2 Initial Conditions Ramp Up Fraction (0-1)	0.1	0.1
3 Theta Warmup (0.5-1.0)	1	1
Convergence		
1 Water Surface Tolerance [max=0.06](m)	0.003	0.003
2 Volume Tolerance (m)	0.003	0.003
3 Maximum Iterations	20	20
4 Advanced Convergence	☐	☐
5 Water Surface Max Tolerance (m)	0.045	0.045
6 Water Surface RMS Tolerance (m)	0.006	0.006
7 Water Surface Stalling Tolerance (%)	1	1
Turbulence		
1 Turbulence Method	None	None
2 Longitudinal Mixing Coefficient	0.3	0.3
3 Transverse Mixing Coefficient	0.1	0.1
4 Smagorinsky Coefficient	0.05	0.05
Solver		
1 Matrix Solver	PARDISO (Direct)	PARDISO (Direct)
2 Convergence Tolerance	0.00001	0.00001
3 Minimum Iterations	3	3
4 Maximum Iterations	30	30
5 Restart Iteration	10	10
6 Relaxation Factor	1.3	1.3
7 SOR Preconditioner Iterations	10	10
Secondary Flow		
1 Secondary Flow Approach	None	None
2 Spiral Intensity Factor	1	1
3 Spiral Intensity Adaptation Length Factor	1	1
4 Spiral Intensity Diffusion Factor	1	1
5 Momentum Dispersion Factor	1	1
6 Flow Curvature Smoothing Iterations	10	10
7 Minimum Radius of Flow Curvature (m)		

Abbildung 3.15: Berechnungseinstellungen des 2D-Rechenkerns mit Gleichungssatz und Toleranzen. (Quelle: Eigene Darstellung; Software HEC-RAS.)

Tabelle 3.6: Qualitätskennwerte der Simulationen (Volumenbilanzfehler). (Quelle: Eigene Darstellung.)

Szenario	Volumenbilanzfehler
Schiffsschleuse	< 0,02 %
Wasserkraftwerk	0,006 %
Wehr + Sportbootschleuse	0,009 %
Komplette Staustufe	0,026 %

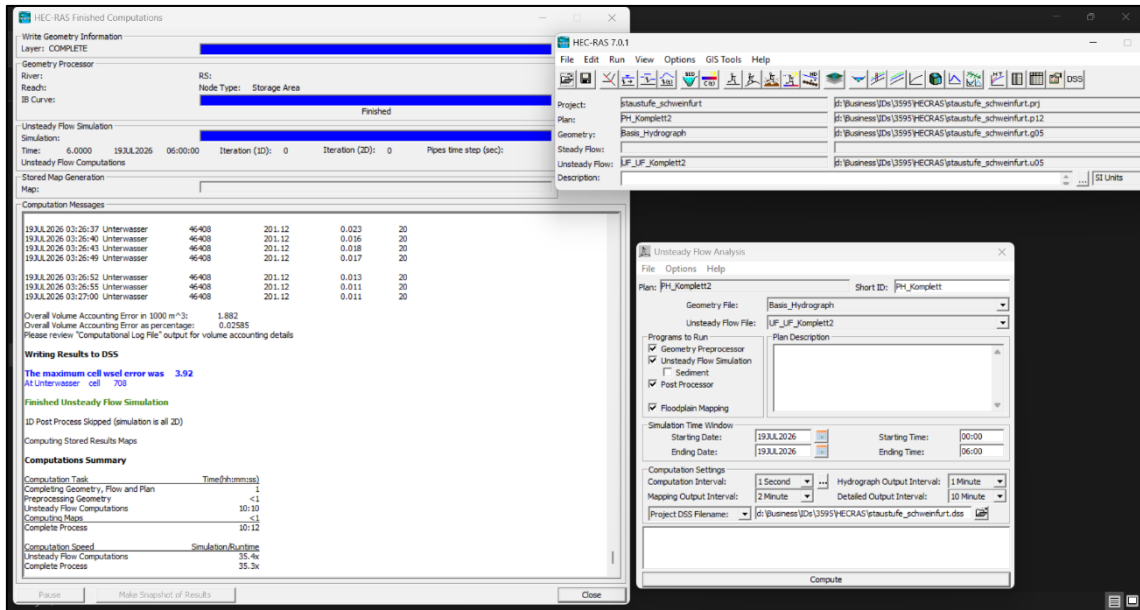


Abbildung 3.16: Rechenprotokoll des Laufs der kompletten Staustufe mit ausgewiesenem Volumenbilanzfehler. (Quelle: Eigene Darstellung; Software HEC-RAS.)

Tabelle 3.7 fasst die Kennwerte der vier Szenarien zusammen und Abbildung 3.17 stellt sie grafisch gegenüber. Deutlich erkennbar ist eine Steigerung von der Schiffsschleuse bis zur kompletten Staustufe. Der Scheitelabfluss wächst von rund 181 m³/s auf rund 4.579 m³/s. Das ist mehr als das Fünfundzwanzigfache. Die Überflutungsfläche nimmt von rund 204 ha auf rund 414 ha zu. Die größte Wassertiefe steigt von 8,6 m auf 10,5 m. Die drei Kenngrößen wachsen damit gemeinsam, aber nicht im gleichen Verhältnis. Der Scheitelabfluss steigt deutlich stärker an als die Überflutungsfläche. Dieser Unterschied ist für die Deutung der Ergebnisse von Bedeutung.

Tabelle 3.7: Ergebnisse der vier Versagensszenarien beim Höchststau. (Quelle: Eigene Darstellung.)

Szenario	Breschen-weite	Scheitelab-fluss	Freigesetztes Volumen	Überflutungs-fläche	max. Was-sertiefe
Schiffsschleuse	12 m	181 m³/s	2,33 Mio. m³	203,7 ha	8,59 m
Wasserkraftwerk	26 m	819 m³/s	3,78 Mio. m³	270,6 ha	8,98 m
Wehr + Sport-bootschleuse	70 m	1.362 m³/s	3,76 Mio. m³	285,6 ha	9,05 m
Komplette Stau-stufe	156 m	4.579 m³/s	3,78 Mio. m³	414,4 ha	10,54 m

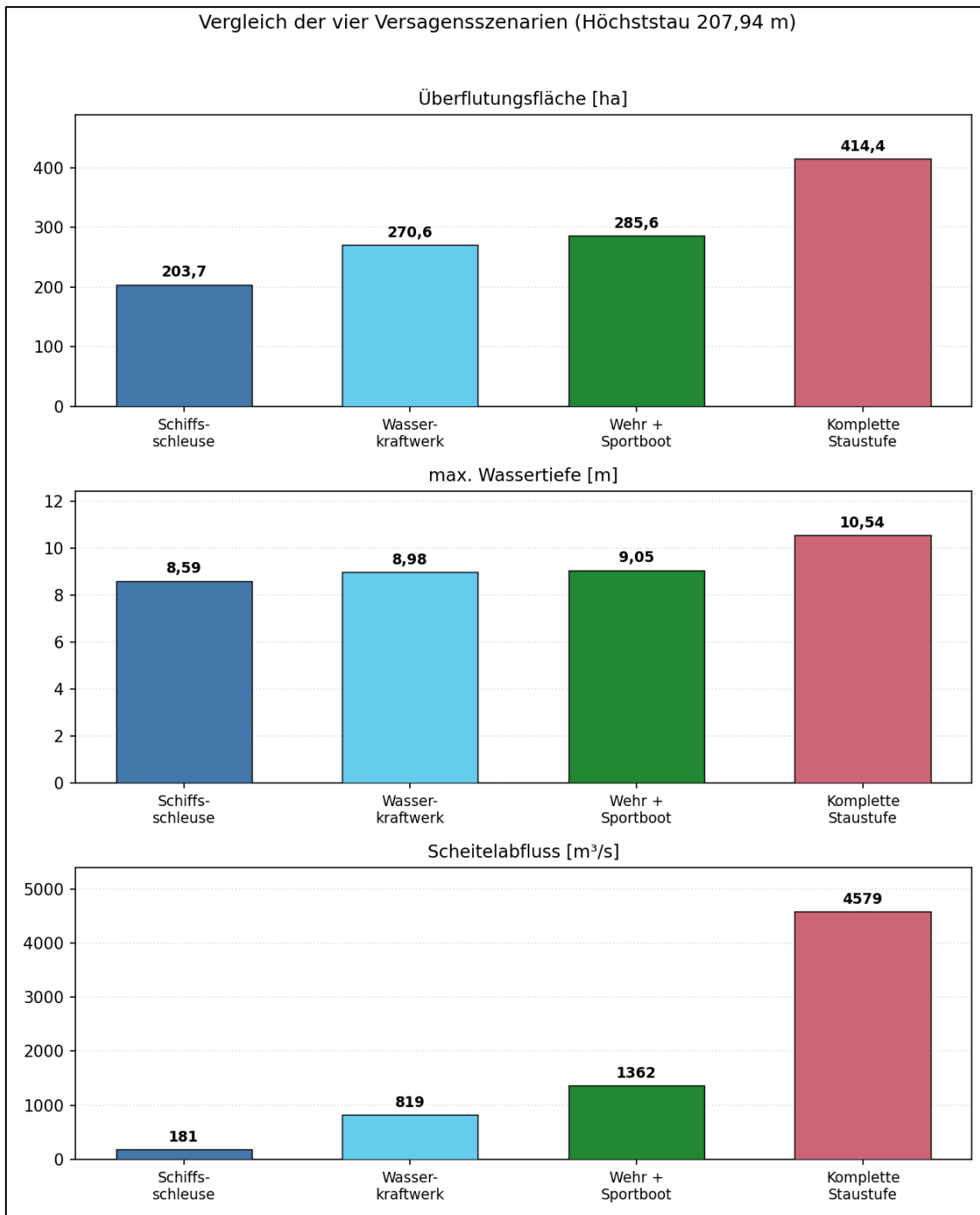


Abbildung 3.17: Vergleich der vier Versagensszenarien hinsichtlich Überflutungsfläche, maximaler Wassertiefe und Scheitelabfluss. (Quelle: Eigene Darstellung.)

Auffällig ist, dass sich die überflutete Fläche zwischen Kraftwerk, Wehr und kompletter Staustufe weniger stark unterscheidet als der Scheitelabfluss. Der Grund liegt im

freigesetzten Volumen. Kraftwerk, Wehr und komplette Staustufe entleeren den Stauraum bis zur jeweiligen Breschensohle nahezu vollständig. In allen drei Fällen läuft daher ein ähnliches Gesamtvolumen von rund 3,8 Mio. m³ ab. Die Fläche wird somit maßgeblich vom freigesetzten Volumen bestimmt. Der Scheitelabfluss beeinflusst dagegen vor allem die Geschwindigkeit und die Höhe der Schwallwelle. Die Schiffsschleuse bildet die Ausnahme. Ihre hohe Breschensohle von 203,14 m entleert den Stauraum nur teilweise und setzt daher weniger Wasser frei.

Abbildung 3.18 zeigt die vier Wassertiefenkarten in einer gemeinsamen Übersicht. Alle Teilbilder verwenden dieselbe Farbskala. Dadurch lässt sich der Zuwachs der Überflutung von Szenario zu Szenario unmittelbar erkennen. In allen Fällen folgt die Überflutung dem Talzug des Mains. Sie bleibt zunächst auf den Flussschlauch beschränkt. Erst im flachen Abschnitt vor Garstadt weitet sie sich deutlich aus. Die folgenden Abschnitte betrachten die vier Szenarien einzeln und erläutern jeweils die zugehörige Wassertiefenkarte im Detail.

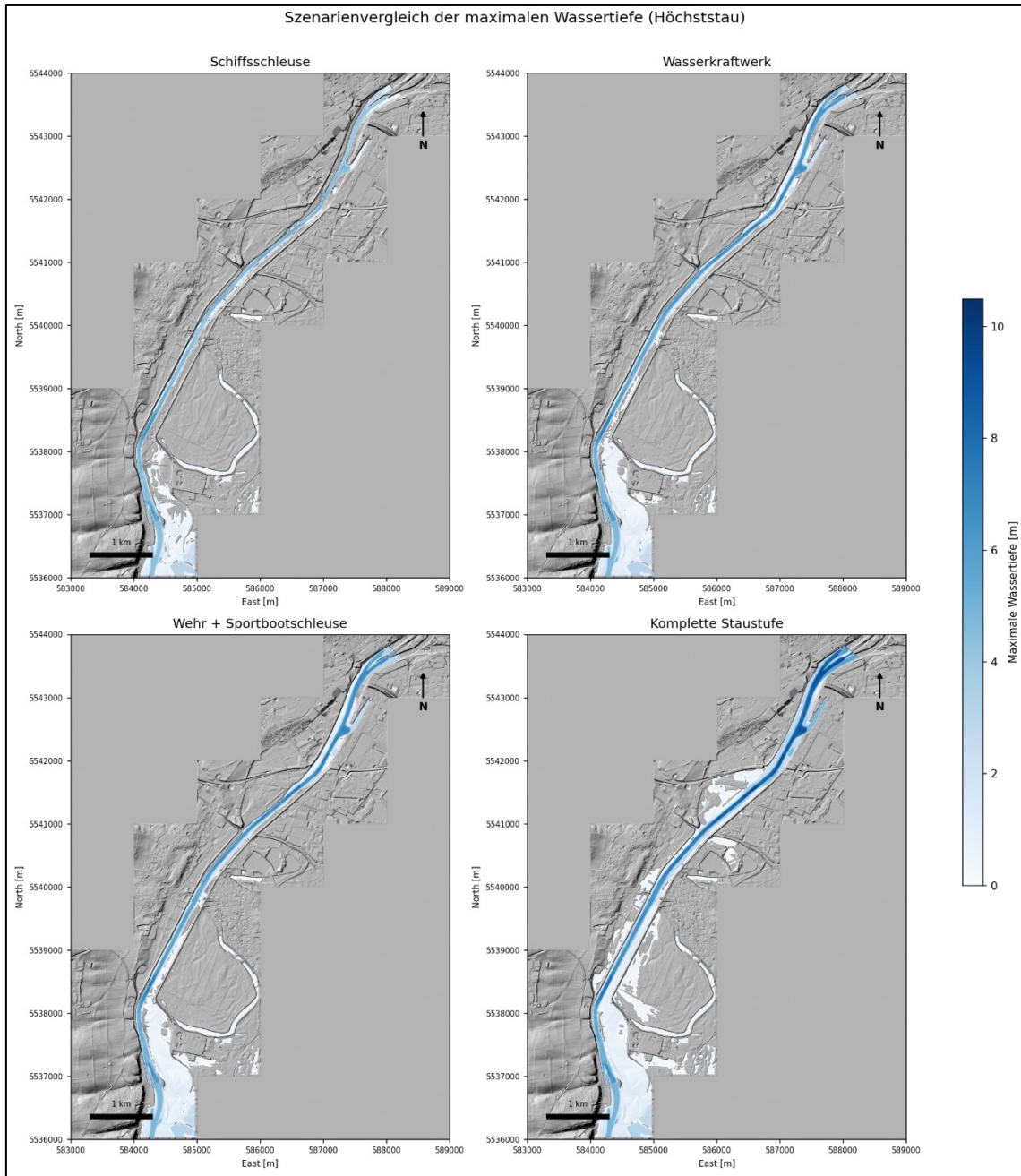


Abbildung 3.18: Szenarienvergleich der maximalen Wassertiefe in gemeinsamer Darstellung. (Quelle: Eigene Darstellung; Software HEC-RAS.)

3.2.2 Versagen der Schiffsschleuse

Das Versagen der Schiffsschleuse bildet das kleinste der vier Szenarien. Die Bresche ist mit 12 m schmal und liegt mit einer Sohlhöhe von 203,14 m vergleichsweise hoch über der Sohle des Stauraums. Beim Höchststau von 207,94 m ergibt sich daraus eine Überfallhöhe von rund 4,80 m. Der durchströmte Querschnitt der Bresche bleibt mit rund 58

m² klein. Nach dem Überfallgesetz von Poleni folgt daraus ein Scheitelabfluss von rund 181 m³/s. Dieser Wert liegt noch unter dem mittleren Hochwasserabfluss des Pegels Schweinfurt von 637 m³/s. Die hohe Sohle der Bresche begrenzt zugleich die Entleerung des Stauraums. Der Stauspiegel kann nur bis auf die Höhe dieser Sohle absinken. Es werden daher lediglich rund 2,33 Mio. m³ freigesetzt. Das entspricht etwa zwei Dritteln des beim Höchststau gespeicherten Volumens. Der übrige Anteil verbleibt unterhalb der Breschensohle im Stauraum.

Der zeitliche Verlauf des Abflusses ist in Abbildung 3.13 dargestellt. Der Abfluss erreicht seinen Scheitel unmittelbar nach dem Öffnen der Bresche. Danach sinkt er mit fallendem Stauspiegel nur langsam ab. Die schmale und hohe Bresche entlässt das Wasser zögerlich. Die Schiffsschleuse entleert den Stauraum daher deutlich langsamer als die übrigen Szenarien. Der Abfluss bleibt über mehrere Stunden auf mäßigem Niveau. Dadurch bildet sich im Unterwasser keine ausgeprägte Schwallwelle. Der Zufluss verteilt sich über einen langen Zeitraum und trifft nicht schlagartig auf das Unterwasser. Die Belastung des Talraums bleibt entsprechend moderat.

Abbildung 3.19 zeigt die maximale Wassertiefe im Unterwasser. Die Überflutung bleibt weitgehend auf den Flussschlauch und die unmittelbar angrenzenden Uferstreifen beschränkt. Insgesamt werden rund 204 ha überflutet. Davon liegen rund 125 ha tiefer als ein halber Meter unter Wasser. Rund 99 ha werden tiefer als einen Meter überflutet. Rund 45 ha erreichen mehr als vier Meter Tiefe. Die größte Wassertiefe beträgt 8,6 m und tritt in der tiefen Stromrinne des Mains auf. Die mittlere Tiefe der überfluteten Fläche liegt bei rund 1,9 m. Über weite Strecken steigt der Wasserstand nur wenig über den ohnehin vorhandenen Füllstand des Flusses.

