universität wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

Hydrodynamisch-numerische Modellierung der Auswirkungen von Abflussganglinienformen für Abflussimpulse (flow pulses) auf das Überflutungsgeschehen im Nationalpark Donau-Auen

verfasst von / submitted by

Nils Orwat, BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Master of Science (MSc)

Wien, 2023 / Vienna 2023

Studienkennzahl lt. Studienblatt / degree programme code as it appears on the student record sheet:	A 066 856
Studienrichtung lt. Studienblatt / degree programme as it appears on the student record sheet:	Kartographie und Geoinformation
Betreut von / Supervisor:	Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl

Vorwort

Mit dieser Masterarbeit möchte ich einen Beitrag für ein besseres Verständnis der hydrologischen Fließprozesse innerhalb des Nationalpark Donau-Auen leisten und auf mögliche Auswirkungen durch Veränderungen dieser hinweisen. Damit möchte ich den Nationalpark Donau-Auen beim Erhalt dieses besonderen Lebensraums unterstützen.

Hierbei möchte ich mich für die gute Kooperation der Nationalpark Verwaltung bedanken, insbesondere bei Fr. Mag. Zsak und Hr. Dr. Baumgartner, die mir bei der Themenfindung, Datenübermittlung und weiteren Fragen immer unterstützend zur Seite standen.

Des Weiteren möchte ich mich bei der viadonau für das Bereitstellen der hydrologischen Daten bedanken, ohne die ich keine hydrodynamisch-numerische Simulation hätte durchführen können. Besonderer Dank gilt hierbei Fr. Icevski, die mir bei meinen Fragen immer weitergeholfen hat.

Auch bei meinem Betreuer Hr. Ass.-Prof. Mag. Dr. Riedl möchte ich mich für die gute Betreuung bedanken.

Diese Masterarbeit hat mich über einen sehr viel längeren Zeitraum als geplant begleitet. Dabei habe ich viel über die Donau-Auen und die Fließgewässermodellierung gelernt. Die gemeinsame Zeit hat mich begeistert und gefordert, ermüdet aber auch sehr bereichert.

An meine Familie und Freunde möchte ich Danke sagen, für die Unterstützung während dieser Zeit. Ihr wart immer verständnisvoll und motivierend. Danke auch an meine Schwester und Mama für das Korrekturlesen.
Zuletzt möchte ich mich noch bei meiner Freundin, Aline bedanken. Du hast mich über den gesamten Zeitraum unterstützt, ertragen und den notwendigen Druck ausgeübt, damit ich diese Arbeit abschließe. Ich danke dir von Herzen.

„Der Weg ist das Ziel”

- Konfuzius

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis ..... **I**
Abbildungsverzeichnis ..... **III**
Tabellenverzeichnis ..... **VI**
Abkürzungsverzeichnis ..... **VII**
Glossar ..... **VIII**
Kurzfassung ..... **X**
Abstract ..... **XI**

1 Einleitung **1**
1.1 Hintergrund 1
1.2 Problemstellung 3
1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit 6

2 Grundlagen aus der Hydrogeographie und Geoinformation **8**
2.1 Der Wasserkreislauf 8
2.2 Abfluss 10
2.3 Fluviale Formen 16
2.4 Flussauen 18
2.5 Geographische Informationssysteme 21
2.6 Digitale Geländemodelle 23
2.7 GIS in der hydrologischen Modellierung 25
2.8 Hydrodynamisch-numerische Modelle 28

3 Die Donau-Auen **32**
3.1 Historische Entwicklung 32
3.2 Der Nationalpark Donau-Auen 39
3.2.1 Gründungsgeschichte 39
3.2.2 Aufbau 41
3.2.3 Lebensräume im Nationalparkgebiet 43
3.2.4 Ziele der Nationalpark Verwaltung 49
3.2.5 Renaturierungsmaßnahmen 52
3.3 Projektgebiet 55

4 Modellauswahl 59
4.1 Software 59
4.2 BASEMENT 65

5 Methodik 72
5.1 Konzeptioneller Aufbau 72
5.2 Datenvorverarbeitung 75
5.2.1 Eindimensionaler Modellbereich 75
5.2.2 Zweidimensionaler Modellbereich 80
5.2.3 Abflussganglinien 89
5.3 Modellentwicklung 92
5.3.1 Modellstruktur 92
5.3.2 Gleichgewichtssimulationen 97
5.3.3 Sensitivitätsanalyse und Kalibrierung 98
5.3.4 Simulationen 101

6 Ergebnisse 103
6.1 Hydrologische Ergebnisse 104
6.2 Fließverlauf 106
6.2.1 Anfangssituation und allgemeiner Fließverlauf 106
6.2.2 Ganglinie A 109
6.2.3 Ganglinie B 118
6.2.4 Ganglinienvergleich 126
6.3 Fließgeschwindigkeit 130
6.4 Überflutungsflächen 135
6.5 Überflutungsvolumen 137

7 Diskussion 139

8 Fazit 153

Literaturverzeichnis XII
Internetquellen XXIII
Anhang XXV

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Der große Wasserkreislauf 9
Abb. 2: Fließgeschwindigkeitsquerprofil 11
Abb. 3: Einfache Abflussregime 13
Abb. 4: Abflussganglinie 13
Abb. 5: Isochronen und Zeit-Flächen-Diagramm 14
Abb. 6: Einfluss der Lauflänge auf die Form der Abflussganglinie 14
Abb. 7: Einflüsse von Niederschlag und Einzugsgebietseigenschaft auf die Wellenform 15
Abb. 8: Hjulström-Diagramm 16
Abb. 9: Talformen 17
Abb. 10: Flusstypen 18
Abb. 11: Lebensräume in der Au 19
Abb. 12: Flächenabgrenzung im Vektor- und Rastermodell 22
Abb. 13: Graphische Benutzeroberfläche der Software „QGIS“ 23
Abb. 14: Strukturiertes Gitternetz (a) und unstrukturiertes Dreicksnetz (b) 25
Abb. 15: Integrationsansätze zwischen GIS & Hydrologischen Modellen 27
Abb. 16: Strukturiertes (A-D) und unstrukturiertes Netz (E) 29
Abb. 17: Die österreichische Donau 32
Abb. 18: Wien um 1760 34
Abb. 19: Wiener Donau-Durchstich um 1875 36
Abb. 20: Wasserkraftwerkskette an der österreichischen Donau 36
Abb. 21: Offizielle Übersichtskarte des Nationalpark Donau-Auen 42
Abb. 22: „Kleine Binn“, Seitengewässer im Nationalpark Donau-Auen 43
Abb. 23: Auwald im Nationalpark Donau-Auen 45
Abb. 24: Offenflächen im Nationalpark Donau-Auen, Links: anthropogene Wiese, Rechts: Heißlände 46
Abb. 25: Marchfeldschutzdamm 46
Abb. 26: Nationalpark Donau-Auen zwischen Kulturlandschaft; Landsat 8 47
Abb. 27: Fauna des Nationalparks 49
Abb. 28: Fadenbach (unten) und Graben zwischen kleiner Binn und Fadenbach (oben) 55
Abb. 29: Übersichtskarte des Projektgebiets 56
Abb. 30: Altarmmündung des Orther-Altarmsystems in die Donau 57
Abb. 31: Tierbodentraverse knapp unter MW 58
Abb. 32: BASEMENT Module 65
Abb. 33: Cell-centered Methode (a) und Cell-vertex Methode (b) 68
Abb. 34: BASEMENT Command File Editor 70
Abb. 35: Modellkopplungsmöglichkeiten mit BASEMENT 70
Abb. 36: Konzeptionelle Modellübersicht 72
Abb. 37: Konzeptioneller Aufbau der Methodik 74
Abb. 38: Ablauf für die Erstellung der 1D Geometriedatei 75
Abb. 39: RAS-Mapper mit Linienlayer 78
Abb. 40: Querprofilentwicklung in HEC-RAS, Reihenfolge A -> D 79
Abb. 41: Geometric Editor mit dem Verarbeitungswerkzeug “Cross Section Point Filter” (rechts) 79
Abb. 42: Ablauf für die Erstellung der 2D Geometriedatei 81
Abb. 43: Bruchkanten der Höhentypen: Nebengewässer & Hohe Au 83

Abb. 44: Bruchkanten der Höhentypen (Nebengewässer & Hohe Au) und der Landschaftsklassen.... 84
Abb. 45: Quality Mesh mit Bruchkantenfehlern 85
Abb. 46: Erstellung des Quality Mesh mit dem QGIS PlugIn BASEmesh 87
Abb. 47: Quality Mesh 88
Abb. 48: Auszug aus dem KWD 89
Abb. 49: Median der Abflussganglinien an der Messstation Bratislava für zwei Zeitperioden 90
Abb. 50: Vergleich der ausgewählten Abflussganglinien 91
Abb. 51: Stationärer (links) und instationärer (rechts) Hydrograph 91
Abb. 52: BASEchain Geometrie im BASEMENT GUI 93
Abb. 53: Verbindungsstellen der lateralen Kopplung (weiß) 95
Abb. 54: BASEMENT Modellstruktur 96
Abb. 55: Abflusswerte der Gleichgewichtssimulation für ein stationären MQ..... 97
Abb. 56: Abflusswerte der Gleichgewichtssimulation für ein stationären HSQ..... 98
Abb. 57: Unkalibrierter (oben) und kalibrierter (unten) 2D Modellbereich für HSQ in BASEviz..... 100
Abb. 58: Kalibrierter 2D Modellbereich im Gleichgewichtszustand für MQ in BASEviz..... 101
Abb. 59: Vergleich der Wasserstandswerte zwischen den simulierten Abflussganglinien und den Messwerten am Pegel Orth..... 104
Abb. 60: Vergleich der Scheitelpunkte zwischen den Modellein- und -ausgang für beide Abflussganglinien..... 105
Abb. 61: Karte des Projektgebiet mit seinen Aubereichen und Gewässern 106
Abb. 62: Anfangssituation im Projektgebiet..... 107
Abb. 63: Ganglinie A, Schritt 1..... 109
Abb. 64: Ganglinie A, Schritt 2..... 110
Abb. 65: Ganglinie A, Schritt 3..... 111
Abb. 66: Ganglinie A, Schritt 4..... 112
Abb. 67: Ganglinie A, Schritt 5..... 113
Abb. 68: Ganglinie A, Scheitelpunkt 114
Abb. 69: Ganglinie A, Schritt 6b) 115
Abb. 70: Ganglinie A, Schritt 7..... 116
Abb. 71: Ganglinie A, Abflaufende 117
Abb. 72: Ganglinie B, Schritt 1..... 118
Abb. 73: Ganglinie B, Schritt 3..... 119
Abb. 74: Ganglinie B, Schritt 4..... 120
Abb. 75: Ganglinie B, Schritt 6a)..... 121
Abb. 76: Ganglinie B, Schritt 6a)..... 122
Abb. 77: Ganglinie B, Scheitelpunkt 123
Abb. 78: Ganglinie B, Schritt 6b)..... 124
Abb. 79: Ganglinie B, Schritt 7..... 125
Abb. 80: Ganglinie B, Ablaufende..... 126
Abb. 81: Karte des Projektgebiets mit den Messstandorten der Fließgeschwindigkeitsverläufe..... 130
Abb. 82: Vergleich der Fließgeschwindigkeitsverläufe zwischen den Ganglinien an verschiedenen Messstandorten in der kleinen Binn 131
Abb. 83: Vergleich der Fließgeschwindigkeitsverläufe zwischen den Ganglinien an verschiedenen Messstandorten in der großen Binn..... 131
Abb. 84: Vergleich der Fließgeschwindigkeitsverläufe zwischen den Ganglinien an verschiedenen Messstandorten im Rohrhaufenarm 132