Das Wasser folgt dem Talzug des Mains von der Staustufe nach Südwesten. Die bebauten Bereiche von Schweinfurt am nordöstlichen Rand bleiben weitgehend verschont. Erst im flachen Talabschnitt vor Garstadt weitet sich die überflutete Fläche merklich aus. Dort verlässt das Wasser stellenweise den Flussschlauch und erreicht angrenzende landwirtschaftliche Flächen. Die Ausuferung bleibt jedoch örtlich begrenzt. Das Versagen der Schiffsschleuse stellt damit den am wenigsten kritischen Fall dar. Der geringe

Scheitelabfluss und das kleinere freigesetzte Volumen begrenzen sowohl die Fläche als auch die Höhe der Welle. Der berechnete Scheitelabfluss liegt in einer Größenordnung, die sich gut mit den Hochwasserkennwerten des Pegels vergleichen lässt. Das Szenario bildet die untere Grenze der betrachteten Bandbreite.

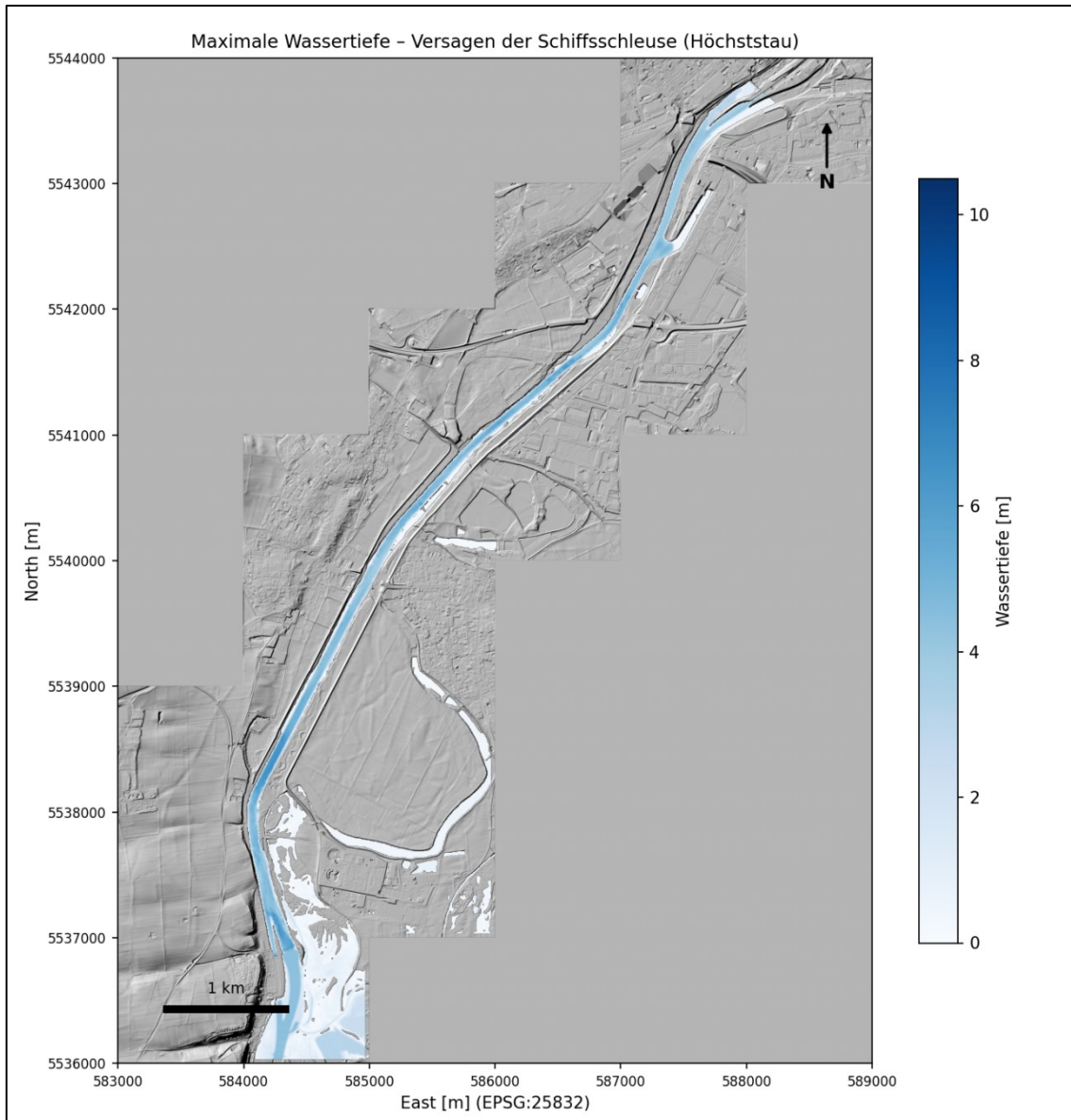


Abbildung 3.19: Maximale Wassertiefe im Unterwasser beim Versagen der Schiffsschleuse. (Quelle: Eigene Darstellung; Software HEC-RAS.)

3.2.3 Versagen des Wasserkraftwerks

Beim Versagen des Wasserkraftwerks öffnet sich eine 26 m breite Bresche mit einer tiefen Sohle von 200,04 m. Diese Sohle reicht bis auf die Sohle des Stauraums hinab. Beim Höchststau ergibt sich eine Überfallhöhe von rund 7,90 m. Der durchströmte Querschnitt wächst damit auf rund 205 m². Der Scheitelabfluss steigt auf rund 819 m³/s. Er liegt damit zwischen einem zweijährlichen Hochwasser von 680 m³/s und einem fünfjährlichen Hochwasser von 900 m³/s des Pegels Schweinfurt. Die tiefe Sohle erlaubt eine nahezu vollständige Entleerung des Stauraums. Es werden rund 3,78 Mio. m³ freigesetzt. Das entspricht dem gesamten beim Höchststau gespeicherten Wasser. Gegenüber der Schiffsschleuse wird damit etwa das Anderthalbfache des Volumens frei.

Abbildung 3.13 zeigt den zugehörigen Abflussverlauf. Der Abfluss steigt sofort auf seinen Scheitel und fällt danach rasch ab. Die tiefe Bresche entlässt das Wasser deutlich schneller als die schmale und hohe Öffnung der Schiffsschleuse. Der größte Teil des Stauinhalts läuft bereits in der ersten Stunde ab. Danach klingt der Abfluss mit sinkendem Stauspiegel aus. Aus dem raschen Anstieg entsteht im Unterwasser eine deutliche Schwallwelle. Sie breitet sich zügig talabwärts aus. Die Wellenfront erreicht den mittleren Talabschnitt in kurzer Zeit. Der zeitliche Ablauf unterscheidet sich damit grundlegend von dem der Schiffsschleuse.

Abbildung 3.20 zeigt die maximale Wassertiefe. Gegenüber der Schiffsschleuse breitet sich das Wasser deutlich weiter in die Talaue aus. Die Überflutung erreicht rund 271 ha. Davon liegen rund 183 ha tiefer als ein halber Meter unter Wasser. Rund 133 ha werden tiefer als einen Meter überflutet. Rund 65 ha erreichen mehr als vier Meter Tiefe. Die größte Wassertiefe beträgt 9,0 m. Die mittlere Tiefe der überfluteten Fläche steigt auf rund 2,1 m. Der Zuwachs gegenüber der Schiffsschleuse geht vor allem auf das größere freigesetzte Volumen zurück, das nun den gesamten Stauinhalt umfasst.

Die Welle folgt dem Talzug des Mains nach Südwesten. Bereits im mittleren Talabschnitt tritt das Wasser über die Ufer. Besonders im weiten Abschnitt vor Garstadt werden angrenzende landwirtschaftliche Flächen überflutet. Die tiefen Bereiche konzentrieren sich weiterhin auf die Stromrinne. Die flächige Ausuferung erfasst nun jedoch auch die

begleitende Aue. Der höhere Scheitelabfluss führt zu einer schnelleren Ausbreitung der Welle als bei der Schiffsschleuse. Dieses Szenario zeigt eine wichtige Eigenschaft des Systems. Bereits eine schmale, aber tief liegende Bresche genügt, um den gesamten Stauraum zu entleeren. Nicht die Breite der Öffnung, sondern die Höhenlage der Sohle entscheidet über das freigesetzte Volumen. Das Kraftwerk bildet damit den Übergang von dem örtlich begrenzten Fall der Schiffsschleuse zu den großflächigen Szenarien.

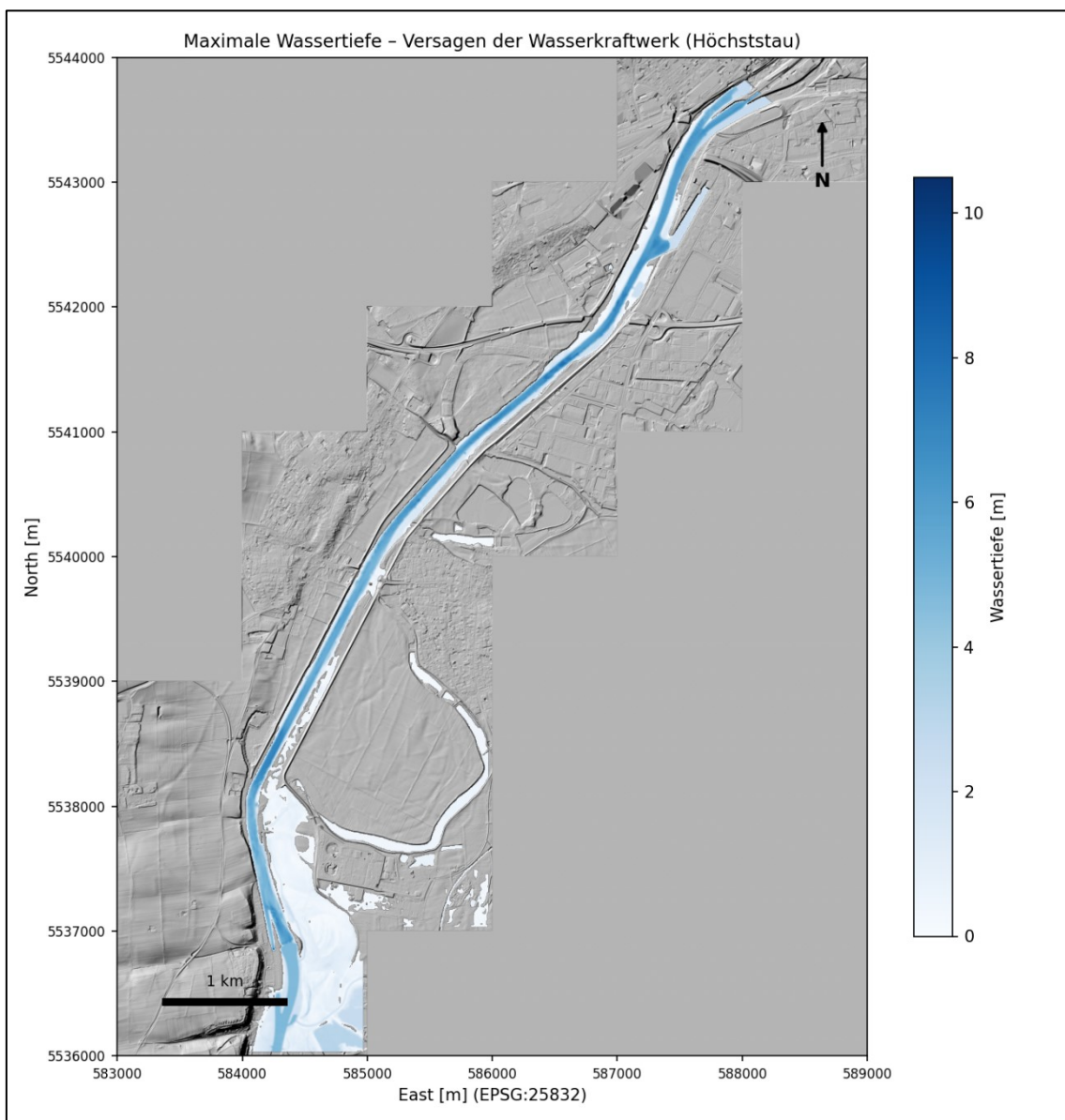


Abbildung 3.20: Maximale Wassertiefe im Unterwasser beim Versagen des Wasserkraftwerks. (Quelle: Eigene Darstellung; Software HEC-RAS.)

3.2.4 Versagen der Wehranlage mit Sportbootschleuse

Das Versagen der Wehranlage zusammen mit der Sportbootschleuse öffnet eine 70 m breite Bresche mit einer Sohlhöhe von 202,14 m. Beim Höchststau ergibt sich eine Überfallhöhe von rund 5,80 m. Aus der großen Breite und der mittleren Überfallhöhe folgt ein durchströmter Querschnitt von rund 406 m². Der Scheitelabfluss erreicht rund 1.362 m³/s. Er liegt damit nahe einem zwanzigjährigen Hochwasser von 1.380 m³/s des Pegels Schweinfurt. Trotz der etwas höheren Sohle als beim Kraftwerk wird der Stauraum nahezu vollständig entleert. Das freigesetzte Volumen beträgt rund 3,76 Mio. m³. Es entspricht damit weitgehend dem des Kraftwerks. Die Wehranlage setzt somit ein ähnliches Volumen frei, jedoch bei größerer Breschenweite.

Abbildung 3.13 zeigt den Abflussverlauf. Die breite Bresche entlässt das Wasser sehr rasch. Der Abfluss erreicht früh einen hohen Scheitel und fällt danach steil ab. Der Großteil des Volumens läuft in kurzer Zeit ab. Die Wellenfront erreicht den mittleren Talabschnitt früher als beim Kraftwerk. Aus dem hohen und frühen Scheitel entsteht eine ausgeprägte Schwallwelle im Unterwasser. Die breite Öffnung wirkt sich damit vor allem auf die Dynamik der Welle aus. Der zeitliche Verlauf ist steiler als beim Kraftwerk, obwohl das freigesetzte Volumen nahezu gleichbleibt.

Abbildung 3.21 zeigt die maximale Wassertiefe. Die Überflutungsfläche wächst leicht auf rund 286 ha. Davon liegen rund 201 ha tiefer als ein halber Meter unter Wasser. Rund 144 ha werden tiefer als einen Meter überflutet. Rund 67 ha erreichen mehr als vier Meter Tiefe. Die größte Wassertiefe liegt bei 9,1 m. Die mittlere Tiefe der überfluteten Fläche beträgt rund 2,1 m. Da das freigesetzte Volumen dem des Kraftwerks ähnelt, bleibt auch die Ausdehnung der Überflutung vergleichbar.

Der Unterschied zum Kraftwerk zeigt sich weniger in der Fläche als in der Dynamik der Welle. Die breite Bresche entlässt das Wasser rascher. Die Wellenfront läuft schneller talabwärts. Im oberen Talabschnitt fällt die Schwallwelle daher etwas höher aus als beim Kraftwerk. Das Wasser folgt weiterhin dem Talzug des Mains und weitet sich im flachen Abschnitt vor Garstadt aus. Für die Betroffenheit der Uferbereiche ist dieses Szenario mit dem des Kraftwerks vergleichbar. Insgesamt bestätigt es den bereits erkennbaren

Zusammenhang. Die überflutete Fläche wird vom freigesetzten Volumen bestimmt, während der Scheitelabfluss die Höhe und die Geschwindigkeit der Welle prägt. Der höhere Abfluss des Wehrs geht daher mit einer etwas kräftigeren Schwallwelle einher als beim Kraftwerk.

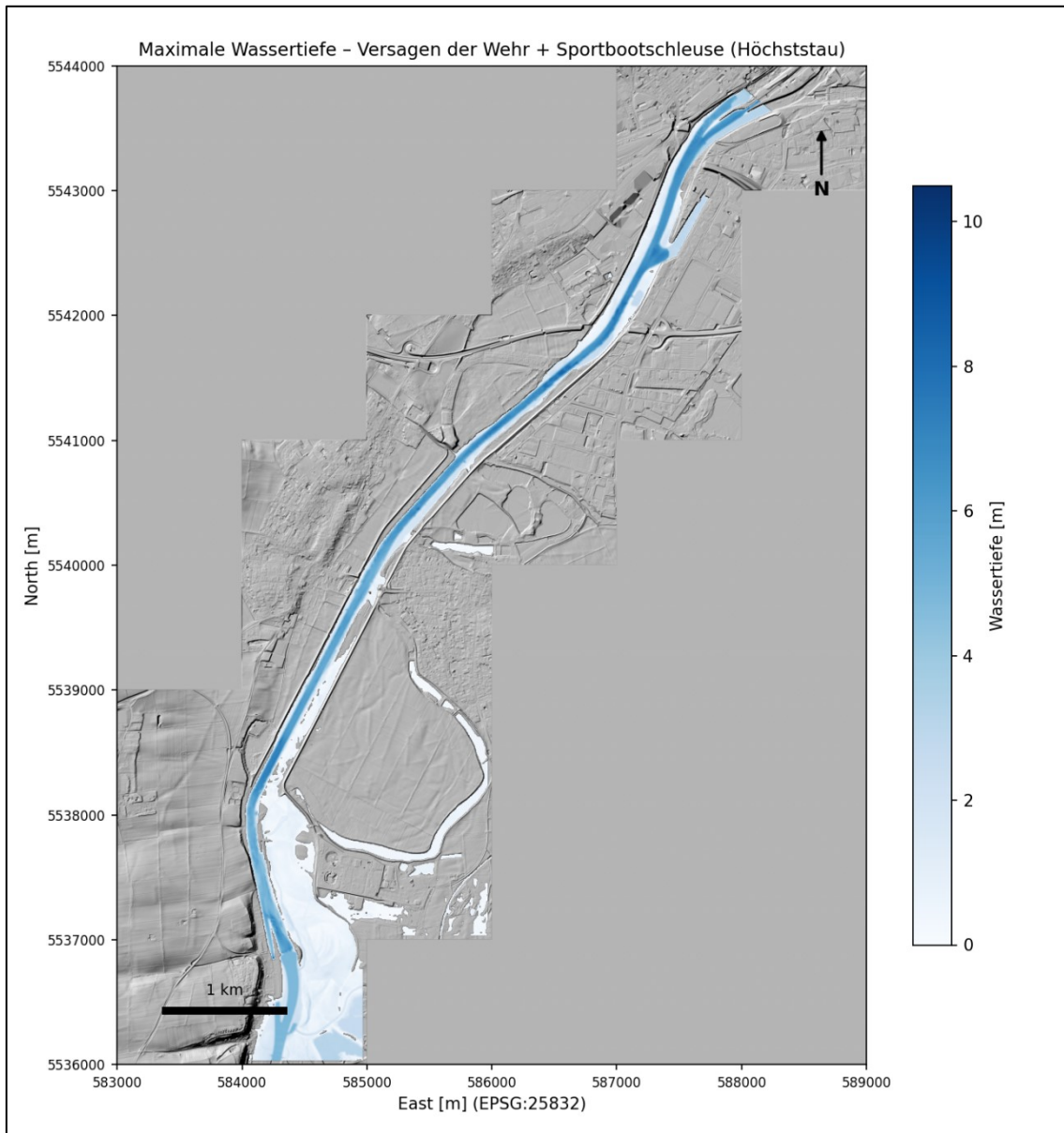


Abbildung 3.21: Maximale Wassertiefe im Unterwasser beim Versagen der Wehranlage mit Sportbootschleuse. (Quelle: Eigene Darstellung; Software HEC-RAS.)