Abb. 85: Vergleich der Fließgeschwindigkeitsverläufe zwischen den Ganglinien an verschiedenen Messstandorten beim Fadenbach 132
Abb. 86: Vergleich der Fließgeschwindigkeitsverläufe zwischen den Ganglinien an verschiedenen Messstandorten im Donauarm 133
Abb. 87: Überflutungsflächen im Projektgebiet für die beiden Ganglinien für unterschiedliche Wassertiefen 136
Abb. 88: Vergleich der Überflutungsflächen für die beiden Ganglinien nach Augebieten 137
Abb. 89: Vergleich der Wasservolumenverläufe im Projektgebiet zur jeweiligen Abflussganglinie .. 138

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ökosystemfunktionen von Flussauen 21
Tabelle 2: HN-Modellsoftware-Vergleichstabelle 62
Tabelle 3: Attributwerte der Landschaftsklassen 86
Tabelle 4: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 99
Tabelle 5: Rauhigkeitsbeiwerte für die Landschaftsklassen 100
Tabelle 6: Fließvergleich der beiden Abflussganglinien nach Abflusswert (Q) und Zeit (t) 129

Abkürzungsverzeichnis

ALS	Airborne Laser Scanning
DGM	Digitales Geländemodell
DHM	Digitales Höhenmodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
HN-Modell	Hydrodynamisch-numerisches Modell
GIS	Geographisches Informationssystem / Geoinformationssystem
GL	Ganglinie
GUI	Graphical User Interface (Grafische Benutzeroberfläche)
GV	Gewässervernetzung
HSW / HSQ	Höchster Schifffahrtswasserstand / Höchster Schifffahrtsabfluss
IUCN	International Union for Conservation of Nature and Natural Resources
KWD	Kennzeichnende Wasserstände der österreichischen Donau
MW / MQ	Mittelwasserstand / Mittlerer Abfluss
Nationalpark Verwaltung	Nationalpark Donau-Auen GmbH
Q	Abfluss
RNW / RNQ	Regulierungsniederwasser / Regulierungsniederabfluss
TIN	Triangle Irregular Network (Dreiecksnetz)
Viadonau	via donau Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH
W	Wasserstand

Glossar

Abfluss
Teil des Wasserkreislaufs, der sich aus der Differenz zwischen dem Niederschlag und der Verdunstung ergibt. Wird auch als Bezeichnung für das Wasservolumen, das in einer bestimmten Zeit durch einen Gewässerquerschnitt fließt, benutzt (vgl. Durchfluss) (ÖNORM B 2400, 2016)

Abflussganglinie (auch: Hydrograph)
Verhältnis zwischen dem Abfluss/Durchfluss oder Wasserstand zur Zeit als graphische Darstellung (ÖNORM B 2400, 2016)

Abflussregime
Der charakteristische Abfluss eines Fließgewässers aufgrund des Klimas (ÖNORM B 2400, 2016)

Anabranching Flusstyp
Fließgewässer mit Merkmalen eines verzweigten und mäandrierenden Flusstyps (Jungwirth et al., 2014: 389ff)

Bruchkanten
Eindeutige Unterbrechung in der Neigung einer Oberfläche (Esri Lexikon, 2023)

Buhne
Wasserbauwerk zur Strömungslenkung, das meist rechtwinklig vom Ufer zur Flussmitte errichtet wird. Schützt das Ufer vor Erosion und konzentriert das Wasser in der Flussmitte bei Niederwasser (Jungwirth et al., 2014: 389ff)

Durchfluss
Wasservolumen, das in einer bestimmten Zeit durch einen Gewässerquerschnitt fließt (ÖNORM B 2400, 2016)

Einzugsgebiet
Gebiet, das durch die Wasserscheide begrenzt ist und in dem der Oberflächenabfluss durch Schwerkraft in einem gemeinsamen Gewässer abfließt (ÖNORM B 2400, 2016)

Erosion
Abtragungsprozess von festen Stoffen durch die mechanischen Einflüsse von z.B: Wasser, Wind oder Eis (ÖNORM B 2400, 2016)

Flow pulse (Abflussimpuls)
Charakteristische Abflussschwankung in Form eines Impulses unterhalb der Abflusshöhe eines Hochwasserimpulses (vgl. Flood pulse). Beschreibt zusammen mit Hochwasserimpulsen die Dynamik zwischen einem Fluss und seiner angrenzenden Au und spielt eine entscheidende Rolle für die Biodiversität (vgl. Flood pulse; Tockner et al., 2000)

Flood pulse (Hochwasserimpuls)
Charakteristische Abflussschwankung in Form eines Hochwasserimpulses, der die Dynamik zwischen einem Fluss und seiner angrenzenden Au beschreibt und zusammen mit dem Abflussimpuls eine entscheidende Rolle für die Biodiversität darstellt (vgl. Flow pulse; Junk et al., 1989)

Fluvial
vom Fluss verursacht (lat. Fluvius) (Jungwirth et al., 2014: 389ff)

Georeferenzierung
Ausrichten von geographischen Informationen auf ein Koordinatensystem, um diese mit anderen räumlichen Informationen anzeigen, abfragen und analysieren zu können (Esri Lexikon, 2023)

Gitternetz
Netzwerk aus parallelen und senkrecht dazu verlaufenden Linien (Esri Lexikon, 2023)

Glaziales Regime
vom Gletscherabfluss dominiertes Fließgewässer (Jungwirth et al., 2014: 389ff)

Leitwerk
Wasserbauwerk zur Strömungslenkung, meist längs oder schräg zur Fließrichtung (Jungwirth et al., 129)

Mäandrierend
Ein Fluss der sehr enge Flussbögen (Mäander) bildet und dadurch seinen Lauf um mindestens 1,5 mal zur Luftlinie verlängert (Jungwirth et al., 2014: 389ff)

Nivales Regime
vom Schneeabfluss dominiertes Fließgewässer (Jungwirth et al., 2014: 389ff)

Pluviales Regime
vom Regenabfluss dominiertes Fließgewässer (Jungwirth, 2014: 389ff)

Querprofil (auch Durchflussprofil)
Querschnitt eines Fließgewässers (Vetsch et al., 2022e: 14ff)

Rheophil (Gegenteil: stagnophil)
strömungsliebend, einen von Strömung dominierten Lebensraum bevorzugend (Jungwirth et al., 2014: 389ff)

Retention
Das temporäre Aufnehmen und Zurückhalten von Flusswasser (Jungwirth, 2014: 389ff)

Sedimentation
Ablagerungsprozess von festen Stoffen, welche durch Wasser transportiert wurden (ÖNORM B 2400, 2016)

Stationär/Instationär
zeitlich nicht verändert / zeitlich verändert (Fohrer et al., 2016: 129)

Topologie
Relative Lage von geographischen Objekten zueinander (Nachbarschaftsbeziehung) (Esri Lexikon, 2023)

Topographie
Eigenschaften und Darstellung des geographischen Raums (Lexikon der Geographie, 2023)

Treppelweg
Bezeichnung für die Wege entlang des Donauufers, auf denen früher Schiffe von Pferden flussaufwärts gezogen wurden (Jungwirth et al., 2014: 389ff)

Vorfluter
Gewässer, in dem sich der Abfluss konzentriert und abfließt (ÖNORM B 2400, 2016)

Wasserscheide
Grenze zwischen Einzugsgebieten (ÖNORM B 2400, 2016)

Wasserstand
Höhe der Gewässeroberfläche zu einem Bezugspunkt (ÖNORM B 2400, 2016)

Kurzfassung

Die Donau-Auen zwischen Wien und Bratislava sind eine der letzten großen zusammenhängenden Auen in Europa. Von der Donau wird dieser Lebensraum regelmäßig durch wechselnde Abflussmengen überflutet und wieder entwässert. Diese Schwankungen treten impulsartig als Hochwasserimpulse (flood pulse) und unterhalb dieser als Abflussimpulse (flow pulse) auf. Zusammen führen sie zu einer hohen Dynamik zwischen der Donau und den Donau-Auen und stellen die Grundlage für die enorme Biodiversität in diesem als Nationalpark geschützten Lebensraum dar.
Klimatisch und anthropogen bedingt sind in der österreichischen Donau Veränderungen im Bereich der Abflussimpulse zu sehen. Deren zeitlicher Verlauf wird über Abflussganglinien dargestellt und resultiert vermehrt in zeitlich kürzeren und abflusshöheren Ganglinien. Dabei wurden die möglichen Auswirkungen durch eine Veränderung der Abflussganglinienform auf Auen bisher nicht untersucht.

Die vorliegende Masterarbeit stellt sich daher die Frage, ob eine Veränderung der Abflussganglinienform für Abflussimpulse zu einem veränderten Überflutungsgeschehen innerhalb von Auen führt. Hierfür wurde über einen theoretischen Softwarevergleich das hydrodynamisch-numerische Modell BASEMENT ausgewählt und mit diesem das Überflutungsgeschehen innerhalb der Donau-Auen simuliert und auf Veränderungen analysiert. Dabei wurden die Donau und die Auen in unterschiedlichen Dimensionen modelliert und über eine 1D-2D Modellkopplung miteinander verbunden. Anschließend wurde das Modell für zwei unterschiedliche Abflussganglinienformen simuliert und auf den Fließverlauf, die Fließgeschwindigkeit, die Überflutungsflächen und das Überflutungsvolumen verglichen. Die Ergebnisse zeigten eindeutige Veränderungen im Überflutungsgeschehen der Donau-Auen. Insbesondere die Abflusshöhe und Abflussdauer bestimmen das Überflutungsgeschehen, indem sie vorgeben welche Geländestrukturen überflutet werden und wieviel Zeit das Wasser hat, um sich innerhalb der Au auszubreiten. Tendenziell deutet sich durch die höhere Abflusshöhe eine Steigerung der Vernetzung zwischen der Donau und den Donau-Auen an. Eine mögliche Reduktion der jährlichen Durchströmungstage in den Nebengewässern, aufgrund der geringeren Abflussdauer, kann nicht ausgeschlossen werden.

Abstract

The Danube Floodplains between Vienna and Bratislava represent one of the last remaining extensive contiguous floodplain ecosystems in Europe. This habitat is regularly inundated and drained due to varying discharges from the Danube River. These fluctuations occur as flood pulses during high water periods and as flow pulses during periods of lower discharge. Together, they generate a high dynamic between the Danube and its floodplain, forming the basis for the remarkable biodiversity within this habitat protected as a national park.
Climate-related and anthropogenic factors have led to alterations in the discharge of flow pulses within the Austrian segment of the Danube. Their temporal progression is illustrated using discharge hydrographs and is increasingly resulting in hydrographs of reduced temporal extent and higher discharge rates. Nevertheless, the potential impacts of altering the form of discharge hydrographs on floodplains have not been investigated thus far.

Therefore, the present master's thesis raises the question of whether modifying the form of discharge hydrographs for flow pulses leads to altered inundation dynamics within floodplains. For this purpose, a theoretical software comparison was accomplished to select the hydrodynamic-numerical model BASEMENT, which was then used to simulate and analyze inundation dynamics within the Danube Floodplains. Both the Danube River and the floodplains were modeled with distinct dimensions and connected through a 1D-2D model coupling. Following this, the model was utilized to simulate two divergent forms of discharge hydrographs and a comparison was made based on flow progression, flow velocity, inundation areas, and inundation volume. The results clearly demonstrated alterations in the inundation dynamics of the Danube Floodplains. Particularly, the amplitude of discharge and the duration of flow pulses play a determining role in inundation dynamics, by determining which terrain features are inundated and the duration for water to disseminate within the floodplain. Higher discharge levels tend to suggest an increase in connectivity between the Danube and the Danube Floodplains. The possibility of a reduction in the annual discharge days in tributaries, due to decreased pulse duration, cannot be ruled out.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Der Winter 1984 ging umweltpolitisch für Österreich in die Geschichte ein. Als im Dezember die ersten Rodungsarbeiten in der Stopfenreuther Au, einer Flusslandschaft östlich von Wien, begannen, machten sich tausende Demonstranten auf den Weg dorthin, um die Bäume vor ihrer Abholzung zu retten. Die Rodungen in der Stopfenreuther Au, die zu den Donau-Auen zwischen Wien und Bratislava gehört, waren der Start für den Bau eines Wasserkraftwerks an der Donau. Die Demonstranten sahen darin eine Gefahr für den Erhalt der Auen, die als eine der letzten großen zusammenhängenden Auenlandschaft in Europa galt. Diese durch die Donau geprägte Flusslandschaft beheimatete eine große Anzahl an gefährdeten und nur in diesem Lebensraum vorkommenden Arten. Mit der Besetzung der Stopfenreuther Au konnte die österreichische Regierung zu einem Umdenken bewegt werden und eine Neubewertung zur ökologischen und ökonomischen Nutzung der Donau-Auen erreicht werden (Kosz, 1996: 110f).

Die Donau-Auen bei Wien sind eine vom Fluss geformte Landschaft und allgemein als Flussaue oder Au bekannt. Auen sind Lebensräume entlang von Fließgewässern und daher stark von den jahreszeitlich und klimatisch bedingten Veränderungen im Wasserhaushalt bestimmt. Die schwankenden Pegelstände des Flusses führen zu einem periodischen Überfluten und Trockenfallen der Gebiete, sowie zu einem variierenden Grundwasserstand. Dabei formt der Fluss die Au durch einen Wechsel von Erosion bei Hochwasser und Sedimentation bei Niedrigwasser. Dadurch befindet sich diese in einer ständigen Umgestaltung. Zusätzlich gelangen mit den Hochwassern Sedimente und Nährstoffe in das Gebiet, weshalb Flussauen als sehr nährstoffreiche Lebensräume gelten. Diese hohe Dynamik zwischen Fluss und Au ist das bestimmende Charaktermerkmal, das zu der ökologischen Bedeutung von Auen führt (Colditz, 1994: 25f; Schön, 1999: 250).

Die ökologische Bedeutung der Dynamik zwischen Fluss und Au wurde von Junk et al. im Jahr 1989 mit dem „Flood Pulse Concept“ dargelegt und dient seitdem als Grundlage für das Verständnis der Konnektivität in Flussauen. Bei dem Konzept wird der pulsierende Charakter von Flussauen durch wechselnde Abflüsse in Form von Hochwasserimpulsen betont, die für die Biodiversität und Produktivität verantwortlich sind. Somit haben sich die Organismen besonders auf die Nutzung der Übergangszone zwischen dem aquatischen und terrestrischen Lebensraum angepasst und profitieren dabei von den schwankenden Wasserständen und den daraus resultierenden Rohstoffeintrag, sowie der schnellen Verwertung von organischen Materialen und Nährstoffen.

Das „Flood Pulse Concept“ von Junk et al. (1989) wurde in den darauffolgenden Jahren von

verschiedenen Autoren erweitert und begrenzt (Junk & Wantzen, 2004). Dabei konnten Tockner et al. (2000) nachweisen, dass für Flussauen in den mittleren Breiten besonders die Strömungsimpulse unterhalb der Übergangszone eine wichtige ökologische Bedeutung haben. Im Gegensatz zum „Flood Pulse Concept“, das vor allem die Überflutung des Ufers durch Hochwasserimpulse (Flood Pulses) als bestimmende ökologische Systemfunktion beschreibt, zeigten sie dass bereits weit unterhalb der Uferkante ein deutlicher pulsierender Charakter vorhanden ist. Daher erweiterten sie das Konzept um Abflussimpulse (Flow Pulses).

Mit dem „Flood Pulse Concept“ und seinen Erweiterungen werden seitdem die Prozesse in Flussauen identifiziert und beschrieben. Die räumliche und zeitliche Dynamik ist dabei der entscheidende Faktor, der zur Entstehung von unterschiedlichen aquatischen und terrestrischen Habitaten in unterschiedlichen Sukzessionsstadien führt (Ward et al., 1999). Die daraus resultierende Vielzahl an ökologischen Nischen, zusammen mit dem Nährstoffreichtum haben in Auen zu einer enormen Artenmenge geführt, die sich mit der von tropischen Regenwäldern vergleichen lässt (Colditz, 1994: 25f).

Neben den Ökosystemfunktionen, die zu einer hohen Produktivität und dem Artenreichtum führen, verfügen Auen auch über Dienstleistungen, die für den Menschen von ökonomischer Bedeutung sind. So sind sie wichtige Wasserversorger für die umliegenden Regionen und können forst- und landwirtschaftlich genutzt werden. Zudem bieten sie diverse regulierende Funktionen an, wie zum Beispiel als Überflutungsfläche für Hochwasser, zur Reinigung des Flusssystems oder als Kohlenstoffspeicher. Auch für den Tourismus ist die erholende Wirkung und das Naturerlebnis von Interesse (Scholz et al., 2012: 18ff; Tockner & Stanford, 2002: 310).

Trotz der vielfältigen ökonomischen Funktionen von Auen wurden die Ziele der Schifffahrt, Siedlungspolitik und der Landwirtschaft in der Vergangenheit oftmals vorrangig behandelt. Die Folgen waren Flussbegradigungen für eine bessere Schiffbarkeit, Eindeichung von Flüssen, sowie Abtrennungen von Seitenarmen zum Schutz der neu gewonnen Flächen vor Hochwassern und der Bau von Wasserkraftwerken für die Stromerzeugung (Jungwirth et al., 2014: 226). Die wasserbaulichen Maßnahmen führten in vielen Gebieten der Welt zu einer Reduzierung der Dynamik zwischen Fluss und Au, wodurch das natürliche Gleichgewicht gestört wurde. Die Folgen waren eine Beeinträchtigung, bis hin zum Verlust der Ökosystemleistungen und eine Verringerung der Biodiversität (Scholz et al., 2012: 18f; Ward et al., 1999). In einer Studie untersuchten Tockner & Stanford (2002) den Zustand von Auensystemen und konnten dabei einen weltweiten Rückgang feststellen. Dabei sind bis zu 90% der Auen in Europa und Nordamerika durch anthropogene Einflüsse verändert worden und haben dadurch ihre Ökosystemfunktionen verloren. Auch in den Entwicklungsländern kommt es zu einem zunehmenden Auenzonenverlust durch eine fortschreitende Veränderung im hydrologischen Kreislauf. Durch den starken Rückgang zählen Auen zu den weltweit am gefährdetsten Ökosystemen.

Die Besetzung der Stopfenreuther Au bei Hainburg im Winter 1984 war schlussendlich eine Reaktion auf den Auenzonenverlust in Österreich. Im späten 19. Jahrhundert wurden durch die Donauregulierung weite Teile der Donau begradigt und von ihren Auenbereichen abgetrennt. Anschließend kam es seit 1955 zur Errichtung zahlreicher Wasserkraftwerke, wodurch ein 40km langer Abschnitt in der Wachau und die rund 48km langen Donau-Auen östlich von Wien zu den letzten frei fließenden Donaugebieten in Österreich wurden. Zusammen führten die wasserbaulichen Maßnahmen an der Donau zu einem Auenzonenverlust von 52% im Vergleich zur nacheiszeitlichen Auenfläche (Jungwirth et al., 2014: 227ff). Österreichweit wird sogar von einem Auenzonenverlust von rund 85% ausgegangen (Hein et al., 2014: 169). Durch die Demonstrationen konnte der Bau des Wasserkraftwerks in der Stopfenreuther Au schlussendlich gestoppt und die Donau-Auen gerettet werden.
Im Jahr 1996 wurden die Auen zwischen Wien und Bratislava als Nationalpark Donau-Auen unter Schutz gestellt. Seitdem ist der Nationalpark mit der Erhaltung der Donau-Auen und der Wiederherstellung des natürlichen Zustands beauftragt (Manzano, 2000: 235ff; Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2019: 7f). Auch die EU-Kommission hat den Wert von natürlichen Überflutungsgebieten erkannt und in ihrer EU-Richtlinie 2007/60/EG „über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken“, den Schutz von bestehenden Auen und potenziell renaturierbaren Auenbereichen vorgegeben (Europäische Union, 2007). Jedoch liegen Auen oft im Einflussgebiet sozioökonomischer Interessen, weshalb es wichtig ist neben dem Hochwasserschutz auch die ökologische und soziologische Bedeutung hervorzuheben. Hierfür wurde die multidisziplinare Bewertungsmethode „Floodplain evaluation matrix“ entwickelt, mit der Auen auf verschiedene Parameter bewertet werden und somit Entscheidungshilfen für ein integratives Hochwasserrisikomanagement gegeben werden kann (Habersack et al., 2013).

1.2 Problemstellung

Durch die intensive ökonomische Nutzung wurden die Auen in den mittleren Breiten in den letzten zwei Jahrhunderten so stark beschränkt, dass viele ihr natürliches dynamisches Gleichgewicht verloren haben. Heute sind in Europa nur noch 10% der ehemaligen Auen vorhanden, von denen die meisten Auswirkungen der anthropogenen Einflüsse zeigen und in einem gefährdeten Zustand sind (Tockner & Stanford, 2002: 320).
Auch bei den Donau-Auen östlich von Wien kann man die Folgen der wasserbaulichen Maßnahmen erkennen. Durch die Kanalisierung der Donau wurde die seitliche Vernetzung mit den Auen reduziert und das Ufer befestigt. Durch diese Maßnahme wird die natürliche Erosion des Flusses verhindert und die Auen werden nur noch bei Hochwassern überflutet. Der

geringeren Dynamik geschuldet kann sich eine dauerhafte Vegetation ausbreiten, mit der die Erosion weiter erschwert wird und die Au sukzessive verlandet. Mit den Wasserkraftwerken kam es zusätzlich zu einem Geschieberückhalt, wodurch die Donau sich im Bereich des Nationalparks um rund zwei bis drei Zentimeter pro Jahr eintieft. Diese Sohleintiefung der Donau verstärkt die schrittweise Entkoppelung des Flusssystems von den Donau-Auen, indem es die Vernetzung weiter reduziert und den Grundwasserstand absenkt. Die Folgen sind ein zunehmendes Austrocknen und Verlanden der Auen. Dazu stellt die Sohleintiefung eine Gefahr für die Renaturierungsprojekte des Nationalparks dar. So sank der Mittelwasserstand im Zeitraum von 1985 bis 2010 um rund 60cm, wodurch die Dauer der Vernetzung im Bereich Regelsbrunn von 216 auf 143 Tage im Jahr fiel. Zwar versucht man die Sohleintiefung mit der Verlagerung des Geschieberückhalts durch Baggerungen zu begrenzen, jedoch kann das Ausheben und Abladen von Kies langfristig nicht die Lösung sein, zumal davon die Dynamik nicht erhöht wird (Jungwirth et al., 2014: 246; Klasz et al., 2013: 379ff).
Hierfür sind weitere Renaturierungsprojekte notwendig, wie zuvor im Bereich Regelsbrunner Altarm, Orther Au, Mannsdorfer Hagel oder Johler Arm bei denen jeweils die Uferbefestigung reduziert oder abgebaut wurden und eine Vernetzung mit der Donau wieder unterhalb von Hochwasserpegelständen ermöglicht wurde. Mit der Wiederherstellung dieser Abflussimpulse konnte die Dynamik verbessert werden, mit positiven Auswirkungen auf die Biodiversität und Ökosystemfunktionen (Hein et al., 2014: 172).