3.2.5 Versagen der kompletten Staustufe

Das Versagen der kompletten Staustufe bildet den ungünstigsten Fall. Die Bresche ist mit 156 m sehr breit und reicht mit einer Sohlhöhe von 200,04 m bis auf die Sohle des

Stauraums. Beim Höchststau ergibt sich eine Überfallhöhe von rund 7,90 m. Der durchströmte Querschnitt erreicht damit rund 1.230 m². Der Scheitelabfluss steigt auf rund 4.579 m³/s. Er übertrifft ein tausendjährliches Hochwasser von 3.000 m³/s des Pegels Schweinfurt um mehr als das Anderthalbfache. Der gesamte Stauinhalt von rund 3,78 Mio. m³ wird innerhalb kurzer Zeit freigesetzt. Dieses Szenario vereint damit die größte Breschenweite mit der vollständigen Entleerung des Stauraums.

Abbildung 3.13 zeigt den steilsten aller vier Abflussverläufe. Der Abfluss schießt unmittelbar nach dem Öffnen auf seinen Scheitel. Danach fällt er sehr steil ab. Die sehr breite und tiefe Bresche entleert den Stauraum in kürzester Zeit. Nahezu das gesamte Volumen läuft innerhalb kurzer Zeit ab. Aus diesem plötzlichen Abfluss entsteht eine kräftige Schwallwelle. Sie breitet sich mit hoher Geschwindigkeit talabwärts aus. Der Scheitelabfluss ist damit um ein Vielfaches höher als in allen übrigen Szenarien. Entsprechend kräftig fällt die Belastung des Talraums aus.

Abbildung 3.22 zeigt die maximale Wassertiefe. Die Überflutung ist mit rund 414 ha deutlich ausgedehnter als in den übrigen Szenarien. Davon liegen rund 269 ha tiefer als ein halber Meter unter Wasser. Rund 187 ha werden tiefer als einen Meter überflutet. Rund 85 ha erreichen mehr als vier Meter Tiefe. Die größte Wassertiefe erreicht 10,5 m. Die mittlere Tiefe der überfluteten Fläche liegt bei rund 2,1 m. Der hohe Scheitelabfluss erzeugt eine ausgeprägte Schwallwelle, die weite Flächen der Talaue flutet.

Abbildung 3.23 zeigt dasselbe Ergebnis in der Darstellung des RAS Mappers über dem Luftbild. Die Welle folgt dem Talzug des Mains und weitet sich im flachen Abschnitt vor Garstadt stark aus. In diesem Abschnitt liegt auch das Kernkraftwerk Grafenrheinfeld mit dem zugehörigen Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente. Die Überflutung dieses Szenarios reicht bis in den Bereich dieser Anlage. Damit kommt dem Versagen der kompletten Staustufe im Hinblick auf die Gefährdung sensibler Infrastruktur besondere Bedeutung zu. Dieses Szenario bildet die maßgebende Grundlage für die spätere Diskussion der Betroffenheit im Unterwasser. Es zeigt zugleich die obere Grenze der betrachteten Bandbreite. Die vier Szenarien bilden zusammen einen klaren Zusammenhang ab. Mit

zunehmender Breschenweite und tieferer Sohle steigen Scheitelabfluss, freigesetztes Volumen und Ausmaß der Überflutung an.

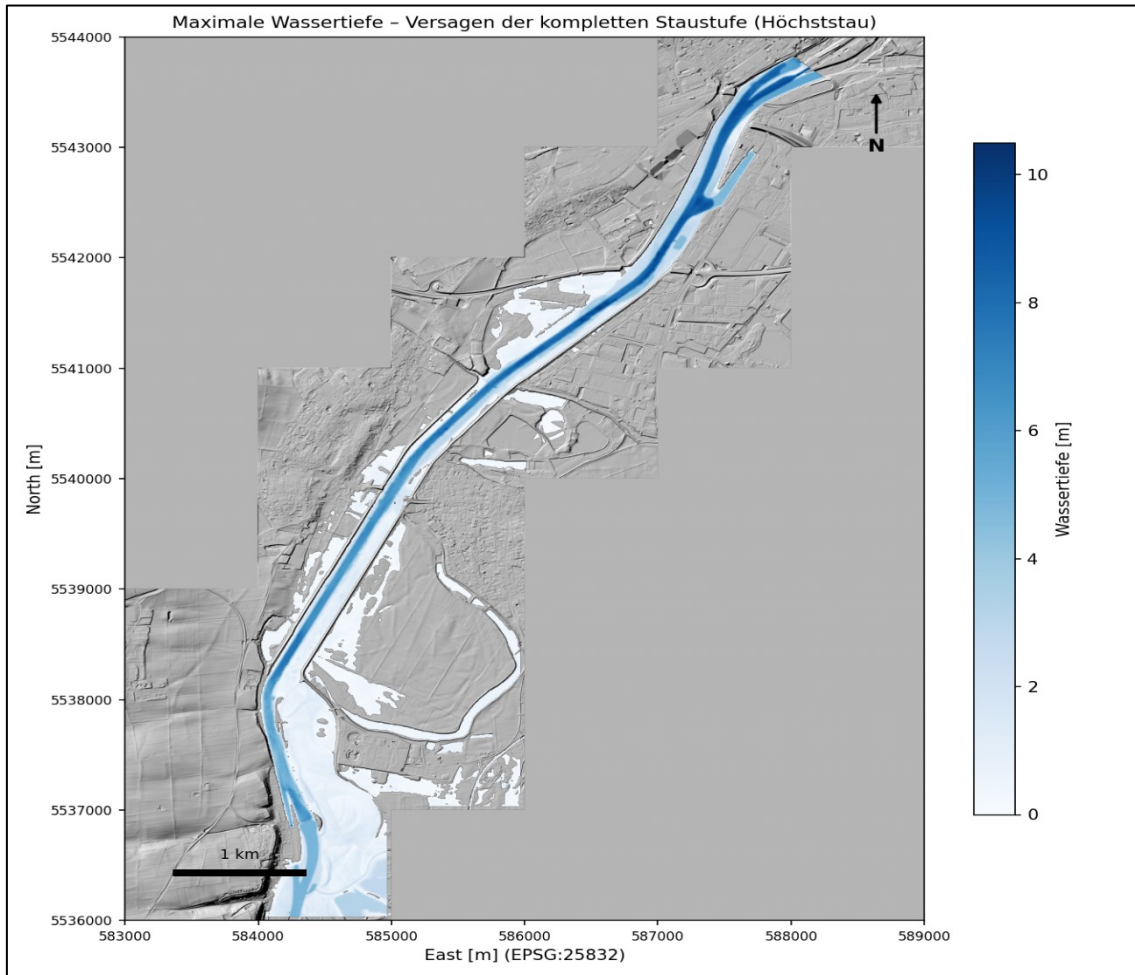


Abbildung 3.22: Maximale Wassertiefe im Unterwasser beim Versagen der kompletten Staustufe. (Quelle: Eigene Darstellung; Software HEC-RAS.)

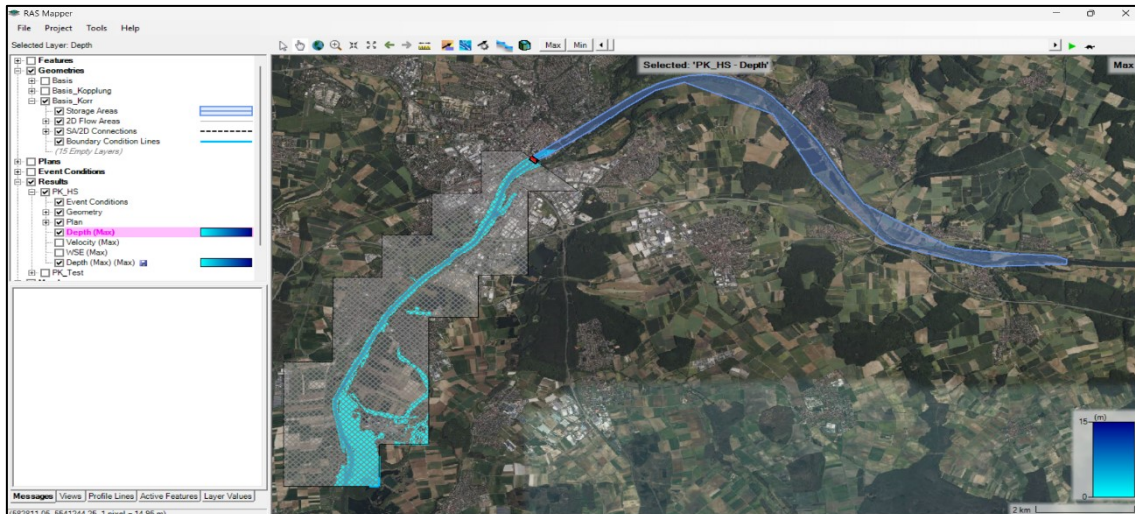


Abbildung 3.23: Maximale Wassertiefe beim Versagen der kompletten Staustufe in der Darstellung des RAS Mappers. (Quelle: Eigene Darstellung; Software HEC-RAS, Kartengrundlage Google.)

3.3 Validierung der Ergebnisse

Die berechneten Ergebnisse werden in diesem Abschnitt auf ihre Plausibilität überprüft. Dazu werden die Scheitelabflüsse mit den Pegeldaten und der Schlüsselkurve verglichen und die Schwallwellenhöhen den Referenzwerten aus der Literatur gegenübergestellt.

3.3.1 Abgleich mit den Pegeldaten und der Schlüsselkurve

Der Pegel Schweinfurt Neuer Hafen liefert statistische Hochwasserkennwerte für den Main. Diese Kennwerte bilden den hydrologischen Referenzrahmen für die Bewertung der Simulationsergebnisse. Für den Abgleich werden die vier berechneten Scheitelabflüsse den Jährlichkeiten des Pegels gegenübergestellt. Ein mittleres Hochwasser führt am Pegel $637 \text{ m}^3/\text{s}$. Ein zehnjährliches Hochwasser erreicht $1.100 \text{ m}^3/\text{s}$. Ein hundertjährliches Hochwasser liegt bei $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Ein tausendjährliches Hochwasser erreicht $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Abbildung 3.24 stellt die vier Scheitelabflüsse diesen Schwellenwerten gegenüber. Tabelle 3.8 fasst die Einordnung zusammen.

Die vier Szenarien decken einen weiten Bereich ab. Der Scheitelabfluss der Schiffschleuse liegt mit $181 \text{ m}^3/\text{s}$ unterhalb eines einjährigen Hochwassers von $520 \text{ m}^3/\text{s}$. Er bewegt sich damit im Bereich gewöhnlicher Abflüsse des Mains. Das Wasserkraftwerk erreicht mit $819 \text{ m}^3/\text{s}$ ein zwei- bis fünfjährliches Hochwasser. Die Wehranlage liegt mit

1.362 m³/s nahe einem zwanzigjährigen Hochwasser von 1.380 m³/s. Die komplette Staustufe übertrifft mit 4.579 m³/s ein tausendjähriges Hochwasser deutlich. Ihr Scheitelabfluss liegt um mehr als das Anderthalbfache über diesem Wert. Damit spannen die Szenarien einen Bogen vom gewöhnlichen Abfluss bis weit über das seltenste dokumentierte Hochwasser.

Diese Einordnung bestätigt die Plausibilität der ersten drei Szenarien. Ihre Scheitelabflüsse liegen innerhalb der am Pegel dokumentierten Bandbreite natürlicher Hochwasser. Solche Abflüsse sind am Main bei Schweinfurt statistisch belegt und damit hydraulisch nachvollziehbar. Der Scheitelabfluss der kompletten Staustufe verlässt diesen Bereich. Das ist zu erwarten, denn ein schlagartiges Totalversagen setzt den gesamten Stauinhalt auf einmal frei. Ein solches Ereignis ist kein natürliches Hochwasser, sondern ein kurzer Schwall. Der Vergleich zeigt hier daher weniger eine Übereinstimmung als vielmehr die außergewöhnliche Größenordnung dieses Szenarios. Genau diese Größenordnung begründet seine besondere Bedeutung für die weitere Bewertung.

Ein zweiter Abgleich erfolgt über die Schlüsselkurve des Pegels. Die Schlüsselkurve beschreibt den Zusammenhang zwischen Abfluss und Wasserstand am Pegel. Für die drei kleineren Szenarien liegen die Abflüsse im belegten Bereich dieser Kurve. Die zugehörigen Wasserstände lassen sich daher unmittelbar aus der Schlüsselkurve ablesen und fügen sich in das bekannte Abflussverhalten des Mains ein. Für die komplette Staustufe reicht der Abfluss über den dokumentierten Bereich der Schlüsselkurve hinaus. Der zugehörige Wasserstand kann dann nur durch Extrapolation abgeschätzt werden. Diese Extrapolation ist mit einer größeren Unsicherheit behaftet. Sie wird bei der Bewertung des ungünstigsten Szenarios entsprechend berücksichtigt.

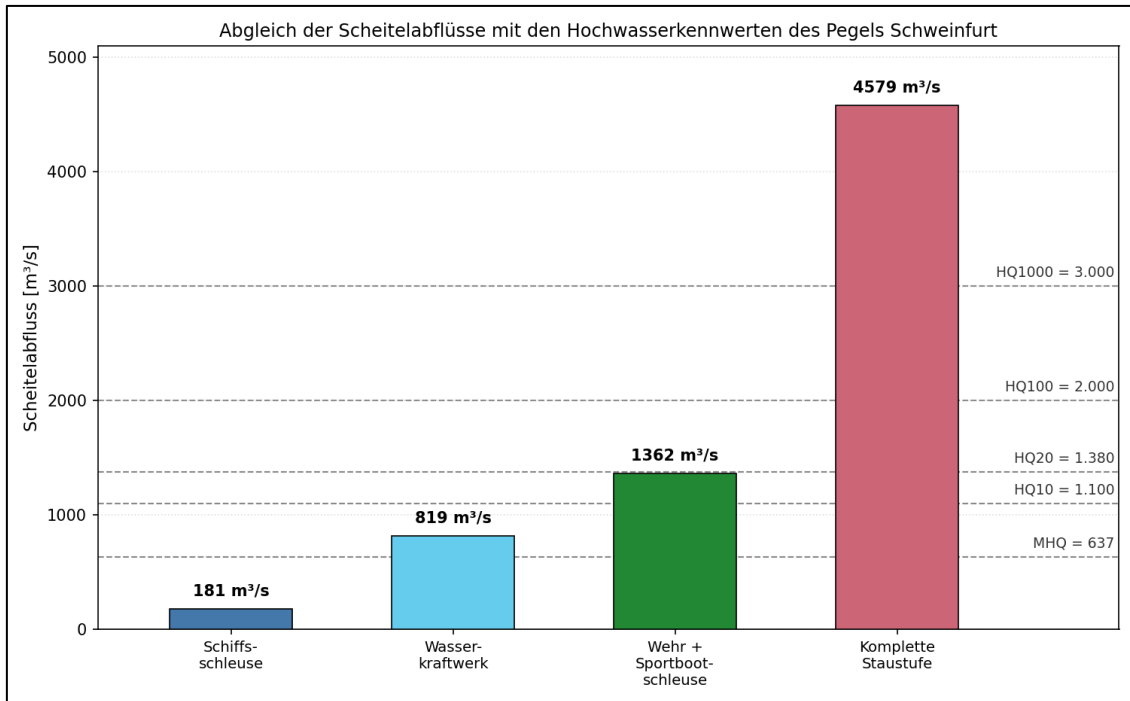


Abbildung 3.24: Abgleich der vier Scheitelabflüsse mit den Hochwasserkennwerten des Pegels Schweinfurt Neuer Hafen. (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage LfU, 2026.)

Tabelle 3.8: Einordnung der Scheitelabflüsse in die Hochwasserstatistik des Pegels Schweinfurt. (Quelle: Eigene Darstellung.)

Szenario	Scheitelabfluss	Einordnung am Pegel Schweinfurt
Schiffsschleuse	181 m³/s	unter dem einjährigen Hochwasser (HQ1 = 520 m³/s)
Wasserkraftwerk	819 m³/s	zwischen HQ2 (680 m³/s) und HQ5 (900 m³/s)
Wehr + Sportboot-schleuse	1.362 m³/s	nahe dem zwanzigjährigen Hochwasser (HQ20 = 1.380 m³/s)
Komplette Staustufe	4.579 m³/s	über dem tausendjährigen Hochwasser (HQ1000 = 3.000 m³/s)

3.3.2 Vergleich mit Referenzwerten aus der Literatur

Die Schwallwellenhöhe beschreibt den Anstieg des Wasserspiegels im Unterwasser gegenüber dem Ausgangszustand. Sie wird aus dem höchsten berechneten Wasserstand und dem anfänglichen Wasserstand des Unterwassers von 202,97 m bestimmt. Für jede Rechenzelle im Flussschlauch ergibt sich so die maximale Anhebung des Wasserspiegels. Als Referenz dient die Untersuchung von Schmidt-Bäumler (2020). Sie schätzt die Schwallwellenhöhe nach einem Wehrversagen mit demselben Ansatz über das

Überfallgesetz von Poleni ab und wendet ihn auf zahlreiche Wehranlagen an der Saar an. Die dort ermittelten Schwallwellenhöhen liegen je nach Fallhöhe zwischen 0,03 und 6,09 m. Diese unabhängige Untersuchung mit gleichem methodischem Ansatz bildet den Anker der Validierung.

Tabelle 3.9 zeigt die maximale Schwallwellenhöhe je Szenario unmittelbar an der Bresche. Die Schiffsschleuse erreicht rund 1,7 m. Das Wasserkraftwerk erreicht rund 3,8 m und die Wehranlage rund 4,7 m. Die komplette Staustufe erreicht rund 5,0 m. Die Schwallwellenhöhe ist dabei durch die Fallhöhe zwischen Ober- und Unterwasser von rund 5 m nach oben begrenzt. Bei den großen Breschen nähert sie sich diesem Grenzwert an und unterscheidet sich daher zwischen Wehr und kompletter Staustufe nur noch wenig. Das freigesetzte Volumen und der Scheitelabfluss wachsen weiter, während die Wellenhöhe in die Sättigung läuft.

Der Vergleich bestätigt die Plausibilität der Ergebnisse. Die berechneten Schwallwellenhöhen liegen im selben Bereich wie die für die Saar ermittelten Werte. Die Schiffsschleuse stimmt mit rund 1,7 m sehr gut mit dem dort für eine vergleichbare Wehranlage berechneten Wert von 1,67 m überein. Da die Untersuchung von Schmidt-Bäumler denselben methodischen Ansatz verwendet, bestätigt der Vergleich sowohl die Methode als auch die Größenordnung der Ergebnisse. Zu beachten ist, dass die Schwallwellenhöhe mit der Entfernung von der Bresche abnimmt und vom betrachteten Ort abhängt. Für die komplette Staustufe liefert das Modell im unmittelbaren Zuflussbereich örtlich höhere Werte, die als numerischer Randeﬀekt zu werten sind und nicht als Schwallwellenhöhe interpretiert werden.

Tabelle 3.9: Maximale Schwallwellenhöhe je Szenario im Vergleich mit dem Referenzwert aus der Literatur. (Quelle: Eigene Darstellung.)

Szenario	maximale Schwallwellenhöhe
Schiffsschleuse	rund 1,7 m
Wasserkraftwerk	rund 3,8 m
Wehr + Sportbootschleuse	rund 4,7 m
Komplette Staustufe	rund 5,0 m
Referenzwert (Schmidt-Bäumler, 2020)	0,03 bis 6,09 m

4 Diskussion

Dieses Kapitel ordnet die Ergebnisse der vorangegangenen Simulationen kritisch ein. Dazu wird nacheinander die Eignung der verwendeten Daten, die Eignung des gewählten Modells und die Relevanz der berechneten Überschwemmungsflächen im Unterwasser betrachtet.

4.1 Eignung der verwendeten Daten

Dieser Abschnitt bewertet, wie gut sich die verwendeten Datensätze für die Modellierung eignen. Zuerst werden die Höhen- und Peildaten betrachtet, die das Geländemodell und die Gewässersohle bestimmen. Anschließend werden die Landnutzungs- und Bauwerksdaten beurteilt, aus denen die Rauheit und die Breschengeometrie abgeleitet werden.

4.1.1 Eignung der Höhen- und Peildaten

Die Höhen- und Peildaten bilden das geometrische Rückgrat des gesamten Modells. Das trockene Gelände stammt aus dem DGM1 der Bayerischen Vermessungsverwaltung. Es liegt in einer Auflösung von einem Meter vor und ist im Höhenbezug DHHN2016 geführt. Diese Auflösung bildet den engen Talraum und die Uferstrukturen zuverlässig ab. Die Gewässersohle beruht auf Peildaten der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung, die mit einem Fächerecholot erfasst wurden. Beide Datensätze teilen denselben Höhenbezug. Dadurch lassen sie sich zu einem durchgehenden Geländemodell verschneiden, ohne dass ein Höhenversatz entsteht. Die Datengrundlage ist somit grundsätzlich gut geeignet.

Ihre Eignung zeigt sich vor allem in den abgeleiteten Größen. Die Peildaten sind für die Stauraumkennlinie und das freigesetzte Volumen entscheidend. Ohne die tatsächliche Sohllage würde der Stauinhalt deutlich unterschätzt. Der einheitliche Höhenbezug ist zudem für die Schwallwellenhöhe wichtig. Die Schwallwellenhöhe ist eine Differenz zweier Wasserstände. Sie reagiert daher empfindlich auf Höhenfehler zwischen Ober- und Unterwasser. Da beide Datensätze im selben Bezug liegen, bleibt dieser Fehler klein. Die berechneten Wasserstände stehen damit auf einer konsistenten Grundlage.

Trotzdem sind die Daten mit Einschränkungen verbunden. Das DGM1 und die Peildaten stammen aus unterschiedlichen Erfassungszeitpunkten. Die Gewässersohle verändert sich durch Anlandung und Erosion fortlaufend. Die Bathymetrie bildet daher nur einen Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt ab. An der Wasserlinie werden beide Datensätze zusammengeführt. Dort kann eine Nahtstelle entstehen. Diese Naht wurde geglättet, bleibt aber eine mögliche Quelle örtlicher Abweichungen.

Ein weiterer Punkt betrifft die Natur des DGM1. Es ist ein reines Geländemodell. Es enthält weder Gebäude noch Bewuchs. Auf der Talaue beeinflussen solche Hindernisse jedoch die Strömung. Im Modell werden sie nur über die Rauheit angenähert und nicht über die Höhe. Gebäude versperren dem Wasser daher nicht geometrisch den Weg. Für die Überflutung in der Nähe von Ortschaften ist das eine Vereinfachung. Hinzu kommt, dass das hoch aufgelöste Geländemodell auf dem gröberen Rechnetz ausgewertet wird. Strukturen unterhalb der Zellweite gehen dabei verloren. Insgesamt sind die Höhen- und Peildaten gut geeignet, diese Punkte sollten bei der Deutung örtlicher Ergebnisse aber berücksichtigt werden.

4.1.2 Eignung der Landnutzungs- und Bauwerksdaten

Die Landnutzungsdaten stammen aus dem amtlichen Datensatz der tatsächlichen Nutzung der Bayerischen Vermessungsverwaltung. Sie decken das gesamte Untersuchungsgebiet flächendeckend ab und liegen in einer einheitlichen Klassifikation vor. Aus ihnen werden die Manning-Beiwerte abgeleitet, die von 0,025 für versiegelte Flächen bis 0,120 für Wald reichen. Jede Nutzungsart erhält dabei einen festen Wert. Dieses Vorgehen ist objektiv und nachvollziehbar. Es ist einer pauschalen, einheitlichen Rauheit deutlich überlegen. Die Landnutzungsdaten sind für die Ableitung der Rauheit daher gut geeignet. Zugleich bleibt die Zuordnung eine Schätzung. Die Rauheit innerhalb einer Klasse schwankt je nach Bewuchs und Jahreszeit. Der Datensatz bildet außerdem nur einen bestimmten Stand ab. Die Rauheit wirkt vor allem auf die Geschwindigkeit und die Ausbreitung der Welle. Da die Überflutungsfläche maßgeblich vom Volumen bestimmt wird, bleibt ihr Einfluss auf die Fläche jedoch begrenzt.

Die Bauwerksdaten stammen aus den Unterlagen zur Staustufe und liefern die Geometrie der Breschen. Aus ihnen ergeben sich die Breschenweiten von 12 m bis 156 m sowie die

zugehörigen Sohlhöhen und Stauziele. Die vier Szenarien beruhen damit auf realen Bauwerksmaßen und nicht auf freien Annahmen. Das ist eine wesentliche Stärke der Datengrundlage. Der eigentliche Versagensvorgang wird jedoch stark vereinfacht. Angenommen werden ein schlagartiges Öffnen, eine rechteckige Bresche und eine Bildungszeit nahe null. Auch der Überfallbeiwert wird für alle Szenarien mit einem einzigen Wert angesetzt. Ein reales Versagen könnte dagegen teilweise oder allmählich ablaufen. Diese Annahmen sind bewusst gewählt und bilden einen klar definierten, ungünstigen Fall ab.

Insgesamt sind beide Datensätze für ihre jeweilige Aufgabe gut geeignet. Sie geben den Szenarien eine objektive und reproduzierbare Grundlage. Die wesentlichen Unsicherheiten liegen weniger in den Daten selbst als in den vereinfachenden Annahmen. Das betrifft die Übertragung der Landnutzung in feste Rauheitswerte und die Idealisierung des Breschenvorgangs. Beide Punkte wirken sich vor allem auf die Dynamik der Welle aus. Die Überflutungsfläche stützt sich dagegen auf die robustere Grundlage aus Volumen und Gelände. Bei der Deutung der Geschwindigkeit und der Schwallwelle sollten diese Annahmen daher mitbedacht werden.

4.2 Eignung des gewählten Modells

Dieser Abschnitt bewertet, wie gut der gewählte Modellansatz die Fragestellung abbildet. Zuerst werden die Grenzen des Ansatzes betrachtet, anschließend die möglichen Kaskadeneffekte und die verbleibenden Unsicherheiten.

4.2.1 Grenzen des Modellansatzes

Das Modell arbeitet mit einem entkoppelten Ansatz. Die Breschenganglinie wird vorab berechnet und als Zufluss eingespeist. Das sichert die Volumenerhaltung, trennt den Breschenabfluss aber vom Unterwasser. Ein steigender Wasserstand im Unterwasser kann nicht auf den Breschenabfluss zurückwirken. Das Überfallgesetz von Poleni setzt einen freien Überfall voraus. Ein Rückstau durch das auflaufende Unterwasser wird nicht erfasst. Der frühe Scheitel kann dadurch etwas überschätzt werden. Eine direkte Kopplung würde diese Rückwirkung abbilden, führte aber zu großen Volumenfehlern. Der gewählte Ansatz ist somit eine bewusste Abwägung zwischen Volumentreue und Rückkopplung.

Das Oberwasser wird als Speicherzelle mit waagerechtem Wasserspiegel abgebildet. Dynamische Effekte innerhalb des Staupraums bleiben unberücksichtigt. Während des Ereignisses wird kein Zufluss von Oberstrom angesetzt. Ein überlagerndes Hochwasser wird daher nicht betrachtet. Das hält den Fall klar definiert, schließt aber die Kombination aus Versagen und Hochwasser aus. Auch die Bresche selbst ist idealisiert. Sie öffnet sich schlagartig, ist rechteckig und besitzt eine Bildungszeit nahe null. Das passt zu einem plötzlichen Versagen eines Betonbauwerks, bleibt aber eine Vereinfachung. Zudem wird für alle Szenarien derselbe Überfallbeiwert verwendet.

Die zweidimensionale Berechnung beruht auf den vollständigen Flachwassergleichungen. Das Rechennetz besitzt eine Zellweite von 20 m. Strukturen unterhalb dieser Größe werden gemittelt. Steile Wellenfronten und örtliche Wechselsprünge werden dabei geglättet. Örtliche Spitzen der Geschwindigkeit und der Schwallwellenhöhe können daher unterschätzt werden. Das Gelände wird als unveränderlich angenommen. Erosion, Sedimenttransport und Treibgut werden nicht modelliert. Auch die Brücken werden nicht als Strömungshindernisse berücksichtigt. Ihre Durchflusshöhen wurden zwar über die Brückenunterkanten erfasst, im zweidimensionalen Modell sind sie jedoch nicht als Bauwerke abgebildet. Ein Aufstau oder eine Verklausung an den Brücken bleibt daher unberücksichtigt. Örtlich könnten die Wasserstände dadurch höher ausfallen als berechnet. Eine genauere Betrachtung würde die Einbindung der Brücken als innere Randbedingungen erfordern. Schließlich ist das Modell nicht an einem gemessenen Versagensfall kalibriert. Ein solches Ereignis liegt für diesen Standort nicht vor. Die Validierung stützt sich daher auf statistische und literaturbasierte Werte und nicht auf eine historische Kalibrierung.

4.2.2 Kaskadeneffekte und Unsicherheiten

Der Main ist als Kette von Staustufen ausgebaut. Ein Versagen in Schweinfurt sendet eine Welle nach Unterstrom. Diese Welle trifft dort auf die nächste Staustufe. Das folgende Bauwerk kann dadurch überlastet werden oder ebenfalls versagen. Ein solcher Kaskadeneffekt läge außerhalb des Modells. Das Rechengebiet endet bei Garstadt und bildet die Reaktion der nächsten Staustufe nicht ab. Die Szenarien betrachten damit nur das

Versagen des Schweinfurter Bauwerks für sich. Entlang eines aufgestauten Flusses kann die tatsächliche Gefährdung dadurch größer ausfallen als hier dargestellt.

Auch innerhalb der Untersuchungsstrecke sind weitere Folgeeffekte möglich. Treibgut und mitgeführtes Material können sich an den Brücken ansammeln. Eine solche Verklauung staut das Wasser örtlich auf und gibt es dann plötzlich wieder frei. Daraus können zusätzliche örtliche Schwallwellen entstehen. Das Modell bildet die Brücken nicht als Hindernisse ab und berücksichtigt kein Treibgut. Diese Effekte bleiben daher unberücksichtigt. Hinzu kommt, dass die ankommende Welle an empfindlichen Anlagen weitere Folgen auslösen kann, die über eine rein hydraulische Betrachtung hinausgehen.

Die Ergebnisse sind zudem mit mehreren Unsicherheiten behaftet. Sie stammen aus den Eingangsdaten, den Breschenparametern und den Modellannahmen. Ein Teil dieser Annahmen wirkt bewusst ungünstig. Der Höchststau und die schlagartige Bresche beschreiben einen ungünstigen Fall. Andere Annahmen können in beide Richtungen wirken. Der angenommene freie Überfall kann den frühen Scheitel überschätzen. Das grobe Rechenetz kann örtliche Spitzen unterschätzen. Der Verzicht auf ein überlagerndes Hochwasser kann die Gesamtbelastung unterschätzen. Die Unsicherheiten heben sich daher nicht einfach auf. Weitere Einflüsse bleiben ebenfalls unberücksichtigt. Die Wassertemperatur wirkt sich über die Zähigkeit auf die Fließgeschwindigkeit aus und wird im Modell nicht abgebildet. Auch eine mögliche Eisbedeckung im Winter, die den Abfluss und die Rauheit verändern kann, wird nicht betrachtet.

Trotz dieser Punkte bleiben die zentralen Ergebnisse belastbar. Die Überflutungsfläche wird vom freigesetzten Volumen und vom Gelände bestimmt. Beide Größen stehen auf einer soliden Grundlage. Der Volumenbilanzfehler bleibt in allen Läufen unter drei Hundertstel Prozent. Die Einordnung an den Pegeldata und die Übereinstimmung des kleinsten Szenarios mit der Literatur bestätigen die Größenordnung. Die Ergebnisse sind daher als gut begründete Szenarienabschätzungen zu verstehen. Sie sind keine exakten Vorhersagen. Ihre Stärke liegt im einheitlichen Vergleich der vier Szenarien.

4.3 Relevanz und Interpretation der Überschwemmungsflächen

Dieser Abschnitt ordnet die berechneten Überschwemmungsflächen nach ihrer praktischen Bedeutung ein. Zuerst wird die Betroffenheit der Schifffahrt und der Uferbereiche betrachtet, anschließend die Gefährdung sensibler Infrastruktur im Unterwasser.

4.3.1 Betroffenheit von Schifffahrt und Uferbereichen

Der Main ist an dieser Stelle eine schiffbare Bundeswasserstraße. Ein Versagen der Staustufe beendet den Aufstau im Oberwasser. Die Fahrrinne verliert damit ihre nötige Tiefe. Die Schifffahrt im aufgestauten Abschnitt käme sofort zum Erliegen. Im Unterwasser gefährden die Schwallwelle und das mitgeführte Treibgut den Schiffsverkehr unmittelbar. Betroffen sind der Hafen Schweinfurt, liegende Fahrzeuge und die Sportboot-schleuse. Die Schleusen und die Hafenanlagen selbst werden beschädigt. Bereits das kleinste Szenario stört die Schifffahrt erheblich, denn dort versagt die Schiffsschleuse als Bauwerk unmittelbar.

Die Uferbereiche gehören zu den zuerst betroffenen Flächen. Die Überflutung folgt dem Talzug des Mains und weitet sich erst vor Garstadt stark aus. Betroffen sind vor allem die begleitende Aue und landwirtschaftliche Flächen. Die bebauten Bereiche von Schweinfurt am nordöstlichen Rand bleiben weitgehend verschont. Nahe der Bresche treten hohe Fließgeschwindigkeiten auf. Diese können das Ufer angreifen und die Uferbefestigung beschädigen. Auch Uferwege und Promenaden entlang des Flusses werden überflutet. Die Betroffenheit reicht damit vom Wasser bis in den unmittelbar angrenzenden Uferstreifen.

Das Ausmaß dieser Betroffenheit wächst mit dem Szenario. Die überflutete Fläche steigt von rund 204 ha bei der Schiffsschleuse auf rund 414 ha bei der kompletten Staustufe. Doch schon der kleinste Fall ist nicht harmlos. Nahe der Bresche erreicht die Schwallwelle dort rund 1,7 m. Ein solcher Anstieg ist für Personen am Ufer und für kleine Boote gefährlich. Der plötzliche Beginn lässt zudem kaum Vorwarnzeit. Die Schifffahrt und die Uferbereiche sind daher in jedem Szenario die am Unmittelbarsten betroffenen Räume.

4.3.2 Gefährdung sensibler Infrastruktur im Unterwasser

Im weiteren unterstromigen Talraum liegt sensible Infrastruktur. Von besonderer Bedeutung ist das ehemalige Kernkraftwerk Grafenrheinfeld mit seinem Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente. Das Kraftwerk wird aktuell zurückgebaut. Das Zwischenlager bewahrt jedoch für die nächsten Jahrzehnte weiterhin bestrahlte Brennelemente in Castorbehältern auf. Die Anlage bleibt damit ein sicherheitsrelevanter Punkt im Untersuchungsraum. Neben ihr sind auch Brücken, Straßen, die Bahnstrecke und Versorgungsleitungen zu nennen. Diese Bauwerke durchziehen die Talaue und können durch eine großflächige Überflutung beeinträchtigt werden.