Die Abflussimpulse werden vom hydrologischen Kreislauf bestimmt und schwanken natürlicherweise durch jahreszeitliche und klimatische Faktoren (Wolfgang J. Junk et al., 1989). Deren Abflussverläufe werden dabei durch Abflussganglinien dargestellt (Fohrer et al., 2016: 129). In Hinblick auf den Klimawandel zeigt sich eine Veränderung des hydrologischen Kreislaufs in der Häufigkeit und Stärke von Niederschlägen. Für Europa geht die wissenschaftliche Literatur dabei von einer Zunahme von Extremwetterlagen aus, mit einem Anstieg der Starkniederschläge (Feldmann et al., 2013; Gobiet et al., 2014; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023: 567). Dabei könnte sich die Zahl der extremen Regenfälle bis zum Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 2015 verdoppeln. Da die Art des Niederschlags den Abflussverlauf von Abflussimpulsen vorgibt, ist mit einer Veränderung der Abflussganglinien in Flüssen zu rechnen (Seibert & Auerswald, 2020: 22). Tatsächlich konnten Pekárová et al. (2016) bei einer räumlichen und zeitlichen Untersuchung von Abfluss- und Hochwasserimpulsen an 20 Donau-Pegelmessstationen eine Veränderung in den Abflussganglinien feststellen. Dabei zeigten die Abflussimpulse und kleinen Hochwässer für die Jahre 1945 bis 2013 einen Anstieg in ihrer Häufigkeit und einen Rückgang in ihrer Dauer gegenüber den Jahren 1876 bis 1945. Dadurch hatten die zeitlich jüngeren Abflussganglinien einen steileren Kurvenverlauf mit höheren Abflussspitzen, im Vergleich zu den zeitlich älteren Ganglinien, die langsamer anstiegen und einen niedrigeren Verlauf aufwiesen. Die

festgestellten Veränderungen decken sich mit der Form von Abflussganglinien aus regionalen Starkniederschlägen, die typischerweise schnell ansteigen und nur von kurzer Dauer sind, wohingegen großflächige Niederschläge oder Schneeschmelze eine flachere und zeitlich längere Abflussganglinie bewirken (Seibert & Auerswald, 2020: 36f).

Der von Pekárová et al. (2016) festgestellte Trend für Abflussimpulse in der österreichischen Donau, zusammen mit dem vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023: 597f) gesammelten Klimaprognosen für die mittleren Breiten lassen befürchten, dass Flussauen zukünftig häufiger von schnelleren Abflussimpulsen durchströmt werden. Im Hinblick auf die Wiederherstellung von Abflussimpulsen für verschiedene Bereiche in den Donau-Auen ist jedoch noch unklar, ob diese schnelleren Abflussimpulse das Überflutungsgeschehen in den Auen verändern werden. Durch die von Tockner et al. (2000) und in weiteren Studien nachgewiesene Bedeutung von Abflussimpulsen kann eine Veränderung dieser Abflüsse zu weitreichenden Folgen für die Biodiversität führen (Arscott et al., 2002; Hohensinner et al., 2005; Reckendorfer et al., 2006; Schagerl et al., 2009; Tockner et al., 2010).

Es stellt sich daher die Frage, ob eine Veränderung der Abflussganglinienform für Abflussimpulse das Überflutungsgeschehen in Flussauen verändert?

Für die Simulation von Abflüssen stellen hydrodynamisch-numerische Modelle (HN-Modell) den aktuellen Stand der Technik dar. Diese auf numerischen Methoden basierenden Computerprogramme berechnen die hydrodynamischen Prozesse in Fließgewässern, wodurch sich die Auswirkungen von Abflussganglinien in Gewässern auf ihre Überflutungsgebiete in verschiedenen Dimensionen (1D, 2D oder 3D) modellieren lassen. Aufgrund der in den letzten zwei Jahrzehnten stark gestiegenen Computerleistungen, sind heutzutage immer komplexere numerische Simulationen möglich, bei zugleich kürzer werdenden Rechenzeiten. Diese Weiterentwicklung in der Rechenleistung zeigt sich auch in der Zunahme von kommerziellen und frei zugänglichen Softwarelösungen für numerische Strömungssimulationen. Besonders die Anwendbarkeit und Benutzerfreundlichkeit der Programme hat sich dahin gehend verändert, dass für die Nutzung notwendige Fachwissen der Anwender gering zu halten und so einem größeren Benutzerkreis die Fließgewässer-modellierung mit HN-Modellen zu ermöglichen. Den Anwendern bleibt dabei nur noch die für ihre Fragestellung beste Softwarelösung auszuwählen (Gegenleithner et al., 2020: 273f; Oertel & Bung, 2014: 19ff).

1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit

In dieser Masterarbeit sollen mögliche Veränderungen im Überflutungsgeschehen von Flussauen, aufgrund von klimatisch bedingten Änderungen in der Abflussganglinienform für Abflussimpulse detektiert werden. Hierfür wird das Überflutungsgeschehen von zwei Abflussganglinien, die sich im Bereich der Abflussimpulse befinden, miteinander verglichen. Ein Vergleich der Abflussganglinien kann dabei Aufschlüsse über die Entwicklungstendenz der Auen und ihren Lebewesen, sowie über die Auswirkung der Form von Abflussganglinien auf das Überflutungsgeschehen in Auen geben. Mögliche Veränderungen im Überflutungsgeschehen müssten zudem bei der Planung zukünftiger Renaturierungsprojekte berücksichtigt werden und bestehende Renaturierungsmaßnahmen gegebenenfalls angepasst werden.

Für den Vergleich wird für ein ausgewähltes Projektgebiet im Nationalpark Donau-Auen ein hydrodynamisch-numerisches Modell erstellt und das Überflutungsgeschehen für zwei gemessene Abflussganglinien simuliert. Die Abflussganglinien unterscheiden sich dabei nach dem von Pekárová et al. (2016) festgestellten Trend.
Für den Vergleich des Überflutungsgeschehen wurden die folgenden Arbeitsfragen abgeleitet, anhand derer die Fragestellung beantwortet werden soll:

1) Gibt es Unterschiede im Fließverlauf der Abflussganglinien?
2) Hat die Abflussganglinienform einen Einfluss auf die Fließgeschwindigkeiten innerhalb des Projektgebiets?
3) Verändern sich die Überflutungsflächen im Projektgebiet?
4) Welche Abflussganglinie führt zu einem größeren Überflutungsvolumen im Projektgebiet?

Der Aufbau dieser Arbeit gliedert sich neben der Einleitung und dem Fazit in sieben Hauptkapitel. Im nachfolgenden Kapitel 2 werden zunächst notwendige Grundlagen für das Verständnis dieser Arbeit vorgelegt. Aufgrund der fachübergreifenden Thematik handelt es sich hierbei um relevante Begrifflichkeiten aus der Hydrogeographie und Geoinformation.

Anschließend werden im Kapitel 3 die Donau-Auen bei Wien ausführlich beschrieben, indem zunächst auf die historische Entwicklung zurückgeblickt und anschließend der heutige Nationalpark Donau-Auen vorgestellt wird. In diesem Teil der Arbeit kommt es auch zur Vorstellung des Projektgebiets. In Kapitel 4 gibt es einen theoretischen Vergleich der gängigsten hydrodynamisch-numerischen Modellsoftwares, dabei kommt es auch zur Auswahl der HN-Software für die Methodik. Die Methodik wird in Kapitel 5 vorgestellt. Darin wird die Erstellung eines hydrodynamisch-numerischen Modells, für das in Kapitel 3 vorgestellte Projektgebiet, sowie die Auswahl der Abflussganglinien beschrieben und die

Simulationen durchgeführt. Anschließend werden in Kapitel 6 die Ergebnisse der Simulationen beider Abflussganglinien in Bezug auf die hydrologischen Ergebnisse, den Fließverlauf, die Fließgeschwindigkeit, die Überflutungsflächen und -volumen vorgestellt. Die Ergebnisse werden in Kapitel 7 für die beiden Abflussganglinien miteinander verglichen und diskutiert. Hierbei werden die Arbeitsfragen und aufbauend darauf die Fragestellung dieser Masterarbeit beantwortet. Das abschließende Fazit betont nochmals die größte Herausforderung und Unsicherheit für die Zukunft und den Erhalt der Donau-Auen.

2 Grundlagen aus der Hydrogeographie und Geoinformation

Diese Masterarbeit bedient sich grundlegenden Begriffen und Themen aus der Hydrogeographie und Geoinformation. Damit diese uneingeschränkt nachvollzogen werden können, werden diese im Folgenden in vereinfachter Form beschrieben.

2.1 Der Wasserkreislauf

Die Grundlage für die in den Donau-Auen ablaufenden Prozesse stellt der Wasserkreislauf dar. Dieser setzt sich aus den Teilprozessen Verdunstung, Niederschlag und Abfluss zusammen und beschreibt den Weg des Wassers vom Meer zum Land und wieder zurück. Dabei führt die Sonneneinstrahlung auf der Erde zur Verdunstung von Wasser aus den Weltmeeren, welches in der Atmosphäre durch den Wind über die Landflächen transportiert wird und dort als Niederschlag eingetragen wird. Nachdem das Wasser auf die Landoberfläche trifft, kommt es zu unterschiedlichen Teilprozessen, die vor allem von der Art der Oberfläche abhängig sind. Bei diesen verdunstet das Wasser entweder wieder oder es wird auf kurz oder lang als Abfluss einem Gewässer (Vorfluter) zugeführt, über den es schlussendlich wieder in die Weltmeere gelangt und den Kreislauf schließt (Liebscher, 1984: 131ff).

Der Wasserkreislauf kann vereinfacht auch über vier Reservoire dargestellt werden, womit die sich im Kreislauf befindlichen Wassermengenverhältnisse deutlicher werden. Hierbei stellen die Weltmeere und Kontinente die beiden Reservoire auf der horizontalen Ebene dar, die auf der vertikalen Ebene jeweils um ein Atmosphärenreservoir ergänzt werden (vgl. Abb. 1).

Das Wasser befindet sich unter wechselnden Aggregatszuständen in einem ständigen Austausch zwischen diesen Reservoiren. Der größte Teil der Wassermengen verbleibt in den jeweiligen vertikalen Reservoiren, indem es in die Atmosphäre verdunstet und von dort durch Niederschlag wieder in dasselbe Reservoir eingetragen wird. Dabei kommt es über den Weltmeeren, aufgrund der immensen Wasserverfügbarkeit, zu einem Verdunstungs-überschuss, wovon ein geringer Anteil über den atmosphärischen Transport über die Kontinente befördert wird. Zusammen mit den verdunsteten Wassermengen der Kontinente kommt es zu einem Niederschlagsüberschuss über den Kontinenten, das über den Abfluss ausgeglichen wird. Hierdurch gelangt das Wasser schließlich von den Kontinenten wieder in die Weltmeere. Durch den Austausch in der Atmosphäre und dem Abfluss an der Erdoberfläche befindet sich das Wasser in einem Kreislauf (Hantel & Haimberger, 2016: 276ff).

Dieser Kreislauf läuft global betrachtet in einem geschlossenen System ab, in welchem sich alle Austauschprozesse gegenseitig ausgleichen und wird als großer Wasserkreislauf bezeichnet (vgl. Abb.1).

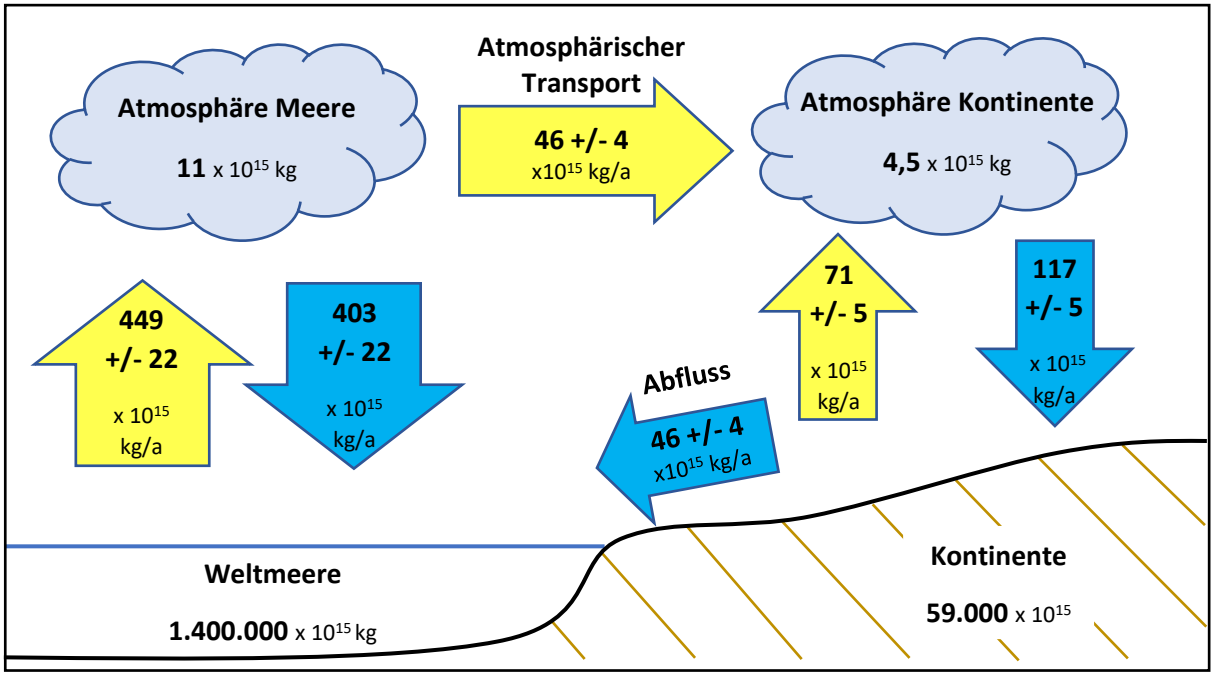


Abb. 1: Der große Wasserkreislauf (Eigene Darstellung, Daten nach Hantel & Haimberger, 2016: 277f)

Betrachtet man nur die über den Kontinenten zirkulierenden Wassermengen, spricht man dagegen vom kleinen Wasserkreislauf (Glaser et al., 2017: 151). Bei diesem wird in der Regel eine politische Raumeinheit oder ein natürlich abgrenzbares Gebiet, wie das Einzugsgebiet eines Flusses, betrachtet. Dieses wird oberirdisch durch die vom Relief gegebene Wasserscheide von Einzugsgebieten anderer Flüsse abgegrenzt und zeichnet sich dadurch aus, dass jedes abfließende Wasserteilchen das Flusssystem am selben Punkt verlässt (Fohrer et al., 2016: 44).

Der kleine Wasserkreislauf eines Einzugsgebiets befindet sich allerdings nicht mehr in einem geschlossenen System und kann zu unausgeglichenen Wassermengen führen. Damit Aussagen über die Wasserverfügbarkeit und den daraus resultierenden Veränderungen für ein Einzugsgebiet gemacht werden können, wird der Wasserhaushalt bilanziert. Dabei werden die Eingangsgrößen den Ausgangsgrößen gegenübergestellt, wodurch eine positive, negative oder ausgeglichene Wasserbilanz resultiert. Die einfachste Form der Wasserhaushaltsgleichung stellt den Niederschlag (N) als Eingangsgröße der Verdunstung (V) und dem Abfluss (Q) gegenüber (Gl. 1; Glaser et al., 2017: 134):

$$N = V + Q \qquad \text{(Gl. 1)}$$

Berücksichtigt man die Speicherung des Wassers auf unbekannte Dauer in Speichern wie beispielsweise Gletschern, Seen oder im Boden so muss die Gleichung um die Änderung der Speicher (Δ S) erweitert werden. Dazu können neben dem Niederschlag auch Zuflüsse (Q_{in}) aus anderen Flusssystemen erfolgen (Gl. 2; Fohrer et al., 2016: 38):

$$N\ (+\ Q_{in}) = V + Q_{out} + \Delta S \qquad \text{(Gl. 2)}$$

2.2 Abfluss

Der Abfluss, als ein Teilprozess des Wasserkreislaufs, ist die Grundlage für die räumliche und zeitliche Dynamik in Flussauen. Er ergibt sich in der Wasserhaushaltsgleichung aus der Differenz des Niederschlags zur Verdunstung, unter Einbezug der Speicheränderungen (vgl. Gl. 2; ÖNORM B 2400, 2016). Somit werden alle Wasserteilchen aus einem Niederschlag dem Abfluss zugerechnet, die nicht wieder verdunsten oder auf unbestimmte Zeit in einem Wasserspeicher verweilen, womit der Niederschlag zum Antrieb des Abflusses wird (Hantel & Haimberger, 2016: 313).

Die Prozesse der Abflussbildung und Abflusskonzentration sind dabei entscheidend für die im Vorfluter ankommende Abflussmenge (Glaser et al., 2017: 137).
Die Abflussbildung beginnt mit dem auf die Landoberfläche treffenden Niederschlag. Dieser trifft in der Regel auf eine Vegetationsdecke, wodurch ein Teil direkt wieder verdunstet (Interzeption) und der übrige Teil mit einer Verzögerung den Erdboden erreicht. Wie groß die jeweiligen Anteile sind, hängt dabei von der Vegetationsart ab, z.B. findet bei Wäldern mehr Interzeption statt als bei Wiesen. Nachdem die Bodenoberfläche durchfeuchtet ist, dringt das Wasser tiefer in den Boden ein (Infiltration). Dabei füllt es die Wasserspeicher wieder auf und sickert in tiefere Erdschichten, bis es das Grundwasser erreicht, oder auf undurchlässige Schichten trifft und dem Gefälle folgend unterirdisch abfließt (Zwischenabfluss). Der Zwischenabfluss kann dabei auf seinem Weg wieder an die Oberfläche treten oder auf durchlässigere Schichten treffen und das Grundwasser erreichen. Auch das Grundwasser fließt zu einem Teil dem Gefälle folgend ab (Grundwasserabfluss). Das Infiltrationsvermögen des Bodens ist dabei vom Bodentyp abhängig, der unterschiedliche Wasseraufnahme-kapazitäten und Durchlässigkeiten aufweist. Ist die Niederschlagsintensität höher als das Infiltrationsvermögen oder ist der Boden bereits Wasser gesättigt, kommt es zum Oberflächenabfluss (Fohrer et al., 2016: 147; Liebscher, 1984: 131ff).
Der Abfluss setzt sich somit aus dem Oberflächen-, Zwischen- und Grundwasserabfluss zusammen, wobei sich diese mit unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten im Vorfluter konzentrieren. Daher wird auch zwischen Direktabfluss und Basisabfluss unterschieden. Der Direktabfluss steht zeitlich in einem direkten Zusammenhang mit einem Niederschlagsereignis und fließt als Oberflächen- und Zwischenabfluss mit hohen Fließgeschwindigkeiten ab. Der Basisabfluss dagegen setzt sich aus dem langsameren Zwischen- und Grundwasserabfluss zusammen und verändert sich durch einen Niederschlag nur mit einer Verzögerung (Fohrer et al., 2016: 147; Glaser et al., 2017: 137).

Im Vorfluter kann der Abfluss eines Einzugsgebiets quantitativ ermittelt werden. Dabei wird das Wasservolumen (V), das in einer Zeiteinheit (t) den Gewässerquerschnitt (A) des Vorfluters durchfließt, in Kubikmeter pro Sekunde oder Liter pro Sekunde bestimmt (Gl. 3).

Der quantitative Abfluss wird auch als Durchfluss am Gewässer bezeichnet (Fohrer et al., 2016: 127f & 144; Glaser et al., 2017: 136).

$$Q = \frac{V}{t} \qquad \text{(Gl. 3)}$$

Ist der Gewässerquerschnitt (A) für die verschiedenen Wasserstände (W) bekannt (Gl. 5), lässt sich der Abfluss aus dem Wasserstand und der mittleren Fließgeschwindigkeit (v) ermitteln (Gl. 4). Der Wasserstand stellt dabei den lotrechten Abstand der Gewässeroberfläche zu einem Bezugspunkt dar und wird in der Regel an einem Pegel gemessen (Fohrer et al., 2016: 127f).

$$Q = v * A \qquad \text{(Gl. 4)}$$

$$A = f(W) \qquad \text{(Gl. 5)}$$

Um die mittlere Fließgeschwindigkeit zu erhalten, muss das genaue Fließgeschwindigkeitsprofil ermittelt werden. Hierfür wird das Gewässerquerprofil in einzelne Teilflächen getrennt, für die jeweils ein Geschwindigkeitsprofil erstellt wird. Anschließend können die Geschwindigkeitsprofile in einer mittleren Fließgeschwindigkeit für den gesamten Gewässerquerschnitt zusammengefasst werden (vgl. Abb. 2).

Für die Messung der Fließgeschwindigkeit werden klassische Messinstrumente wie mechanische Messflügel, elektro-magnetisch-induktive Verfahren oder Ultraschallverfahren benutzt. Für eine Abschätzung der Fließgeschwindigkeit in einem gleichförmigen Gewässerabschnitt kann als mittlere Fließgeschwindigkeit auch die Hälfte der Geschwindigkeit, die an der Oberfläche der Flussmitte vorherrscht, herangezogen werden (Fohrer et al., 2016: 134ff). Das liegt daran, dass die Fließgeschwindigkeiten in der Mitte und nahe der Oberfläche am höchsten sind und zur Gewässersohle hin, aufgrund der Reibung, abnehmen (Zepp, 2017: 121). Die Fließgeschwindigkeit in der Flussmitte kann beispielsweise mit einem Schwimmkörper und einer Uhr gemessen werden (Fohrer et al., 2016: 134ff). Empirische Gleichungen, die zur Abschätzung der mittleren Fließgeschwindigkeit angewendet werden, sind die Manning-Strickler oder Darcy-Weisbach Formeln (Zepp, 2017: 123).