Die Gefährdung dieser Anlagen hängt stark vom Szenario ab. Die drei kleineren Fälle bleiben weitgehend auf den Flussschlauch und die nahe Aue beschränkt. Erst das Versagen der kompletten Staustufe erreicht mit rund 414 ha eine deutlich größere Ausdehnung. Nur in diesem Fall reicht die Überflutung bis in den Bereich des Standorts Grafenrheinfeld. Das ungünstigste Szenario ist damit auch das für die sensible Infrastruktur maßgebende. Die Schwallwelle läuft dabei rasch talabwärts und lässt wenig Vorwarnzeit. Diese Kombination aus großer Fläche und schnellem Ablauf macht das Szenario besonders relevant.

Das Erreichen des Standorts bedeutet allerdings nicht zwingend eine Überflutung der sicherheitsrelevanten Bauwerke. Die Anlage verfügt über einen eigenen Hochwasserschutz. Eine genaue Bewertung der Betroffenheit läge außerhalb des hier gewählten Modells. Das Ergebnis zeigt jedoch, dass der Talraum bis in diesen empfindlichen Bereich reicht. Schon das rechtfertigt eine gesonderte und tiefergehende Betrachtung. Ergänzend ist zu beachten, dass Brücken und Verkehrswege bereits in kleineren Szenarien betroffen sein können. Ihr Ausfall unterbricht Rettungswege und kann die Folgen des Versagens zusätzlich verschärfen. Die Überflutungsflächen sind daher nicht nur eine hydraulische Größe, sondern ein unmittelbarer Hinweis auf das Gefährdungspotential im Unterwasser.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Dieses Kapitel fasst die zentralen Erkenntnisse der Arbeit zusammen und zieht daraus die Schlussfolgerungen. Dazu wird zuerst die Forschungsfrage beantwortet, anschließend die Übertragbarkeit des Ansatzes auf weitere Staustufen betrachtet und zuletzt der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt.

5.1 Beantwortung der Forschungsfrage

Die Forschungsfrage lautet, inwiefern ein GIS-gestützter und szenarienorientierter Modellierungsansatz genutzt werden kann, um die Überflutungsflächen und Schwallwellenhöhen infolge eines technischen Versagens der Staustufe Schweinfurt bei unterschiedlichen Breschenweiten abzuschätzen und zu validieren. Die Arbeit zeigt, dass dies möglich ist. Der entwickelte Workflow verbindet die räumliche Datenverarbeitung mit der hydraulischen Simulation. In QGIS werden das durchgehende Geländemodell, die Stauraumkennlinie und die Rauheit aus der Landnutzung aufbereitet. HEC-RAS berechnet daraus die vier Versagensszenarien über die vorab bestimmte Breschenganglinie. Die Ergebnisse werden anschließend wieder im GIS räumlich ausgewertet. Der gekoppelte Ansatz liefert damit für jedes Szenario sowohl die Überflutungsfläche als auch die Schwallwellenhöhe.

Die Abschätzung gelingt auch über die verschiedenen Breschenweiten hinweg. Der Scheitelabfluss steigt von rund 181 m³/s bei der Schiffsschleuse auf rund 4.579 m³/s bei der kompletten Staustufe. Die Überflutungsfläche wächst von rund 204 ha auf rund 414 ha. Die Schwallwellenhöhe reicht von rund 1,7 m nahe der Bresche bis zu rund 5,0 m. Die Szenarien zeigen dabei einen klaren Zusammenhang. Die Fläche wird vor allem vom freigesetzten Volumen bestimmt. Der Scheitelabfluss prägt die Höhe und die Geschwindigkeit der Welle. Der Ansatz bildet die Unterschiede zwischen den Bauwerksteilen somit nachvollziehbar ab. Schon das kleinste Szenario ist nicht harmlos, während das größte bis in den Bereich sensibler Infrastruktur reicht.

Auch der geforderte Abgleich mit Referenzdaten gelingt. Die Scheitelabflüsse lassen sich in die Hochwasserstatistik des Pegels Schweinfurt einordnen. Die kleineren Szenarien liegen im Bereich dokumentierter Hochwasser, das größte übertrifft ein tausendjährliches

Hochwasser deutlich. Der Volumenbilanzfehler bleibt in allen Läufen unter drei Hundertstel Prozent. Die berechnete Schwallwellenhöhe des kleinsten Szenarios stimmt mit dem nach demselben Verfahren berechneten Referenzwert von 1,67 m aus Schmidt-Bäumler (2020) sehr gut überein. Damit ist die Forschungsfrage beantwortet. Der GIS-gestützte, szenarienorientierte Ansatz kann die Überflutungsflächen und Schwallwellenhöhen abschätzen und plausibel validieren. Er eignet sich als Werkzeug zur vorsorgenden Gefährdungsabschätzung, ersetzt aber keine detaillierte Einzelfalluntersuchung.

5.2 Übertragbarkeit auf weitere Staustufen

Der entwickelte Workflow ist modular aufgebaut und nicht an Schweinfurt gebunden. Jeder Schritt beruht auf Standarddaten und allgemeinen hydraulischen Grundlagen. Das Gelände entsteht aus einem amtlichen Höhenmodell und aus Peildaten. Der Stauinhalt folgt aus der Stauraumkennlinie. Die Rauheit wird aus der Landnutzung abgeleitet. Die Breschenganglinie wird nach dem Überfallgesetz von Poleni bestimmt. Die eigentliche Berechnung erfolgt in einem zweidimensionalen Modell. Keiner dieser Bausteine ist auf ein einzelnes Bauwerk zugeschnitten. Der Ansatz lässt sich daher grundsätzlich auf andere Staustufen übertragen.

Besonders günstig sind die Voraussetzungen in Deutschland. Amtliche Höhenmodelle und Landnutzungsdaten liegen flächendeckend vor. Für die Bundeswasserstraßen sind zudem Peildaten und Bauwerksdaten verfügbar. Der Main ist außerdem als Kette ähnlicher Staustufen ausgebaut. Diese Bauwerke bestehen meist aus Schleuse, Wehr und Kraftwerk. Die hier verwendete Logik der Szenarien nach Bauwerksteilen lässt sich daher unmittelbar übernehmen. Für einen neuen Standort müssen nur die Eingangsgrößen neu abgeleitet werden. Das betrifft das Gelände, die Stauraumkennlinie, die Breschengeometrie und die Rauheit. Die Methode selbst bleibt unverändert.

Die Übertragbarkeit hat jedoch auch Bedingungen. Sie hängt vor allem von der Verfügbarkeit und der Qualität der Daten ab. Auch die Bauart der Staustufe spielt eine Rolle. Bewegliche Wehre oder abweichende Bauwerksformen können angepasste Breschenannahmen erfordern. Zudem braucht jeder Standort eigene Referenzdaten für die Validierung. Der hier genutzte Vergleichswert gilt nur für Schweinfurt. Ein Kaskadeneffekt

entlang der Staustufenkette lässt sich zudem erst durch die Kopplung mehrerer Standorte abbilden. Insgesamt ist der Ansatz gut übertragbar und eignet sich als Werkzeug für eine flächige Voruntersuchung, sofern die nötigen Standortdaten vorliegen.

5.3 Weiterer Forschungsbedarf

Aus den Grenzen des Modells ergibt sich ein klarer Forschungsbedarf. Zunächst betrifft er die hydraulische Abbildung selbst. Die entkoppelte Berechnung könnte durch eine stabile direkte Kopplung ersetzt werden. Damit ließe sich die Rückwirkung des auflaufenden Unterwassers auf den Breschenabfluss erfassen. Im Nahbereich der Bresche wären zudem ein feineres Rechennetz und detailliertere hydrodynamische Ansätze sinnvoll. Gebäude und Brücken könnten als echte Strömungshindernisse berücksichtigt werden. Auch Erosion, Sedimenttransport und Treibgut ließen sich einbeziehen. Ein weiterer Schritt wäre die Überlagerung des Versagens mit einem gleichzeitigen Hochwasser.

Ein zweiter Bereich betrifft die Datengrundlage und die Validierung. Für ein reales Versagen liegen keine gemessenen Ereignisdaten vor. Physikalische Modellversuche oder Vergleiche mit unabhängigen Modellen könnten diese Lücke verkleinern. Sinnvoll wäre außerdem eine systematische Sensitivitätsanalyse der Breschenparameter. Dazu zählen der Überfallbeiwert, die Bildungszeit und die angenommene Breschenform. Zusätzliche Referenzwerte aus der Literatur würden die Einordnung weiter absichern. Auf diese Weise ließen sich die verbleibenden Unsicherheiten gezielt eingrenzen.

Ein dritter Bereich betrifft die Erweiterung der Fragestellung. Die Kopplung mehrerer Staustufen würde eine Betrachtung von Kaskadeneffekten entlang der Kette erlauben. Darüber hinaus könnte die reine Überflutungsfläche mit einer Betroffenheits- und Risikoanalyse verknüpft werden. Dabei würden die Flächen mit der Exposition und der Verletzlichkeit der Nutzung verschnitten. Besonders für sensible Infrastruktur wie den Standort Grafenrheinfeld wäre das aufschlussreich. Auch Vorwarnzeiten und mögliche Rettungswege ließen sich so bewerten. Solche Schritte würden auf dem hier entwickelten Workflow aufbauen. Sie würden ihn von einem Werkzeug der Voruntersuchung zu einer detaillierten Gefährdungs- und Risikobewertung weiterführen.

Literaturverzeichnis

- Afshari, S., Tavakoly, A. A., Rajib, M. A., Zheng, X., Follum, M. L., Omranian, E., & Fekete, B. M. (2018). Comparison of new generation low-complexity flood inundation mapping tools with a hydrodynamic model. *Journal of Hydrology*, 556, 539–556. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.036>
- Afzalimehr, H., & Bagheri, S. (2009). Discharge coefficient of sharp-crested weirs using potential flow. *Journal of Hydraulic Research*, 47(6), 820–823. <https://doi.org/10.3826/jhr.2009.3609>
- Albano, R., Mancusi, L., Adamowski, J., Cantisani, A., & Sole, A. (2019). A GIS Tool for Mapping Dam-Break Flood Hazards in Italy. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(6), 250. <https://doi.org/10.3390/ijgi8060250>
- Albu, L.-M., Enea, A., Iosub, M., & Breabăn, I.-G. (2020). Dam Breach Size Comparison for Flood Simulations. A HEC-RAS Based, GIS Approach for Drăcșani Lake, Sitna River, Romania. *Water*, 12(4), 1090. <https://doi.org/10.3390/w12041090>
- Aldrees, A., Ugwu, S. J., & Dan’azumi, S. (2025). Dam break modelling and flood inundation mapping using GIS and HEC-RAS: A case study of the Tiga Earth dam, Kano State, Nigeria. *Water Science and Technology*, 92(12), 1687–1708. <https://doi.org/10.2166/wst.2025.172>
- Aufleger, M., Knallinger, M., & Walter, A. (2021). Die Vertiefte Überprüfung von Stauanlagen in Deutschland. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 73(5), 184–200. <https://doi.org/10.1007/s00506-021-00764-2>
- Azimi, A. H., Rajaratnam, N., & Zhu, D. Z. (2014). Submerged Flows over Rectangular Weirs of Finite Crest Length. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(5), 06014001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000728](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000728)
- Bayerische Vermessungsverwaltung. (2025). *Tatsächliche Nutzung (Landnutzung), GeoPackage – Bayern* [Datensatz]. <https://geodaten.bayern.de/opengeodata/OpenDataDetail.html?pn=ln&active=DOWNLOAD> (abgerufen am 15.06.2025)
- Bayerische Vermessungsverwaltung. (2026). *Digitales Geländemodell 1 m (DGM1)* [Datensatz]. <https://geodaten.bayern.de/opengeodata/OpenDataDetail.html?pn=dgm1&active=DOWNLOAD> (abgerufen am 15.06.2026)
- BGZ. (2026). Das Brennelemente-Zwischenlager Grafenrheinfeld. *Zwischenlager.info*. <https://zwischenlager.info/standort/grafenrheinfeld/>
- Castro-Orgaz, O., & Chanson, H. (2017). Ritter’s dry-bed dam-break flows: Positive and negative wave dynamics. *Environmental Fluid Mechanics*, 17(4), 665–694. <https://doi.org/10.1007/s10652-017-9512-5>

- Fan, C., An, R., Li, J., Li, K., Deng, Y., & Li, Y. (2019). An Approach Based on the Protected Object for Dam-Break Flood Risk Management Exemplified at the Zipingpu Reservoir. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(19), 3786. <https://doi.org/10.3390/ijerph16193786>
- Froehlich, D. C. (2008). Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(12), 1708–1721. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:12\(1708\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708))
- GBRA. (2019, Mai 16). GBRA Statement Regarding Spillgate Failure. *Guadalupe-Blanco River Authority*. <https://www.gbra.org/news/2019/05/gbra-statement-regarding-spillgate-failure/>
- Gebhardt, M. (2020). Feste Wehre an Bundeswasserstraßen—Geeignete Wehrtypen. *BAWMitteilungen*, (105). https://izw.baw.de/publikationen/mitteilungsblaetter/0/BAWMitteilungen_105_Gebhardt_Geeignete_Wehre.pdf
- Gharbi, M., Soualmia, A., Dartus, D., & Masbernati, L. (2016). *Comparison of 1D and 2D Hydraulic Models for Floods Simulation on the Medjerda River in Tunisia*.
- Heimerl, S., & Schwiersch, N. (2021). Dynamic Water-Level Regulation at Run-of-River Hydropower Plants to Increase Efficiency and Generation. *Water*, 13(21), 2983. <https://doi.org/10.3390/w13212983>
- Kasper, J., Simons, F., Belzner, F., & Schmitt-Heiderich, P. (2017, August 1). *Einfluss von Starkregenereignissen auf die Abfluss- und Stauregelung am Beispiel der Neckarstauhaltung Hofen*. https://doi.org/10.5675/BfG_Veranst_2017.5
- LfU. (2026). *Pegel Schweinfurt Neuer Hafen / Main – Abflusskennwerte und Schlüsselkurve* [Datensatz]. https://www.hnd.bayern.de/pegel/unterer_main/schweinfurt-neuer-hafen-24022003/statistik (abgerufen am 16.06.2026)
- Lim, M., Ginting, B. M., Senjaya, T., & Kieswanti, C. (2024). Comparison of 1D, coupled 1D–2D, and 2D shallow water numerical modeling for dam-break flow analysis of Way-Ela dam, Indonesia. *Acta Hydrotechnica*, 27–50. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2024.02>
- Marangoz, H. O., Anılan, T., & Karasu, S. (2024). Investigating the Non-Linear Effects of Breach Parameters on a Dam Break Study. *Water Resources Management*, 38(5), 1773–1790. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03765-4>
- Mo, C., Cen, W., Lei, X., Ban, H., Ruan, Y., Lai, S., Shen, Y., & Xing, Z. (2023). Simulation of dam-break flood and risk assessment: A case study of Chengbi River Dam in Baise, China. *Journal of Hydroinformatics*, 25(4), 1276–1294. <https://doi.org/10.2166/hydro.2023.193>
- Moreno-Rodenas, A., Mantilla-Jones, J. D., & Valero, D. (2025). Age, climate and economic disparities drive the current state of global dam safety. *Nature Water*, 3(3), 284–295. <https://doi.org/10.1038/s44221-025-00402-1>

- Nguyen, V. T. (2015). 3D numerical simulation of free surface flows over hydraulic structures in natural channels and rivers. *Applied Mathematical Modelling*, 39(20), 6285–6306. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.01.046>
- Niemeyer, M., Huber, N. P., Briechle, S., & Köngeter, J. (2005). Simulation damm- und deichbruchinduzierter Flutwellen. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 57(1), 26–32. <https://doi.org/10.1007/BF03165542>
- Pugh, J. E., Venayagamoorthy, S. K., & Gates, T. K. (2025). Demystifying the discharge coefficient for flow over thin weirs and sills. *Flow*, 5, E31. <https://doi.org/10.1017/flo.2025.10022>
- Samarasinghe, J. T., Basnayaka, V., Gunathilake, M. B., Azamathulla, H. M., & Rathnayake, U. (2022). Comparing Combined 1D/2D and 2D Hydraulic Simulations Using High-Resolution Topographic Data: Examples from Sri Lanka—Lower Kelani River Basin. *Hydrology*, 9(2), 39. <https://doi.org/10.3390/hydrology9020039>
- Schmidt-Bäumler, H. (2020). *Multikriterielle Entscheidungsunterstützung in der risiko-basierten Instandhaltungsplanung am Beispiel der Verkehrswasserbauwerke* [PDF]. <https://doi.org/10.5445/IR/1000119906>
- Sholtes, J. S., & Doyle, M. W. (2011). Effect of Channel Restoration on Flood Wave Attenuation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(2), 196–208. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000294](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000294)
- Staudacher, E., Shahriari, S., & Zenz, G. (2018). Numerische Modelle – ein Standbein der Talsperrensicherheit. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 70(7), 397–405. <https://doi.org/10.1007/s00506-018-0492-6>
- Tsegaye, S., Kebedew, M. G., Albrecht, K. K., Missimer, T. M., Thomas, S., & Elshall, A. S. S. (2024). Integrated GIS-hydrologic-hydraulic modeling to assess combined flood drivers in coastal regions: A case study of Bonita Bay, Florida. *Frontiers in Water*, 6. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1468354>
- Tull, N., & Passalacqua, P. (2025). Flood Wave Attenuation as a Function of Floodplain Storage, Secondary Channel Conveyance, and Discharge. *Water Resources Research*, 61(5), e2024WR038582. <https://doi.org/10.1029/2024WR038582>
- Turkel, A. O., Zaifoglu, H., & Yanmaz, A. M. (2024). Probabilistic modeling of dam failure scenarios: A case study of Kanlikoy Dam in Cyprus. *Natural Hazards*, 120(11), 10087–10117. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06599-w>
- US Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS 5.0 Reference Manual*. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- USACE. (2014). *Using HEC-RAS for Dam Break Studies*.

- Vozinaki, A.-E. K., Morianou, G. G., Alexakis, D. D., & Tsanis, I. K. (2017). Comparing 1D and combined 1D/2D hydraulic simulations using high-resolution topographic data: A case study of the Koiliaris basin, Greece. *Hydrological Sciences Journal*, 62(4), 642–656. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1255746>
- Wahl, T. L. (2004). Uncertainty of Predictions of Embankment Dam Breach Parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(5), 389–397. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:5\(389\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:5(389))
- WSV. (2026, Juli 8). *WSV GeoPortal*. geo.admin.ch. <https://map.geo.admin.ch>
- Yu, H., Du, L., Lai, C., Luo, P., Wang, Z., & Zeng, Z. (2025). An assessment framework of dam-break flood risk in highly populated and property-intensive area: Case study for the Longdong reservoir. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 58, 102201. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102201>

Anhang

Anhang A: GIS-gestützte Verarbeitungsschritte

Skript	Zweck	Entspricht QGIS-Werkzeug
01_dgm1_mosaik	DGM1-Kacheln zu einem Mosaik zusammenfügen	Merge / Raster-Mosaik
02_bathymetrie	Peildaten zu Sohlraster interpolieren	Rasterize / Interpolation (TIN, IDW)
03_dem_continuous	DGM1 und Bathymetrie zum durchgehenden Gelände verschneiden	Raster Calculator
04_report	Abbildungen und Kennwerte des Geländemodells	Darstellung / Statistik
05_volumen	Aufgestautes Stauraumvolumen aus dem Gelände	Raster Surface Volume
06_kennlinie	Stauraumkennlinie (Volumen und Fläche über dem Wasserstand)	Raster Surface Volume (über Wasserstände)
07_breschen	Breschenweiten, Sohlhöhen und hydraulische Kennwerte	Berechnung / Darstellung
08_manning	Manning-Beiwert aus der Landnutzung ableiten	Rasterize (Vektor → Raster nach Attribut)
09_breschenganglinie	Breschenganglinien nach Poleni und Level-Pool-Routing	hydraulische Berechnung
10_auswertung	Überflutungsflächen und Wassertiefen aus den HEC-RAS-Depth-Rastern	Raster Calculator / Zonal Statistics

Anhang B: Quellcode der GIS-Verarbeitungsschritte

```
import os, glob
from osgeo import gdal, osr
gdal.UseExceptions()

BASE = r"D:\path\inputs"
OUT = os.path.join(BASE, "analysis", "outputs")
DGM1 = os.path.join(BASE, "wetransfer", "DGM1_Ufer_Unterwasser")
EPSG, NODATA = 25832, -9999.0
os.makedirs(OUT, exist_ok=True)
tmp = os.path.join(OUT, "_tmp_dgm1"); os.makedirs(tmp, exist_ok=True)

srs = osr.SpatialReference(); srs.ImportFromEPSG(EPSG); wkt = srs.ExportToWkt()
tiles = sorted(glob.glob(os.path.join(DGM1, "*.txt")))
tifs = []
for t in tiles:
    o = os.path.join(tmp, os.path.splitext(os.path.basename(t))[0] + ".tif")
    src = gdal.OpenEx(t, allowed_drivers=["XYZ"])
    gdal.Translate(o, src, outputSRS=wkt, noData=NODATA,
                  creationOptions=["COMPRESS=DEFLATE", "TILED=YES"])
    tifs.append(o)

vrt = os.path.join(tmp, "dgm1.vrt")
gdal.BuildVRT(vrt, tifs, VRTNodata=NODATA)
mosaic = os.path.join(OUT, "dgm1_mosaic.tif")
gdal.Translate(mosaic, vrt,
               creationOptions=["COMPRESS=DEFLATE", "TILED=YES", "BIGTIFF=IF_SAFER"])

ds = gdal.Open(mosaic); b = ds.GetRasterBand(1); gt = ds.GetGeoTransform()
mn, mx, me, sd = b.GetStatistics(True, True)
print("dgm1_mosaic.tif %dx%d px %.2f m Z=%.2f..%.2f m (mean %.2f)"
      % (ds.RasterXSize, ds.RasterYSize, gt[1], mn, mx, me))
```

Listing 1: 01_dgm1_mosaik.py - Zusammenfügen der DGM1-Kacheln zum Mosaik

```
import os, math, shutil, statistics, time
import numpy as np
from osgeo import gdal, ogr, osr
gdal.UseExceptions(); ogr.UseExceptions()

BASE = r"D:\path\inputs"
OUT = os.path.join(BASE, "analysis", "outputs")
FIG = os.path.join(BASE, "analysis", "figures")
os.makedirs(OUT, exist_ok=True); os.makedirs(FIG, exist_ok=True)
EPSG, NODATA = 25832, -9999.0
ZMIN, ZMAX = 150.0, 260.0 # plausible Sohlhoehen am Standort [m]
FILL_DIST = 5 # max. Fuelldistanz kleiner Luecken [Pixel/m]

DATASETS = {
    "ow": os.path.join(BASE, "wetransfer", "Peildaten_Schweinfurt_Oberwasser",
                       "Peildaten_Schweinfurt_Oberwasser.shp"),
    "uw": os.path.join(BASE, "dosyalarGIS", "Peildaten_SH_Garstadt",
                       "Peildaten_SH_Garstadt.shp"),
}

# DGM1-Mosaik in einheitlichen Ablageort uebernehmen
_old, _new = os.path.join(BASE, "outputs", "dgm1_mosaic.tif"), os.path.join(OUT, "dgm1_mosaic.tif")
if os.path.exists(_old) and not os.path.exists(_new):
    shutil.copy2(_old, _new)

def pick_z_source(lyr):
    """Waehlt Z-Quelle (Geometrie-Z oder Attributfeld), deren Median plausibel ist."""
    defn = lyr.GetLayerDefn()
    fields = [defn.GetFieldDefn(i).GetName() for i in range(defn.GetFieldCount())
              if defn.GetFieldDefn(i).GetTypeName() in ("Real", "Integer", "Integer64")]
    gz, fz = [], {f: [] for f in fields}
```

```

lyr.ResetReading()
for i, feat in enumerate(lyr):
    if i >= 3000: break
    g = feat.GetGeometryRef()
    if g is not None:
        try: gz.append(g.GetZ())
        except Exception: pass
    for f in fields:
        v = feat.GetField(f)
        if v is not None: fz[f].append(v)
cand = ([("__geom__", statistics.median(gz))] if gz else []) + \
        [(f, statistics.median(v)) for f, v in fz.items() if v]
lyr.ResetReading()
for name, med in cand:
    if ZMIN <= med <= ZMAX:
        return name
return "__geom__"

def process(tag, shp):
    t0 = time.time()
    ds = ogr.Open(shp); lyr = ds.GetLayer(0)
    n = lyr.GetFeatureCount()
    zsrc = pick_z_source(lyr)
    print(f"[{tag}] {n} Peilpunkte, Z-Quelle = "
          f"{ 'Geometrie-Z' if zsrc=='__geom__' else zsrc}", flush=True)

    # Punkte einlesen
    xs = np.empty(n); ys = np.empty(n); zs = np.empty(n)
    lyr.ResetReading()
    for i, feat in enumerate(lyr):
        g = feat.GetGeometryRef()
        xs[i] = g.GetX(); ys[i] = g.GetY()
        zs[i] = g.GetZ() if zsrc == "__geom__" else feat.GetField(zsrc)
    ds = None
    print(f"[{tag}] eingelesen ({time.time()-t0:.0f}s)", flush=True)

    # Rasterrahmen (1 m, integer-aligned zum DGM)
    xmin, ymin = math.floor(xs.min()), math.floor(ys.min())
    xmax, ymax = math.ceil(xs.max()), math.ceil(ys.max())
    W, H = int(xmax - xmin), int(ymax - ymin)

    # Zellweise Mittelung per bincount
    col = np.floor(xs - xmin).astype(np.int64)
    row = np.floor(ymax - ys).astype(np.int64) # north-up
    ok = (col >= 0) & (col < W) & (row >= 0) & (row < H)
    idx = row[ok] * W + col[ok]
    sums = np.bincount(idx, weights=zs[ok], minlength=W * H)
    cnts = np.bincount(idx, minlength=W * H)
    bed = np.full(W * H, NODATA, dtype=np.float32)
    nz = cnts > 0
    bed[nz] = (sums[nz] / cnts[nz]).astype(np.float32)
    bed = bed.reshape(H, W)
    filled = int(nz.sum())
    del sums, cnts, idx, col, row
    print(f"[{tag}] gerastert {W}x{H}, belegte Zellen {filled} "
          f"({100*filled/(W*H):.1f}%)", flush=True)

    # GeoTIFF schreiben + kleine Luecken fuehlen
    final = os.path.join(OUT, f"bathy_{tag}.tif")
    drv = gdal.GetDriverByName("GTiff")
    o = drv.Create(final, W, H, 1, gdal.GDT_Float32, ["COMPRESS=DEFLATE", "TILED=YES"])
    o.SetGeoTransform((xmin, 1, 0, ymax, 0, -1))
    srs = osr.SpatialReference(); srs.ImportFromEPSG(EPSG); o.SetProjection(srs.ExportToWkt())
    b = o.GetRasterBand(1); b.SetNoDataValue(NODATA); b.WriteArray(bed); b.FlushCache()
    gdal.FillNodata(b, None, maxSearchDist=FILL_DIST, smoothingIterations=1)
    b.FlushCache()
    arr = b.ReadAsArray(); o = None

    valid = arr[arr != NODATA]
    print(f"[{tag}] FERTIG bathy_{tag}.tif Sohle = {valid.min():.2f}..{valid.max():.2f} m "
          f"(mean {valid.mean():.2f}) [{time.time()-t0:.0f}s]", flush=True)

```

```

# QC-Vorschau
try:
    import matplotlib; matplotlib.use("Agg"); import matplotlib.pyplot as plt
    v = np.where(arr == NODATA, np.nan, arr)[:4, :4]
    plt.figure(figsize=(9, 6))
    im = plt.imshow(v, cmap="viridis"); plt.colorbar(im, label="Sohlhoehe [m DHHN2016]")
    plt.title(f"Bathymetrie {tag.upper()}"); plt.axis("off"); plt.tight_layout()
    plt.savefig(os.path.join(FIG, f"preview_bathy_{tag}.png"), dpi=110); plt.close()
except Exception as e:
    print(f"[{tag}] (Vorschau uebersprungen: {e})", flush=True)

for tag, shp in DATASETS.items():
    process(tag, shp)

```

Listing 2: 02_bathymetrie.py - Rasterung der Peildaten zur Gewässersohle

```

import os
import numpy as np
from osgeo import gdal, osr
gdal.UseExceptions()

BASE = r"D:\path\inputs"
OUT = os.path.join(BASE, "analysis", "outputs")
FIG = os.path.join(BASE, "analysis", "figures")
os.makedirs(FIG, exist_ok=True)
NODATA = -9999.0

dgm_p = os.path.join(OUT, "dgm1_mosaic.tif")
ow_p = os.path.join(OUT, "bathy_ow.tif")
uw_p = os.path.join(OUT, "bathy_uw.tif")
dem_p = os.path.join(OUT, "dem_continuous.tif")
hill_p = os.path.join(OUT, "dem_hillshade.tif")

# --- Master-Gitter (DGM1) ---
dgm = gdal.Open(dgm_p)
gt = dgm.GetGeoTransform(); prj = dgm.GetProjection()
W, H = dgm.RasterXSize, dgm.RasterYSize
xmin, xmax = gt[0], gt[0] + W * gt[1]
ymax, ymin = gt[3], gt[3] + H * gt[5]
dgm_a = dgm.GetRasterBand(1).ReadAsArray().astype(np.float32)
dgm_nd = dgm.GetRasterBand(1).GetNoDataValue()
dgm = None
print(f"Master-Gitter DGM1: {W}x{H} @1m X {xmin:.0f}..{xmax:.0f} Y {ymin:.0f}..{ymax:.0f}",
      flush=True)

def warp_to_grid(src):
    """Bathymetrie auf das DGM1-Gitter legen (deckungsgleich, nearest)."""
    ds = gdal.Warp("", src, format="MEM", outputBounds=[xmin, ymin, xmax, ymax],
                  width=W, height=H, resampleAlg="near",
                  srcNodata=NODATA, dstNodata=NODATA)
    a = ds.GetRasterBand(1).ReadAsArray().astype(np.float32)
    ds = None
    return a

ow = warp_to_grid(ow_p)
uw = warp_to_grid(uw_p)

# --- Bathymetrie kombinieren (Ueberlappung Barrage: Mittel) ---
ow_v, uw_v = (ow != NODATA), (uw != NODATA)
bathy = np.full((H, W), NODATA, np.float32)
bathy[ow_v] = ow[ow_v]
bathy[uw_v] = uw[uw_v]
both = ow_v & uw_v
bathy[both] = 0.5 * (ow[both] + uw[both])
b_v = bathy != NODATA
print(f"Bathymetrie im DGM1-Gitter: OW={int(ow_v.sum())} UW={int(uw_v.sum())} "
      f"Ueberlappung={int(both.sum())} gesamt={int(b_v.sum())} Zellen", flush=True)

```

```

# --- Diagnose Naht: was liefert DGM1 ueber der Wasserflaeche? ---
dgm_water = dgm_a[b_v & (dgm_a != (dgm_nd if dgm_nd is not None else NODATA))]
if dgm_water.size:
    print(f"Naht-Diagnose: DGM1 ueber Wasser = {dgm_water.min():.2f}..{dgm_water.max():.2f} m "
          f"(mean {dgm_water.mean():.2f}, std {dgm_water.std():.2f})", flush=True)

# --- Verschneidung: DGM1 aussen, Bathymetrie (Sohle) innen ---
dem = dgm_a.copy()
if dgm_nd is not None:
    dem[dgm_a == dgm_nd] = NODATA
dem[b_v] = bathy[b_v]

# Einbrenntiefe (DGM - Sohle) an Wasserzellen als QC
burn = dgm_a[b_v] - bathy[b_v]
burn = burn[np.isfinite(burn)]
print(f"Einbrenntiefe DGM->Sohle: median {np.median(burn):.2f} m "
      f"p95 {np.percentile(burn,95):.2f} m max {burn.max():.2f} m", flush=True)

# --- Schreiben ---
drv = gdal.GetDriverByName("GTiff")
o = drv.Create(dem_p, W, H, 1, gdal.GDT_Float32,
               ["COMPRESS=DEFLATE", "TILED=YES", "BIGTIFF=IF_SAFER"])
o.SetGeoTransform(gt); o.SetProjection(prj)
ob = o.GetRasterBand(1); ob.SetNoDataValue(NODATA); ob.WriteArray(dem); ob.FlushCache()
o = None

valid = dem[dem != NODATA]
print(f"dem_continuous.tif Z {valid.min():.2f}..{valid.max():.2f} m "
      f"(mean {valid.mean():.2f}) NoData-Zellen {int((dem==NODATA).sum())}", flush=True)

# --- Hillshade ---
gdal.DEMProcessing(hill_p, dem_p, "hillshade", computeEdges=True, zFactor=2)
print("dem_hillshade.tif geschrieben", flush=True)

# --- QC-Vorschau: DEM (Farbe) + Schummerung, Gesamt + Zoom Barrage ---
try:
    import matplotlib; matplotlib.use("Agg"); import matplotlib.pyplot as plt
    _hs = gdal.Open(hill_p); hs = _hs.GetRasterBand(1).ReadAsArray(); _hs = None
    demv = np.where(dem == NODATA, np.nan, dem)

    def panel(ax, sl, title):
        ax.imshow(hs[sl], cmap="gray", vmin=0, vmax=255)
        ax.imshow(demv[sl], cmap="terrain", alpha=0.55)
        ax.set_title(title); ax.axis("off")

    s = (slice(0, H, 4), slice(0, W, 4))
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 12)); panel(ax, s, "Nahtloses DEM + Schummerung")
    fig.tight_layout(); fig.savefig(os.path.join(FIG, "preview_dem_continuous.png"), dpi=110)
    plt.close(fig)

    # Zoom auf Ueberlappungs-/Barragebereich (Schwerpunkt der Wasserzellen)
    ys, xs = np.where(both if both.any() else b_v)
    cy, cx = int(ys.mean()), int(xs.mean()); r = 500
    sz = (slice(max(0, cy - r), min(H, cy + r)), slice(max(0, cx - r), min(W, cx + r)))
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(9, 9)); panel(ax, sz, "Zoom Naht/Barrage (1 km)")
    fig.tight_layout(); fig.savefig(os.path.join(FIG, "preview_dem_naht_zoom.png"), dpi=120)
    plt.close(fig)
    print("QC-Vorschau geschrieben (figures\\preview_dem_continuous.png, _naht_zoom.png)",
          flush=True)
except Exception as e:
    print("(Vorschau uebersprungen:", e, ")", flush=True)

```

Listing 3: 03_dem_continuous.py - Verschneidung von DGM1 und Bathymetrie

```

import os, glob, datetime
import numpy as np
from osgeo import gdal, ogr
gdal.UseExceptions()
import matplotlib; matplotlib.use("Agg")