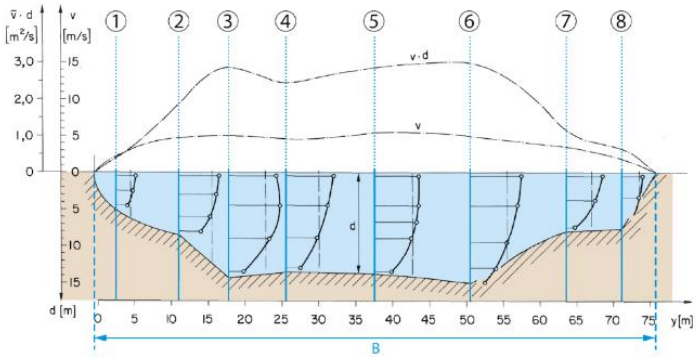


Abb. 2: Fließgeschwindigkeitsquerprofil (Fohrer et al., 2016: 136)

Mit den an einem Pegel gemessenen Wasserständen und daraus berechneten Abflusswerten werden statistische Häufigkeitsverteilungen ermittelt, die für gewässerkundliche und wasserwirtschaftliche Themen von Relevanz sind. Aus diesen Datenreihen lässt sich eine Dauerlinie erstellen, die eine rangorientierte Häufigkeitsverteilung der Abfluss- und Wasserstandsmesswerte darstellt. An dieser können Überschreitungshäufigkeiten ermittelt werden, um festzustellen wie oft ein bestimmter Wasserstand oder Abfluss unter- oder überschritten wird. Dazu werden die Mittelwerte bestimmt, sowie für die Schifffahrt wichtige Wasserstandswerte für Niedrigwasser und Hochwasser berechnet (Fohrer et al., 2016: 139f).

Für die österreichische Donau werden die Kennzahlen in einem Bericht über die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau (KWD) vom zuständigen Wasserstraßenbetreiber „via donau“ veröffentlicht. Darin enthalten sind wasserwirtschaftliche Kennzahlen für die wichtigsten Pegelstellen an der österreichischen Donau, darunter (vgl. via donau, 2010):

- RNW (2010) = Regulierungsniederwasser (2010), entspricht dem Wasserstand der für die Jahresreihe 1981-2010 zu 94% pro Jahr überschritten wurde
- MW (2010) = Mittelwasserstand (2010), entspricht dem arithmetisches Mittel der Wasserstände für die Jahresreihe 1981-2010
- HSW (2010) = Höchster Schifffahrtswasserstand (2010), entspricht dem Wasserstand der für die Jahresreihe 1981-2010 zu 1% pro Jahr überschritten wurde
- HW30 & HW100 = 30-jährliche bzw. 100-jährliche Hochwasser entsprechen den Wasserständen mit Überschreitungswahrscheinlichkeiten von $\frac{1}{30}$ bzw. $\frac{1}{100}$ der jährlichen Hochwasser

Hierbei steht die Abkürzung W für Wasserstand, wobei diese Kennzahlen gleichbedeutend auch für die Abflüsse Q stehen, z.B. MQ 2010 = Mittelabfluss 2010.

Der Abfluss eines Flusses lässt sich durch das im Einzugsgebiet vorherrschende Klima und die Topographie einem bestimmten Abflussregime zuordnen. Das Abflussregime beschreibt den jährlichen Abflussgang eines Fließgewässers aus den Quotienten des mittleren Monatsabfluss zum Jahresabfluss (Pardé-Koeffizient). Dadurch zeigt sich ein charakteristischer Abflussverlauf, der mit anderen Gewässern unterschiedlicher Größenordnung vergleichbar ist. Im Jahresgang werden somit abflussstarke Niederschlagszeiten und abflussschwache Verdunstungszeiten sichtbar, die je nach Einzugsgebiet aufgrund der Jahreszeiten oder durch Regen- und Trockenzeiten auftreten.

Man unterscheidet zwischen einfachen und komplexen Abflussregimen, wobei der Abflussgang in einfachen Abflussregimen eingipfelig und in komplexen Abflussregimen zweigipfelig verläuft. Der Abflussgang wird dabei entweder von der Gletscherschmelze (glazial), der Schneeschmelze (nival bzw. nivo), dem Regenniederschlag (pluvial bzw. pluvio) oder einer Kombination dieser Abflussprozesse gesteuert (vgl. Abb. 3; Glaser et al., 2017: 139ff).

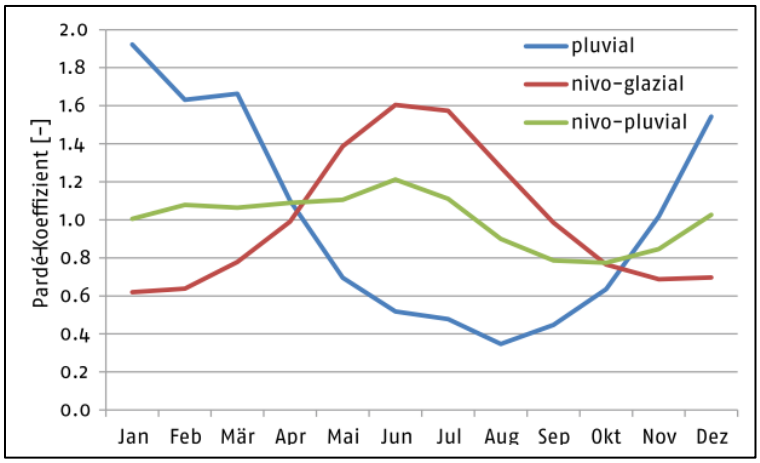


Abb. 3: Einfache Abflussregime (Fohrer et al. 2017: 197)

Die Abflussbildung und die Konzentration der Abflussmengen im Vorfluter unterliegen einer zeitlichen Dynamik, die abhängig vom Bereich im Einzugsgebiet und der abflussbildenden Menge zu schwankenden bzw. instationären Abflusswerten im Vorfluter führen. Zeichnet man diesen zeitlichen Verlauf der Abflusswerte auf, so ergibt sich eine Abflussganglinie bzw. Hydrograph (vgl. Abb. 4; Fohrer et al., 2016: 129).

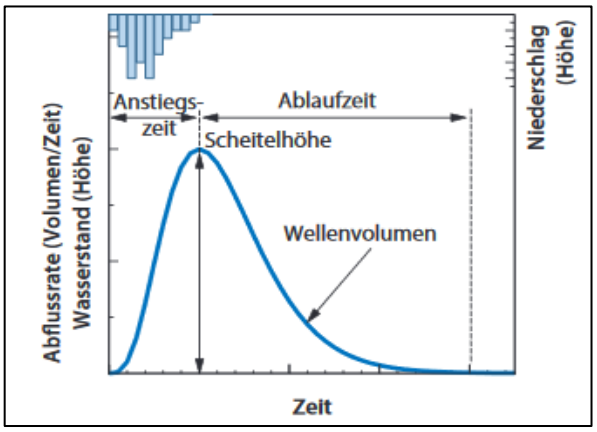


Abb. 4: Abflussganglinie (Seibert & Auerswald, 2020: 34)

Die Abflussganglinie verläuft immer in Form einer Welle und kann durch die Anstiegs- und Ablaufzeit, sowie der Scheitelhöhe und dem Wellenvolumen beschrieben werden. Die Anstiegszeit markiert den Abflussbeginn der Welle bis zum Erreichen der Scheitelhöhe, der die höchste Abflussrate der Welle und damit den höchsten Wasserstand darstellt. Die Scheitelhöhe ist auch der Zeitpunkt in der Abflussganglinie an dem die Fließgeschwindigkeit und Transportkapazität des Wassers am größten sind. Nachdem die Abflussganglinie ihren Scheitelpunkt erreicht hat, beginnt die Welle abzuklingen. Diese Zeit wird über die Ablaufzeit beschrieben und ist immer um ein Vielfaches länger als die

Anstiegszeit. Zusammen mit der Anstiegszeit ergibt sich das Wellenvolumen der Abflussganglinie (vgl. Abb. 4; Seibert & Auerswald, 2020: 34).
Die Prozesse der Abflussbildung und -konzentration führen somit zur Bildung von Abflüssen in Wellenform (Fohrer et al., 2016: 216f). Dabei werden Abflussschwankungen bis zur Uferkante, also bis zum HSQ, in der Fachliteratur auch als „flow pulse“ (Abflussimpuls) und Schwankungen darüber als „flood pulse“ (Hochwasserimpuls) bezeichnet (vgl. Kapitel 1; Junk et al., 1989; Tockner et al., 2000).

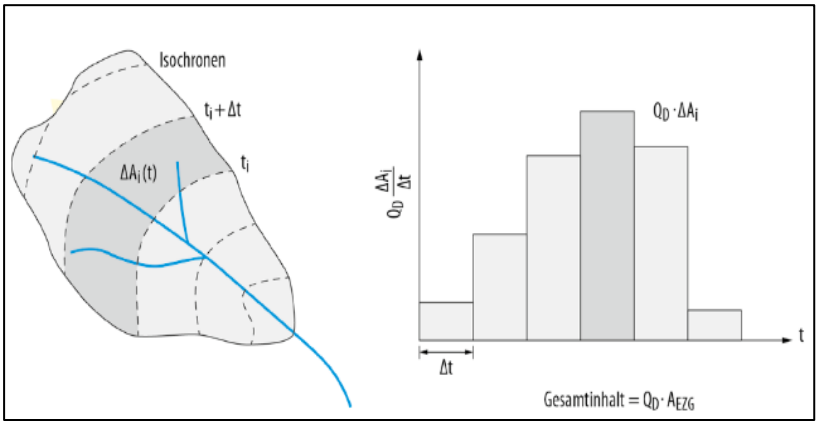


Abb. 5: Isochronen und Zeit-Flächen-Diagramm (Fohrer et al., 2016: 142)

Für die Vorhersage von Hochwasserereignissen in einem Einzugsgebiet bedarf es Kenntnisse über den Verlauf des Abflusses (Translation) und über mögliche Rückhaltespeicher (Retention) im Einzugsgebiet. Hieraus können über Isochronen verschiedene Fließzeitbereiche für das Einzugsgebiet bestimmt werden, die in ein Zeit-Flächen-Diagramm übertragen werden können. Das Diagramm entspricht dabei bereits annähernd der Abflussganglinie (vgl. Abb. 5; Fohrer et al., 2016: 141f).

Die Retentionseigenschaften des Einzugsgebiets wirken sich dabei auf das Wellenvolumen aus und können zu einer Dämpfung oder Verzögerung der Abflussganglinie führen (Seibert & Auerswald, 2020: 35ff). Dabei wird der Abfluss grundsätzlich auf seinem Weg langsamer, wodurch sich die Scheitelhöhe mit zunehmender Länge reduziert (vgl. Abb. 6).

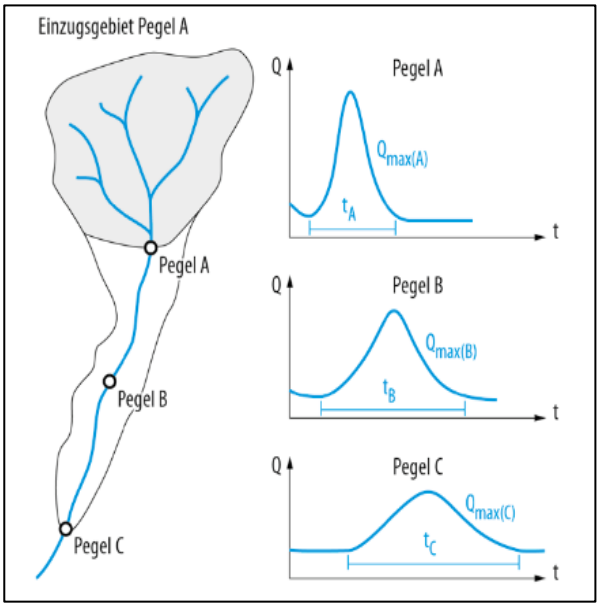


Abb. 6: Einfluss der Lauflänge auf die Form der Abflussganglinie (Fohrer et al., 2016: 132)

Mögliche Eigenschaften des Einzugs-gebiets, die sich auf die Retention auswirken sind beispielsweise die Form des Einzugsgebiets, die im Gebiet vorhandene Gewässernetzdichte, oder auch das Vorhandensein von versiegelten Flächen. Neben diesen Einzugsgebietseigenschaften spielt vor allem der Niederschlag für die Form der Abflusswelle eine Rolle. Dabei kann sowohl die zeitliche als auch die räumliche Verteilung des Niederschlags im Einzugsgebiet einen Einfluss auf die Wellenform haben. Auch die Zugrichtung des Regens führt zu unterschiedlichen Wellenformen. Die verschiedenen Einflussfaktoren verhindern es, ein Niederschlagsereignis mit einem anderen gleichzusetzen oder die Abflussganglinien eines Einzugsgebiets auf das eines anderen zu übertragen, weshalb die vorherige Abschätzung von Abflussganglinien mit Unsicherheiten einhergehen. Die Einflüsse des Niederschlags und der Einzugsgebietseigenschaften auf die Form der Abflussganglinie können der nachfolgenden Abbildung 7 entnommen werden.