```

```

import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.patches import Rectangle

BASE = r"D:\path\inputs"
OUT = os.path.join(BASE, "analysis", "outputs")
FIG = os.path.join(BASE, "analysis", "figures")
DGM1_DIR = os.path.join(BASE, "wetransfer", "DGM1_Ufer_Unterwasser")
NODATA = -9999.0

def read(path):
    ds = gdal.Open(path); b = ds.GetRasterBand(1)
    a = b.ReadAsArray().astype(np.float32)
    gt = ds.GetGeoTransform()
    nd = b.GetNoDataValue()
    W, H = ds.RasterXSize, ds.RasterYSize
    ext = [gt[0], gt[0] + W * gt[1], gt[3] + H * gt[5], gt[3]] # l,r,b,t
    ds = None
    if nd is not None:
        a = np.where(a == nd, np.nan, a)
    return a, ext

def scalebar(ax, length_m=1000, label="1 km"):
    (x0, x1) = ax.get_xlim(); (y0, y1) = sorted(ax.get_ylim())
    x = x0 + (x1 - x0) * 0.06; y = y0 + (y1 - y0) * 0.06
    ax.add_patch(Rectangle((x, y), length_m, (y1 - y0) * 0.008,
                           facecolor="black", edgecolor="black", zorder=5))
    ax.text(x + length_m / 2, y + (y1 - y0) * 0.02, label, ha="center",
           va="bottom", fontsize=9, zorder=5)

def north(ax):
    (x0, x1) = ax.get_xlim(); (y0, y1) = ax.get_ylim()
    x = x1 - (x1 - x0) * 0.06; y = y1 - (y1 - y0) * 0.06
    ax.annotate("N", xy=(x, y), xytext=(x, y - (y1 - y0) * 0.07),
               ha="center", va="center", fontsize=12, fontweight="bold",
               arrowprops=dict(arrowstyle="-|>", color="black", lw=1.6), zorder=5)

def frame(ax, title, sb_len=1000, sb_lbl="1 km"):
    ax.set_title(title, fontsize=12)
    ax.set_xlabel("East [m] (EPSG:25832)"); ax.set_ylabel("North [m]")
    ax.ticklabel_format(style="plain"); ax.tick_params(labelsize=8)
    scalebar(ax, sb_len, sb_lbl); north(ax)

def hillshade(dem, az=315, alt=45, z=2):
    dy, dx = np.gradient(np.nan_to_num(dem, nan=np.nanmean(dem)))
    slope = np.pi/2 - np.arctan(z*np.hypot(dx, dy))
    aspect = np.arctan2(-dx, dy)
    a = np.radians(az); h = np.radians(alt)
    hs = np.sin(h)*np.sin(slope) + np.cos(h)*np.cos(slope)*np.cos(a-aspect)
    return np.clip(hs, 0, 1)

# --- Daten ---
dem, ext = read(os.path.join(OUT, "dem_continuous.tif"))
dgm, _ = read(os.path.join(OUT, "dgm1_mosaic.tif"))
ow, ext_ow = read(os.path.join(OUT, "bathy_ow.tif"))
uw, ext_uw = read(os.path.join(OUT, "bathy_uw.tif"))
hs = hillshade(dem)

DS = 2 # Downsampling fuer Darstellung
def d(a): return a[::DS, ::DS]

# --- Abb. 1: DGM1-Mosaik ---
fig, ax = plt.subplots(figsize=(9, 11))
ax.imshow(d(hillshade(dgm)), cmap="gray", extent=ext, origin="upper", vmin=0, vmax=1)
im = ax.imshow(d(dgm), cmap="terrain", extent=ext, origin="upper", alpha=0.55)
frame(ax, "DGM1-Mosaik - Trockengelaende (1 m, DHHN2016)")
plt.colorbar(im, ax=ax, shrink=0.6, label="Hoehe [m DHHN2016]")
fig.tight_layout(); fig.savefig(os.path.join(FIG, "abb_3_1_dgm1.png"), dpi=150); plt.close(fig)

# --- Abb. 2: Bathymetrie OW + UW ---
fig, ax = plt.subplots(figsize=(9, 11))
ax.imshow(d(hs), cmap="gray", extent=ext, origin="upper", vmin=0, vmax=1)

```

```

vmin = np.nanmin([np.nanmin(ow), np.nanmin(uw)]); vmax = np.nanmax([np.nanmax(ow), np.nan-
max(uw)])
ax.imshow(ow[:,DS, :DS], cmap="viridis", extent=ext_ow, origin="upper", vmin=vmin, vmax=vmax)
im = ax.imshow(uw[:,DS, :DS], cmap="viridis", extent=ext_uw, origin="upper", vmin=vmin,
vmax=vmax)
frame(ax, "Interpolierte Sohle aus Peildaten (OW + UW)")
plt.colorbar(im, ax=ax, shrink=0.6, label="Sohlhoehe [m DHHN2016]")
fig.tight_layout(); fig.savefig(os.path.join(FIG, "abb_3_1_bathy.png"), dpi=150); plt.close(fig)

# --- Abb. 3: Nahtloses DEM (Hauptprodukt) ---
fig, ax = plt.subplots(figsize=(9, 11))
ax.imshow(d(hs), cmap="gray", extent=ext, origin="upper", vmin=0, vmax=1)
im = ax.imshow(d(dem), cmap="terrain", extent=ext, origin="upper", alpha=0.6)
frame(ax, "Durchgehendes Gelaendemodell (DGM1 + Bathymetrie)")
plt.colorbar(im, ax=ax, shrink=0.6, label="Hoehe [m DHHN2016]")
fig.tight_layout(); fig.savefig(os.path.join(FIG, "abb_3_1_dem.png"), dpi=150); plt.close(fig)

# --- Abb. 4: Naht-Detail (sauberer Mittelabschnitt des Flusslaufs) ---
# Zoomzentrum = Median der Wasserzellen (UW), garantiert im Kanal, ohne Kachelrand.
gt_uw_x0, gt_uw_y1 = ext_uw[0], ext_uw[3]
ry, rx = np.where(np.isfinite(uw))
world_x = gt_uw_x0 + rx + 0.5
world_y = gt_uw_y1 - ry - 0.5
mcx, mcy = np.median(world_x), np.median(world_y)
H, W = dem.shape; r = 350
cx = int(mcx - ext[0]); cy = int(ext[3] - mcy)
sy = slice(max(0, cy-r), min(H, cy+r)); sx = slice(max(0, cx-r), min(W, cx+r))
sub_ext = [ext[0]+sx.start, ext[0]+sx.stop, ext[3]-sy.stop, ext[3]-sy.start]
fig, ax = plt.subplots(figsize=(9, 8))
ax.imshow(hs[sy, sx], cmap="gray", extent=sub_ext, origin="upper", vmin=0, vmax=1)
im = ax.imshow(dem[sy, sx], cmap="terrain", extent=sub_ext, origin="upper", alpha=0.6)
frame(ax, "Detail: Verschneidungsnacht Bathymetrie-Trockengelaende", 250, "250 m")
plt.colorbar(im, ax=ax, shrink=0.6, label="Hoehe [m DHHN2016]")
fig.tight_layout(); fig.savefig(os.path.join(FIG, "abb_3_1_naht.png"), dpi=150); plt.close(fig)

# --- Kennwerte ---
tiles = sorted(glob.glob(os.path.join(DGM1_DIR, "*.txt")))
def cnt_pts(shp):
    ds = ogr.Open(shp); n = ds.GetLayer(0).GetFeatureCount(); ds = None; return n
n_ow = cnt_pts(os.path.join(BASE, "wetransfer", "Peildaten_Schweinfurt_Oberwasser",
"Peildaten_Schweinfurt_Oberwasser.shp"))
n_uw = cnt_pts(os.path.join(BASE, "dosyalarGIS", "Peildaten_SH_Garstadt",
"Peildaten_SH_Garstadt.shp"))
valid = int(np.isfinite(dem).sum())
wet = int(np.isfinite(ow).sum()) + np.isfinite(uw).sum())

L = []
L.append("Kennwerte 3.1.1 - Durchgehendes Gelaendemodell")
L.append("Erstellt: " + datetime.datetime.now().isoformat(timespec="seconds"))
L.append("Lagebezug ETRS89/UTM32N (EPSG:25832), Höhenbezug DHHN2016, Auflösung 1 m")
L.append("")
L.append("Eingangsdaten")
L.append(f" DGM1-Kacheln (Trockengelände): {len(tiles)} (1x1 km, XYZ, 1 m)")
L.append(f" Peilpunkte Oberwasser: {n_ow}")
L.append(f" Peilpunkte Unterwasser: {n_uw}")
L.append("")
L.append("Methodik")
L.append(" Bathymetrie: zellweise Mittelung der Peilpunkte auf 1-m-Raster;")
L.append(" Restlücken per IDW-Fill (max. 5 m). Verschneidung: DGM1 außerhalb,")
L.append(" Bathymetrie (Sohle) innerhalb der vermessenen Wasserfläche; im")
L.append(" Überlappungsbereich Ober-/Unterwasser arithmetisches Mittel.")
L.append("")
L.append("Ergebnis (dem_continuous.tif)")
L.append(f" Rasterrahmen: {W} x {H} Zellen, X {ext[0]:.0f}-{ext[1]:.0f}, Y {ext[2]:.0f}-
{ext[3]:.0f}")
L.append(f" Höhe min/max: {np.nanmin(dem):.2f} / {np.nanmax(dem):.2f} m DHHN2016 (Mittel
{np.nanmean(dem):.2f})")
L.append(f" Gültige Modellfläche: {valid/1e6:.2f} km²")
L.append(f" Vermessene Wasserfläche (OW+UW): {wet/1e6:.2f} km²")
L.append(f" Sohle Oberwasser: {np.nanmin(ow):.2f}-{np.nanmax(ow):.2f} m")
L.append(f" Sohle Unterwasser: {np.nanmin(uw):.2f}-{np.nanmax(uw):.2f} m")

```

```

with open(os.path.join(OUT, "README_3_1_1.txt"), "w", encoding="utf-8") as f:
    f.write("\n".join(L))
print("\n".join(L))
print("\nAbbildungen: abb_3_1_dgm1.png, abb_3_1_bathy.png, abb_3_1_dem.png, abb_3_1_naht.png")

```

Listing 4: 04_report.py - Abbildungen und Kennwerte des Geländemodells

```

import os, datetime
import numpy as np
from osgeo import gdal
gdal.UseExceptions()

BASE = r"D:\path\inputs"
OUT = os.path.join(BASE, "analysis", "outputs")
FIG = os.path.join(BASE, "analysis", "figures")
NODATA = -9999.0
LEVELS = {"Stauziel": 207.64, "Hoechststau": 207.94}

# --- Sohle einlesen ---
ds = gdal.Open(os.path.join(OUT, "bathy_ow.tif"))
b = ds.GetRasterBand(1)
bed = b.ReadAsArray().astype(np.float64)
nd = b.GetNoDataValue()
gt = ds.GetGeoTransform()
W, H = ds.RasterXSize, ds.RasterYSize
ext = [gt[0], gt[0] + W * gt[1], gt[3] + H * gt[5], gt[3]]
ds = None
cell = abs(gt[1] * gt[5]) # 1 m²
bed = np.where(bed == nd, np.nan, bed)

log = []
def p(*a):
    s = " ".join(str(x) for x in a); print(s, flush=True); log.append(s)

p("Kennwerte 3.1.2 - Aufgestaute Wassermenge (Staurationvolumen)")
p("Erstellt:", datetime.datetime.now().isoformat(timespec="seconds"))
p("Grundlage: bathy_ow.tif (Staurationsohle), Zellgroesse 1 m, DHHN2016")
p("Sohle Oberwasser: %.2f .. %.2f m" % (np.nanmin(bed), np.nanmax(bed)))
p("")

res = {}
for name, Hs in LEVELS.items():
    depth = Hs - bed
    depth = np.where(depth > 0, depth, np.nan)
    vol = np.nansum(depth) * cell
    ncell = int(np.count_nonzero(~np.isnan(depth)))
    area = ncell * cell
    dmean = np.nanmean(depth); dmax = np.nanmax(depth)
    res[name] = dict(H=Hs, vol=vol, area=area, dmean=dmean, dmax=dmax, depth=depth)
p("%-12s Wsp=%.2f m | V=%.0f m³ (%.3f Mio. m³) | Flaeche=%.3f km² | "
    "Tiefe mittel %.2f m, max %.2f m" %
    (name, Hs, vol, vol/1e6, area/1e6, dmean, dmax))

dV = res["Hoechststau"]["vol"] - res["Stauziel"]["vol"]
p("")
p("Zusatzvolumen Stauziel -> Hoechststau (+0,30 m): %.0f m³ (%.3f Mio. m³)"
    % (dV, dV/1e6))

with open(os.path.join(OUT, "README_3_1_2.txt"), "w", encoding="utf-8") as f:
    f.write("\n".join(log))

# --- Abb. 3.5: Wassertiefe bei Stauziel ---
try:
    import matplotlib; matplotlib.use("Agg")
    import matplotlib.pyplot as plt
    from matplotlib.patches import Rectangle

    depth = res["Stauziel"]["depth"]

```

```

# auf Datenbereich zuschneiden (leere Raender weg)
ys, xs = np.where(~np.isnan(depth))
y0, y1, x0, x1 = ys.min(), ys.max(), xs.min(), xs.max()
sub = depth[y0:y1+1, x0:x1+1]
sub_ext = [ext[0]+x0, ext[0]+x1+1, ext[3]-(y1+1), ext[3]-y0]

fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 6))
im = ax.imshow(sub, cmap="Blues", extent=sub_ext, origin="upper")
ax.set_title("Wassertiefe im Stauraum bei Stauziel (207,64 m DHHN2016)", fontsize=12)
ax.set_xlabel("East [m] (EPSG:25832)"); ax.set_ylabel("North [m]")
ax.ticklabel_format(style="plain"); ax.tick_params(labelsize=8)
(xa, xb) = ax.get_xlim(); (ya, yb) = sorted(ax.get_ylim())
x = xa + (xb-xa)*0.04; y = ya + (yb-ya)*0.08
ax.add_patch(Rectangle((x, y), 1000, (yb-ya)*0.02, facecolor="black", zorder=5))
ax.text(x+500, y+(yb-ya)*0.05, "1 km", ha="center", fontsize=9, zorder=5)
plt.colorbar(im, ax=ax, shrink=0.7, label="Wassertiefe [m]")
fig.tight_layout(); fig.savefig(os.path.join(FIG, "abb_3_2_tiefe.png"), dpi=150)
plt.close(fig)
p("\nAbbildung: abb_3_2_tiefe.png geschrieben")
except Exception as e:
    p("(Abbildung uebersprungen:", e, ")")

```

Listing 5: 05_volumen.py - Berechnung des aufgestauten Stauraumvolumens

```

import os
import numpy as np
from osgeo import gdal
gdal.UseExceptions()

BASE = r"D:\path\inputs"
OUT = os.path.join(BASE, "analysis", "outputs")
FIG = os.path.join(BASE, "analysis", "figures")

ds = gdal.Open(os.path.join(OUT, "bathy_ow.tif"))
b = ds.GetRasterBand(1); bed = b.ReadAsArray().astype(np.float64)
nd = b.GetNoDataValue(); gt = ds.GetGeoTransform(); ds = None
cell = abs(gt[1] * gt[5])
bed = bed[bed != nd] # nur gueltige Sohlzellen (1D reicht)

STAUZIEL, HOECHST = 207.64, 207.94
levels = sorted(set(list(np.round(np.arange(199.0, 208.001, 0.25), 2)) +
    [STAUZIEL, HOECHST]))

rows = []
print("Wsp[m]   Flaechе[km2]   Volumen[Mio m3]", flush=True)
for Hs in levels:
    d = Hs - bed
    d = d[d > 0]
    vol = d.sum() * cell
    area = d.size * cell
    rows.append((Hs, area, vol))
    mark = " <-- Stauziel" if abs(Hs-STAUZIEL) < 1e-6 else \
        (" <-- Hoechststau" if abs(Hs-HOECHST) < 1e-6 else "")
    print("%6.2f   %10.4f   %12.4fs" % (Hs, area/1e6, vol/1e6, mark), flush=True)

# CSV (fuer HEC-RAS Storage Area)
csv = os.path.join(OUT, "stauraumkennlinie.csv")
with open(csv, "w", encoding="utf-8") as f:
    f.write("Wasserstand_m_DHHN2016;Flaechе_km2;Volumen_Mio_m3;Volumen_m3\n")
    for Hs, area, vol in rows:
        f.write("%2f;%4f;%4f;%0f\n" % (Hs, area/1e6, vol/1e6, vol))
print("\nCSV:", csv, flush=True)

# --- Abb. 3.6: Kennlinie ---
try:
    import matplotlib; matplotlib.use("Agg")
    import matplotlib.pyplot as plt
    Hs = np.array([r[0] for r in rows])

```

```

A = np.array([r[1] for r in rows]) / 1e6
V = np.array([r[2] for r in rows]) / 1e6

fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(9, 6))
l1, = ax1.plot(Hs, V, color="#1f4e79", lw=2, label="Volumen")
ax1.set_xlabel("Wasserstand [m DHHN2016]")
ax1.set_ylabel("Volumen [Mio. m³]", color="#1f4e79")
ax1.tick_params(axis="y", labelcolor="#1f4e79")
ax1.grid(True, ls=":", alpha=0.5)

ax2 = ax1.twinx()
l2, = ax2.plot(Hs, A, color="#c55a11", lw=2, ls="--", label="Fläche")
ax2.set_ylabel("Überstaute Fläche [km²]", color="#c55a11")
ax2.tick_params(axis="y", labelcolor="#c55a11")

for xv, txt in [(STAUZIEL, "Stauziel 207,64"), (HOECHST, "Höchststau 207,94")]:
    ax1.axvline(xv, color="grey", ls="-.", lw=1)
    ax1.text(xv, ax1.get_ylim()[1]*0.02, txt, rotation=90,
            va="bottom", ha="right", fontsize=8, color="grey")

ax1.set_title("Stauraumkennlinie - Volumen und Fläche über dem Wasserstand")
ax1.legend(handles=[l1, l2], loc="upper left", fontsize=9)
fig.tight_layout(); fig.savefig(os.path.join(FIG, "abb_3_2_kennlinie.png"), dpi=150)
plt.close(fig)
print("Abbildung: abb_3_2_kennlinie.png geschrieben", flush=True)
except Exception as e:
    print("(Abbildung uebersprungen:", e, ")", flush=True)

```

Listing 6: 06_kennlinie.py - Ableitung der Stauraumkennlinie

```

import os
BASE = r"D:\path\inputs"
FIG = os.path.join(BASE, "analysis", "figures")
os.makedirs(FIG, exist_ok=True)

STAUZIEL, HOECHST = 207.64, 207.94
SZEN = [
    ("Schiffsschleuse", 12, 203.14),
    ("Wasserkraftwerk", 26, 200.04),
    ("Wehr + Sportbootschleuse", 70, 202.14),
    ("Komplette Staustufe", 156, 200.04),
]

print("%-26s %6s %9s %10s %12s" % ("Szenario", "b[m]", "Sohle[m]", "h_Stau[m]", "A_Stau[m²]"))
rows = []
for name, b, S in SZEN:
    h = STAUZIEL - S
    A = b * h
    rows.append((name, b, S, h, A))
print("%-26s %6d %9.2f %10.2f %12.1f" % (name, b, S, h, A))

import matplotlib; matplotlib.use("Agg")
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.patches import Rectangle

colors = ["#4477aa", "#66ccce", "#228833", "#ccbb44"]
fig, ax = plt.subplots(figsize=(13, 6.5))
x, gap, ticks, labels = 12.0, 34.0, [], []
for (name, b, S, h, A), c in zip(rows, colors):
    ax.add_patch(Rectangle((x, S), b, STAUZIEL - S, facecolor=c,
                           edgecolor="black", lw=0.8, alpha=0.9, zorder=3))

    cx = x + b / 2.0
    ax.text(cx, 208.22, "A ≈ %.0f m²" % A, ha="center", va="bottom",
            fontsize=9.5, fontweight="bold", zorder=4)
    ax.text(cx, S + (STAUZIEL - S) / 2.0, ("h = %.2f m" % h).replace(".", ","),
            ha="center", va="center", fontsize=8.5, zorder=4)
    ticks.append(cx)
    labels.append("%s\n(b = %d m)" % (name, b))