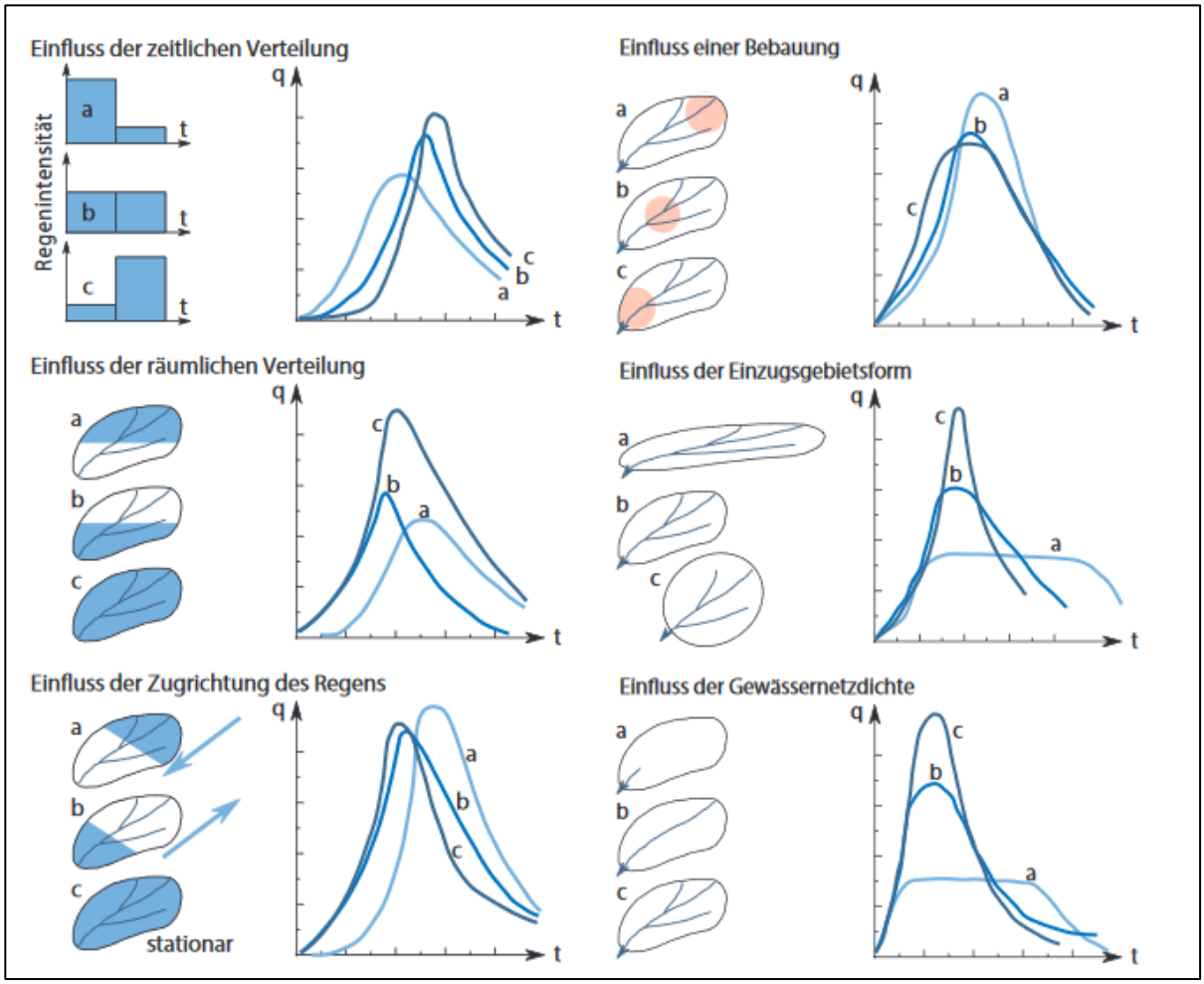


Abb. 7: Einflüsse von Niederschlag und Einzugsgebietseigenschaft auf die Wellenform (Seibert & Auerswald, 2020: 36)

2.3 Fluviale Formen

Der Abfluss formt auf seinem Weg die Erdoberfläche durch Erosion, Transport und Sedimentation. Die Erosion beschreibt die vom Wasser verursachten Abtragungsprozesse von Materialien der Erdoberfläche. Hierbei werden Partikel am Gewässerboden und Ufer vom Wasser erodiert und aufgenommen, sobald die Fließgeschwindigkeit des Wassers die haltenden Kräfte übersteigen. Diese werden je nach Korngröße rollend, springend oder schwebend vom Wasser transportiert, wodurch diese die Erosion verstärken können. Bei sinkender Fließgeschwindigkeit werden die Partikel wieder abgelagert, wobei gröbere Korngrößen zuerst sedimentieren. Die Fließgeschwindigkeit und Abflussmenge entscheiden dabei, ob die Partikel erodiert, transportiert oder sedimentiert werden (Glaser et al., 2017: 30; Zepp, 2017: 115ff). Deren Beziehung zueinander kann über das Hjulström-Diagramm dargestellt werden (vgl. Abb. 8).

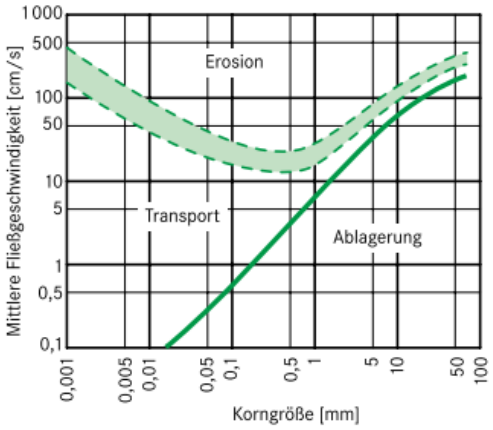


Abb. 8: Hjulström-Diagramm (Glaser et al., 2017: 31)

Durch die Erosion, den Transport und die Sedimentation kommt es in Abhängigkeit der geographischen Lage (Klima, Höhe) und dem im Einzugsgebiet vorhandenen Gesteinsmaterial und der Vegetationsbedeckung zur Bildung verschiedener fluvialer Formen. Diese werden nach ihrem Fließmuster in drei Grundtypen unterschieden (Glaser et al., 2017: 31ff; Zepp, 2017: 147f):

- Der geradlinige Flusstyp kommt vor allem an Gewässerstrecken mit einem starken Gefälle vor und ist daher hauptsächlich auf Regionen in Höhenlage begrenzt. Die hohe Fließgeschwindigkeit resultiert dabei in einer hohen Erosions- und Transportkapazität, die zur Tiefen- und Seitenerosion führt und Täler ausbildet. Das vorhandene Transportmaterial entscheidet dabei über die Erosionsrichtung. Übersteigt die Transportkapazität des Gewässers die vorhandene Menge an Transportmaterial, so wirkt sich die überschüssige Energie in einer Tiefenerosion aus. Dadurch bilden sich steile Täler, die bei widerstandsfähigem Gestein zu einer Klamm und bei leichter

erodierbaren Gestein zu einer Schlucht führen. Steht von den Berghängen mehr Transportmaterial zur Verfügung, verlagert sich die Tiefenerosion zu einem Gleichgewicht mit der Seitenerosion und es bilden sich Kerbtäler. Nimmt das Transportmaterial durch die Seitenerosion weiter zu, kommt es im Gewässer zur Sedimentation und zur Bildung von Sohlenkerbtälern (vgl. Abb. 9).

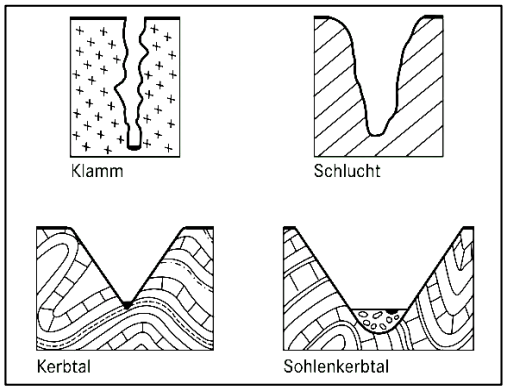


Abb. 9: Talformen (Glaser et al., 2017: 32; verändert)

- Durch die hohe Fließgeschwindigkeit in Gebirgsregionen wird vom Fluss in der Regel größeres Gesteinsmaterial transportiert, das zusammen mit wechselnden Abflüssen zu einem verzweigten Flusstyp führt (vgl. Abb. 10). Dabei wird bei Niedrigwasser das Gesteinsmaterial in Form von Schotterflächen abgelagert, die vom Fluss umflossen werden und diesen in mehrere Ströme aufteilen. Durch die Ansiedlung von Vegetation können sich diese Flächen über eine gewisse Zeit als Inseln erhalten. Bei Hochwasser können die Flächen wieder erodiert und abgetragen werden, wodurch verzweigte Flusstypen sich ständig verlagern.
- Beginnt der Fluss seinen geradlinigen Verlauf in seinen Ablagerungen durch Seitenerosion zu verändern und übersteigt seine Sinuosität, also das Verhältnis der Fließlänge zur Tallänge den Wert 1,5, spricht man von einem mäandrierenden Flusstyp (vgl. Abb. 10). Dabei verläuft der Fluss durch die überwiegende Seitenerosion kurvenförmig und bildet an seinen Außenkurven einen Prallhang mit verstärkter Erosion und an den Innenkurven einen Gleithang mit verstärkter Akkumulation aus. Durch diese durchgehende Erosion und Akkumulation erfährt der Fluss eine stetige Lageänderung, bei der es auch zu Durchbrüchen der Flussbögen (Mäander) kommen kann. Dadurch wird der Mäander vom Flussverlauf abgetrennt und er wird zum Altarm.

Manche Flüsse bilden auch gewisse Mischformen aus, in denen sie Eigenschaften von verzweigten und mäandrierenden Flusstypen zeigen. Dieser Mischtyp wird in der Literatur, mangels deutschen Fachbegriffs als „anabranching“ Flusstyp bezeichnet (Jungwirth et al., 2014: 137). Diese Flusssysteme können dabei sowohl in Gebirgsregionen mit hohen Fließgeschwindigkeiten und groben Transportmaterial, als auch in flachen Deltas mit niedrigen

Fließgeschwindigkeiten und feinen Sedimenten auftreten, wodurch sie nicht eindeutig nach den Grundtypen unterschieden werden können. Im Gegensatz zum verzweigten Flusstyp bilden sie Inseln mit ausgeprägterer Vegetation und stabileren Ufern aus, die über mehrere Jahrzehnte erhalten bleiben können. Die Flussströme zwischen den Inseln können dabei verzweigt, mäandrierend oder gerade verlaufen und sind bis zu Wasserständen von HSW voneinander getrennt (vgl. Abb. 10; Nanson & Knighton, 1996: 217ff).