```

```

x += b + gap

xmax = x - gap
ax.axhline(STAUZIEL, color="#1f4e79", lw=1.6, zorder=2)
ax.axhline(HOECHST, color="grey", lw=1.0, ls="--", zorder=2)
ax.text(xmax + 12, STAUZIEL - 0.06, "Stauziel 207,64 m", va="top", ha="left",
        fontsize=8, color="#1f4e79")
ax.text(xmax + 12, HOECHST + 0.06, "Höchststau 207,94 m", va="bottom", ha="left",
        fontsize=8, color="grey")

ax.set_xlim(-10, xmax + 150)
ax.set_ylim(199.3, 209.0)
ax.set_ylabel("Höhe [m DHHN2016]")
ax.set_xticks(ticks)
ax.set_xticklabels(labels, fontsize=9)
ax.tick_params(axis="x", length=0)
ax.set_title("Vergleich der vier Breschenquerschnitte (maßstäblich)")
ax.grid(axis="y", ls=":", alpha=0.4)
ax.spines["top"].set_visible(False)
ax.spines["right"].set_visible(False)
fig.tight_layout()
fig.savefig(os.path.join(FIG, "abb_3_3_breschen.png"), dpi=150)
plt.close(fig)
print("\nAbbildung: abb_3_3_breschen.png geschrieben")

```

Listing 7: 07_breschen.py - Breschenweiten, Sohlhöhen, hydraulische Kennwerte

```

import os
import numpy as np
from osgeo import gdal, ogr, osr
gdal.UseExceptions(); ogr.UseExceptions()

BASE = r"D:\path\inputs"
OUT = os.path.join(BASE, "analysis", "outputs")
FIG = os.path.join(BASE, "analysis", "figures")
GPKG = os.path.join(BASE, "landnutzung_clip.gpkg")
DEM = os.path.join(OUT, "dem_continuous.tif")
EPSG = 25832
DEFAULT_N = 0.032 # nicht klassifiziert / Gerinne

# Nutzungsart (Layername) -> Manning n (6 Klassen)
MANNING = {
    # Bebauung
    "ln_wohnnutzung": 0.10, "ln_industrieundverarbeitendesgewerbe": 0.10,
    "ln_gewerblichedienstleistungen": 0.10, "ln_oeffentlicheeinrichtungen": 0.10,
    "ln_versorgungundentsorgung": 0.10, "ln_lagerung": 0.10, "ln_kulturundunterhaltung": 0.10,
    # versiegelter Verkehr
    "ln_strassenundwege": 0.025, "ln_bahnverkehr": 0.025,
    # Landwirtschaft
    "ln_landwirtschaft": 0.040,
    # Wald
    "ln_forstwirtschaft": 0.120,
    # Gruen-/Freiflaechen
    "ln_freiluftundnaerholung": 0.035, "ln_sportanlage": 0.035, "ln_freizeitanlage": 0.035,
    "ln_bestattung": 0.035, "ln_ohnenutzung": 0.035,
    # Wasser / offene Flaechen
    "ln_schiffsverkehr": 0.032, "ln_abbau": 0.030,
}

# Farb-/Gruppenlegende
GROUPS = [
    (0.10, "Bebauung", "#c44e52"),
    (0.025, "Verkehr (versiegelt)", "#7f7f7f"),
    (0.040, "Landwirtschaft", "#dbc266"),
    (0.120, "Wald", "#2c7a2c"),
    (0.035, "Grün-/Freiflächen", "#8fca7a"),
    (0.032, "Wasser / Gerinne", "#4a90c2"),
    (0.030, "Abbau / offen", "#b0895a"),
]

```

```

# --- Flaechen zu einer Merge-Layer mit Feld 'mn' zusammenfuehren ---
mem = ogr.GetDriverByName("Memory").CreateDataSource("m")
srs = osr.SpatialReference(); srs.ImportFromEPSG(EPSG)
mlyr = mem.CreateLayer("lc", srs, ogr.wkbMultiPolygon)
mlyr.CreateField(ogr.FieldDefn("mn", ogr.OFTReal))
f = ogr.FieldDefn("klasse", ogr.OFTString); f.SetWidth(60); mlyr.CreateField(f)

gp = ogr.Open(GPKG)
areas = {}
for i in range(gp.GetLayerCount()):
    L = gp.GetLayerByIndex(i); name = L.GetName()
    mn = MANNING.get(name, DEFAULT_N)
    a = 0.0
    for feat in L:
        g = feat.GetGeometryRef()
        if g is None: continue
        of = ogr.Feature(mlyr.GetLayerDefn())
        of.SetField("mn", mn); of.SetField("klasse", name)
        of.SetGeometry(g.Clone()); mlyr.CreateFeature(of); of = None
        try: a += g.GetArea()
        except Exception: pass
    areas[name] = (mn, a)
gp = None

print("%-38s %6s %10s" % ("Nutzungsart", "n", "Flaeche[ha]"))
for name, (mn, a) in sorted(areas.items(), key=lambda x: -x[1][1]):
    print("%-38s %6.3f %10.1f" % (name, mn, a / 1e4))

# --- Rasterisieren auf das DGM-Gitter (n je Zelle) ---
dem = gdal.Open(DEM); gt = dem.GetGeoTransform(); prj = dem.GetProjection()
W, H = dem.RasterXSize, dem.RasterYSize; dem = None
mtif = os.path.join(OUT, "manning_n.tif")
drv = gdal.GetDriverByName("GTiff")
o = drv.Create(mtif, W, H, 1, gdal.GDT_Float32, ["COMPRESS=DEFLATE", "TILED=YES"])
o.SetGeoTransform(gt); o.SetProjection(prj)
o.GetRasterBand(1).Fill(DEFAULT_N)
gdal.RasterizeLayer(o, [1], mlyr, options=["ATTRIBUTE=mn"])
o.FlushCache(); arr = o.GetRasterBand(1).ReadAsArray(); o = None
print("\nmanning_n.tif geschrieben | n: %.3f .. %.3f (Mittel %.3f)"
      % (arr.min(), arr.max(), arr.mean()))

# --- Land-Cover-Polygone fuer HEC-RAS exportieren ---
shp = os.path.join(OUT, "manning_landcover.shp")
for e in (".shp", ".shx", ".dbf", ".prj"):
    if os.path.exists(shp[:-4] + e): os.remove(shp[:-4] + e)
shpdrv = ogr.GetDriverByName("ESRI Shapefile"); sds = shpdrv.CreateDataSource(shp)
slyr = sds.CreateLayer("landcover", srs, ogr.wkbMultiPolygon)
slyr.CreateField(ogr.FieldDefn("mn", ogr.OFTReal))
f2 = ogr.FieldDefn("klasse", ogr.OFTString); f2.SetWidth(60); slyr.CreateField(f2)
mlyr.ResetReading()
for feat in mlyr:
    nf = ogr.Feature(slyr.GetLayerDefn())
    nf.SetField("mn", feat.GetField("mn")); nf.SetField("klasse", feat.GetField("klasse"))
    nf.SetGeometry(feat.GetGeometryRef().Clone()); slyr.CreateFeature(nf); nf = None
sds = None
print("manning_landcover.shp geschrieben")

# --- Abbildung: Manning-Verteilung ---
try:
    import matplotlib; matplotlib.use("Agg")
    import matplotlib.pyplot as plt
    from matplotlib.patches import Rectangle, Patch
    ext = [gt[0], gt[0] + W * gt[1], gt[3] + H * gt[5], gt[3]]
    # diskrete Farben je n-Wert
    vals = sorted({g[0] for g in GROUPS})
    cmap = {v: c for v, _, c in GROUPS}
    rgb = np.zeros((H, W, 3), np.float32)
    import matplotlib.colors as mcolors
    for v, _, c in GROUPS:
        cc = np.array(mcolors.to_rgb(c))

```

```

        m = np.isclose(arr, v, atol=0.0005)
        for k in range(3): rgb[... , k][m] = cc[k]
# auf das 2D-Gebiet maskieren (ausserhalb weiss), damit der Default-Hintergrund
# nicht faelschlich als Wasser erscheint
fa = os.path.join(OUT, "flow_area_2d.shp")
if os.path.exists(fa):
    mds = gdal.Rasterize("", fa, format="MEM",
                        outputBounds=[ext[0], ext[2], ext[1], ext[3]],
                        width=W, height=H, burnValues=[1], allTouched=True,
                        outputType=gdal.GDT_Byte)
    mask = mds.GetRasterBand(1).ReadAsArray(); mds = None
    rgb[mask == 0] = 1.0

fig, ax = plt.subplots(figsize=(9, 11))
ax.imshow(rgb[:, :2, :2], extent=ext, origin="upper")
ax.set_title("Manning-Beiwerte aus der Landnutzung")
ax.set_xlabel("East [m] (EPSG:25832)"); ax.set_ylabel("North [m]")
ax.ticklabel_format(style="plain"); ax.tick_params(labelsize=8)
(x0, x1) = ax.get_xlim(); (y0, y1) = sorted(ax.get_ylim())
xx = x0 + (x1 - x0) * 0.06; yy = y0 + (y1 - y0) * 0.05
ax.add_patch(Rectangle((xx, yy), 1000, (y1 - y0) * 0.008, facecolor="black", zorder=5))
ax.text(xx + 500, yy + (y1 - y0) * 0.02, "1 km", ha="center", fontsize=9, zorder=5)
leg = [Patch(facecolor=c, label="%s (n = %s)" % (lbl, str(v).replace(".", ",")))
        for v, lbl, c in GROUPS]
ax.legend(handles=leg, loc="lower right", fontsize=8, framealpha=0.95)
fig.tight_layout(); fig.savefig(os.path.join(FIG, "abb_3_11_manning.png"), dpi=150)
plt.close(fig)
print("Abbildung: abb_3_11_manning.png geschrieben")
except Exception as e:
    print("(Abbildung uebersprungen:", e, ")")

```

Listing 8: 08_manning.py - Manning-Beiwerte aus der Landnutzung

```

import os, csv, math
import numpy as np

BASE = r"D:\path\inputs"
OUT = os.path.join(BASE, "analysis", "outputs")
FIG = os.path.join(BASE, "analysis", "figures")

MU = 0.60 # Ueberfallbeiwert (breitkroniges Wehr)
G = 9.81
C = (2.0/3.0) * MU * math.sqrt(2*G) # ~1.772
H0 = 207.94 # Hoechststau
DT = 1.0 # s
TMAX = 24*3600.0

SZEN = [
    ("Schiffsschleuse", 12, 203.14),
    ("Wasserkraftwerk", 26, 200.04),
    ("Wehr + Sportbootschleuse", 70, 202.14),
    ("Komplette Staustufe", 156, 200.04),
]

# --- Stauraumkennlinie einlesen (H, Flaeche, Volumen) ---
H_k, A_k, V_k = [], [], []
with open(os.path.join(OUT, "stauraumkennlinie.csv"), encoding="utf-8") as f:
    rd = csv.reader(f, delimiter=";"); next(rd)
    for row in rd:
        if not row or not row[0]: continue
        H_k.append(float(row[0])); A_k.append(float(row[1])*1e6); V_k.append(float(row[3]))
H_k, A_k, V_k = np.array(H_k), np.array(A_k), np.array(V_k)

def area(H): return max(float(np.interp(H, H_k, A_k)), 1.0)
def volume(H): return float(np.interp(H, H_k, V_k))

print("%-26s %10s %12s %14s %12s" %
      ("Szenario", "Qmax[m3/s]", "V_frei[Mio m3]", "t_95[h]", "t_leer[h]"))

```

```

results = {}
for name, b, S in SZEN:
    H, t = H0, 0.0
    V_start = volume(H0); V_end_theor = volume(S)
    V_rel_total = V_start - V_end_theor
    ts, Qs, Hs = [], [], []
    t95 = None
    while t < TMAX:
        h = H - S
        if h <= 0.02: break
        Q = C * b * h**1.5
        A = area(H)
        dH = -Q / A * DT
        if abs(dH) > 0.05: # Stabilitaet: Schritt begrenzen
            dH = -0.05 if dH < 0 else 0.05
        H += dH; t += DT
        ts.append(t/3600.0); Qs.append(Q); Hs.append(H)
        if t95 is None and (V_start - volume(H)) >= 0.95 * V_rel_total:
            t95 = t/3600.0
    Qmax = C * b * (H0 - S)**1.5
    results[name] = (np.array(ts), np.array(Qs), np.array(Hs))
    print("%-26s %10.0f %12.2f %14.2f %12.2f" %
          (name, Qmax, V_rel_total/1e6, t95 if t95 else float('nan'), t/3600.0))

# --- CSV ---
csv_path = os.path.join(OUT, "breschenganglinien.csv")
with open(csv_path, "w", encoding="utf-8", newline="") as f:
    w = csv.writer(f, delimiter=";")
    w.writerow(["Szenario", "t_h", "Q_m3_s", "H_m"])
    for name, (ts, Qs, Hs) in results.items():
        step = max(1, len(ts)//600)
        for i in range(0, len(ts), step):
            w.writerow([name, "%.4f" % ts[i], "%.1f" % Qs[i], "%.3f" % Hs[i]])
print("\nCSV:", csv_path)

# --- HEC-RAS Randbedingung: Q in festem 5-Minuten-Takt (zum Einfuegen) ---
# je Szenario passendes Intervall/Dauer (schnelle Ereignisse feiner aufgeloeset)
BC_CFG = {"Schiffsschleuse": (10, 24),
          "Wasserkraftwerk": (2, 6),
          "Wehr + Sportbootschleuse": (2, 8),
          "Komplette Staustufe": (1, 4)}
for name, b, S in SZEN:
    ts, Qs, _ = results[name]
    INTERVAL_MIN, dur = BC_CFG[name]
    marks = np.arange(0, dur + 1e-9, INTERVAL_MIN/60.0)
    Qi = np.interp(marks, ts, Qs, left=Qs[0] if len(Qs) else 0.0, right=0.0)
    fn = os.path.join(OUT, "bc_" + name.split()[0].lower().replace("+", "") + ".txt")
    with open(fn, "w", encoding="utf-8") as f:
        f.write("# %s | Intervall %d MIN | Dauer %d h | Q [m3/s]\n" % (name, INTERVAL_MIN, dur))
        for q in Qi:
            f.write("%.0f\n" % q) # ganze Zahlen (kein Dezimaltrennzeichen-Problem)
    print("BC-Datei:", os.path.basename(fn), "|", len(Qi), "Werte")

# --- Abbildung: Ganglinien ---
import matplotlib; matplotlib.use("Agg")
import matplotlib.pyplot as plt
colors = ["#4477aa", "#66ccff", "#228833", "#cc6677"]
fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))
for (name, _, _), c in zip(SZEN, colors):
    ts, Qs, _ = results[name]
    ax.plot(ts, Qs, lw=2, color=c, label=name)
ax.set_xlabel("Zeit nach dem Versagen [h]")
ax.set_ylabel("Breschenabfluss Q [m³/s]")
ax.set_title("Breschenganglinien der vier Versagensszenarien (Höchststau 207,94 m)")
ax.grid(ls=":", alpha=0.5); ax.legend(fontsize=9)
ax.set_xlim(0, min(12, max(results[n][0][-1] for n, _, _ in SZEN)))
fig.tight_layout(); fig.savefig(os.path.join(FIG, "abb_3_12_ganglinien.png"), dpi=150)
plt.close(fig)
print("Abbildung: abb_3_12_ganglinien.png")

```

Listing 9: 09_breschenganglinie.py – Berechnung der Breschenganglinien

```

import os
import numpy as np
import rasterio

HEC = r"D:\path\HECRAS"
DEM = r"D:\path\inputs\analysis\outputs\dem_continuous.tif"
UW = 202.97 # Anfangswasserstand Unterwasser (Stauziel UW)

SZEN = {
    "Schiffsschleuse": r"PH_Schleuse\depth_hyd_schleuse.Terrain.dem_continuous.tif",
    "Wasserkraftwerk": r"PH_Kra\depth_hyd_kraftwerk.Terrain.dem_continuous.tif",
    "Wehr": r"PH_Wehr\depth_hyd_wehr.Terrain.dem_continuous.tif",
    "Komplett": r"PH_Komplett\depth_hyd_komplett.Terrain.dem_continuous.tif",
}

# Gelaende auf das Depth-Gitter (5 m) mitteln
dem = rasterio.open(DEM).read(1).astype("float64")
dem = np.where(dem < -100, np.nan, dem)
H, W = dem.shape
terr5 = np.nanmean(dem[:H//5*5, :W//5*5].reshape(H//5, 5, W//5, 5), axis=(1, 3))

print("%-16s %8s %8s %8s %8s %8s %7s %7s" %
      ("Szenario", "Flae[ha]", ">1m[ha]", ">2m[ha]", ">4m[ha]",
       "max[m]", "mit[m]", "Schwall"))
for name, rel in SZEN.items():
    ds = rasterio.open(os.path.join(HEC, rel))
    d = ds.read(1).astype("float64")
    d = np.where((d <= 0.01) | (d == ds.nodata), np.nan, d)
    cell = abs(ds.transform[0] * ds.transform[4]) # Zellflaeche [m2]
    wet = np.isfinite(d)
    ha = lambda m: m.sum() * cell / 1e4
    # Ueberflutungsflaeche und Tiefenklassen
    flae = ha(wet)
    a1, a2, a4 = ha(d > 1), ha(d > 2), ha(d > 4)
    dmax, dmit = np.nanmax(d), np.nanmean(d[wet])
    # Schwallwellenhoehe: max. Wasserspiegelanstieg im Flussschlauch (Kanal < UW)
    wse = terr5 + d
    chan = wet & np.isfinite(terr5) & (terr5 < UW)
    schwall = np.nanmax((wse - UW)[chan])
    print("%-16s %8.1f %8.1f %8.1f %8.1f %8.2f %7.2f %7.2f" %
          (name, flae, a1, a2, a4, dmax, dmit, schwall))

```

Listing 10: 10_auswertung.py – Auswertung der HEC-RAS-Ergebnisse