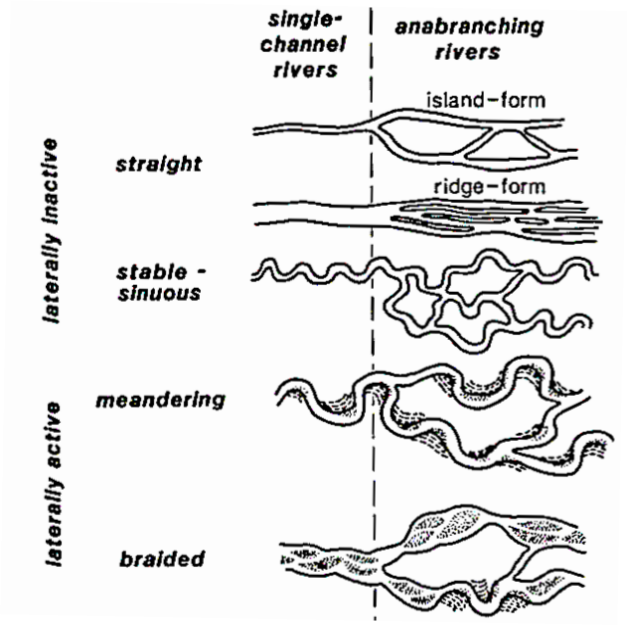


Abb. 10: Flusstypen (Nanson & Knighton, 1996: 236)

2.4 Flussauen

Flussauen entstehen entlang von Fließgewässern und beschreiben einen Lebensraum, der von den periodisch wechselnden Wasserständen seines zugehörigen Flusses und den daraus resultierenden Grundwasserschwankungen bestimmt und gestaltet wird. Dabei tragen die im Jahresverlauf schwankenden Abflüsse des Fließgewässers zu einer ständigen Umgestaltung der Flussaue bei. Bei Hochwasser wird die Au überflutet, Uferbereiche erodiert, sowie Sedimente durch das Wasser transportiert und bei Niedrigwasser fällt die Au wieder trocken und die transportierten Sedimente werden an einem anderen Ort akkumulieren. Dadurch verlagert sich der Fluss mit seinen zumeist mehreren Nebenarmen durchgehend, wobei sich die Prozesse der Erosion und Sedimentation in der Regel in einem dynamischen Gleichgewicht befinden (Colditz, 1994: 25f; Margl, 1973: 20; Schön, 1999: 249).
Diese Dynamik zwischen dem Fluss und seiner Au hat eine hohe ökologische Bedeutung, die von Junk et al. (1989) durch das „Flood Pulse Concept“ beschrieben wurde (vgl. Kapitel 1).

Die Eigenschaften des pulsierenden Charakters wurden von Junk & Wantzen (2004: 124) aus den Erkenntnissen verschiedener Studien zusammengetragen und können durch gleichzeitig ablaufende Vorgänge beim Zufluss oder Abfluss des Wassers zwischen Fluss und Au beschrieben werden:
So werden beim Zufluss in die Au, die zuvor räumlich voneinander getrennten Wasserkörper in ihrer thermischen und chemischen Zusammensetzung durchmischt und angeglichen. Zusätzlich werden wassergebundene Stoffe in die Au gespült und terrestrische Habitate überflutet. Dabei wird das dort akkumulierte Material in Bewegung gebracht und zusammen mit terrestrischen Kohlenstoffen und Auenprodukten in die Nahrungskette der aquatischen Habitate eingebracht. Die Überflutung führt auch zu einer möglichen Migration von aquatischen Organismen in zuvor unerreichbare Auengebiete.
Beim Abfluss von der Au in den Fluss werden in dem Überflutungswasser gelöste Stoffe und bewegtes Material wieder in den Fluss ausgespült. Durch den sinkenden Wasserstand fällt die Übergangszone wieder trocken, wodurch diese durch terrestrische Lebewesen kolonisiert werden können. Gleichzeitig werden die im Wasser transportierten organischen Kohlenstoffe akkumuliert und wieder in die terrestrische Nahrungskette integriert. Die aquatischen Organismen müssen wieder in den Fluss migrieren oder in einen der dauerhaft wasserführenden Bereiche in der Au verweilen. Dort entstehen durch die Isolation vom Fluss über die Zeit Altarme mit verschiedenen physikalischen und chemischen Merkmalen und einer angepassten Artengemeinschaft.

Die resultierenden Geländeformen und Vegetationsgesellschaften in der Flussaue sind somit eng mit der Erosion, Transport und Sedimentation des Flusses verbunden, was diese zur Grundlage für die Sukzession in Auen macht. Aufgrund der Abhängigkeit der Flussaue zu ihrem Fluss kann die Sukzession je nach Flusstyp und Abflussregime zu vielfältigen Landschaftselementen und Vegetationsgesellschaften führen (Margl, 1973: 20; Meyer, 2017: 40f).
Die nachfolgende Abbildung 11 zeigt einen beispielhaften Querschnitt einer Flussaue, mit unterschiedlichen Landschaftselementen wie z.B. Auenaltwasser, Kiesbänken und Steilufern. Diese werden von unterschiedlichen Vegetationsgesellschaften besiedelt, wie z.B. Schilf im flachen Gewässerbereich, der Weichholzaue im Uferbereich und der Hartholzaue in den höheren Aubereichen, die wiederum an den Steilufern erodiert werden kann.

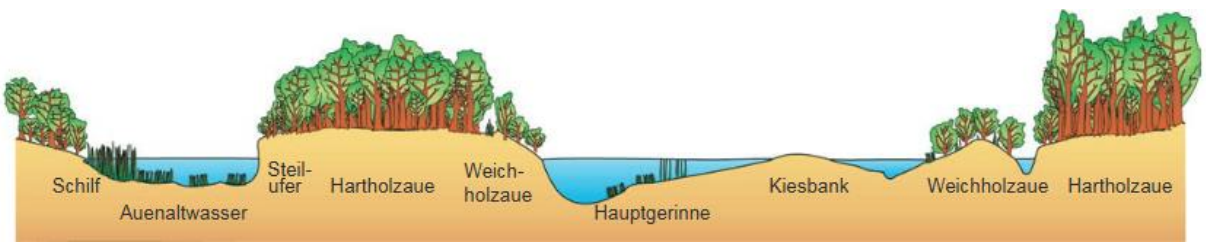


Abb. 11: Lebensräume in der Au (Meyer, 2017: 40)

Dieser feuchte, nährstoffreiche und aufgrund der Dynamik des Flusses in unterschiedlichen Sukzessionsstadien befindliche Lebensraum führt zur Entstehung von vielen ökologischen Nischen, die einen Artenreichtum hervorbringen, der mit den Regenwäldern der Tropen vergleichbar ist (Colditz, 1994: 25f).

Flussauen bieten neben ihrer Habitatfunktion als Lebensraum für spezialisierte Flora und Fauna auch eine Reihe von Ökosystemfunktionen an. Dazu gehören unteranderem die von Scholz et al. (2012: 18ff) zusammengetragenen und nachfolgend beschriebenen Funktionen:

- Hochwasserretention
  Durch ihr Überflutungs- und Wasserrückhaltepotenzial sind Auen in der Lage die Höhe von Hochwasserwellen im Flusssystem zu reduzieren, indem sie einen Teil des Hochwassers zurückzuhalten. Hierfür dürfen sie jedoch nicht durch Deiche vom Flusssystem abgeschnitten werden. Durch extreme Hochwasser in den letzten Jahrzehnten ist die Hochwasserschutzfunktion von Auen wieder verstärkt ins allgemeine Bewusstsein gerückt.

- Nährstoffretention
  In Auen werden Nährstoffe durch Bodenprozesse und durch die Vegetation aufgenommen und somit aus dem Flusswasser entnommen. Dadurch stellen sie eine wichtige Funktion zur Verbesserung der Wasserqualität dar. Auch hier gilt das eine mit dem Fluss vernetzte Au um ein Vielfaches mehr Nährstoffe aufnehmen kann, als eine vom Flusssystem entkoppelte Au.

- Kohlenstoffsenke
  Flussauen können als Feuchtgebiet, ähnlich wie Moore, als Kohlenstoffsenke fungieren und damit die Treibhausgasemissionen reduzieren. Dies liegt an einem Zusammenspiel zwischen der Retention von kohlenstoffreichen Sedimenten und Nährstoffen während eines Hochwassers. Die Sedimente lagern sich am Boden ab, wo es durch die Feuchtigkeit zu weniger Mineralisation kommt und mehr Kohlenstoff im Boden gebunden bleibt. Die Nährstoffe düngen die Vegetation, was zu einer hohen Nettoproduktion der Auwälder führt. Dadurch wird ein größerer Kohlenstoffanteil von den Bäumen aus der Atmosphäre aufgenommen und in ihrer Biomasse gespeichert.

Darüber hinaus bieten Flussauen viele weitere Ökosystemfunktionen an, die nach dem Millenium Ecosystem Assessment (2004: 28) in Basisleistungen, Versorgungsleistungen, Regulierungsleistungen und kulturelle Leistungen aufgeteilt werden können. Nach dem

Konzept von De Groot (2006: 177) wurden zusätzlich die Habitatfunktionen als Ökosystemleistung hinzugenommen. Die nachfolgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Ökosystemfunktionen von Flussauen.

Ökosystemfunktion	Ausprägung
Basisfunktion	Bodenbildung Nährstoffkreisläufe Primärproduktion durch Photosynthese
Versorgungsfunktion	Nahrungsmittel Holz Trinkwasser
Regulationsfunktion	Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes Hochwasserschutz Erosionsschutz Nährstoffretention Grundwasserbildung und Wasserreinigung Lokalklima Rückhalt von Treibhausgasen
Kulturelle Leistungen	Erholungsfunktion Tages- und Wochenenderholung Tourismus Naturerlebnis Informationsfunktion Wissenschaft und Umweltbildung
Habitatfunktion	Lebensraum für Pflanzen und Tiere Arten- und Biotopschutz Erhalt der biologischen Vielfalt

Tabelle 1: Ökosystemfunktionen von Flussauen (Scholz et al., 2012: 20)

2.5 Geographische Informationssysteme

„Ein Geoinformationssystem ist ein rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software, Daten und den Anwendungen besteht. Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfasst, gespeichert, verwaltet, aktualisiert, analysiert und modelliert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden“ (De Lange, 2013: 339).

Die Begriffe Geoinformationssystem, Geographisches Informationssystem oder GIS werden dabei synonym benutzt. Die Geographischen Informationssysteme haben ihren Ursprung in den 1960er Jahren und wurden vor allem in den 90er Jahren durch die technischen Verbesserungen in der Hard- und Software stark weiterentwickelt. Heutzutage werden Geoinformationssysteme für viele raumbezogene Fragestellungen angewendet und sind Standardanwendungen in Behörden und Unternehmen (De Lange, 2013: 339).
Dabei werden kommerzielle Geoinformationssysteme wie „ArcGIS“ von Esri oder auch Open-Source Softwarelösungen wie „QGIS“ verwendet.

Einem GIS liegt immer ein Datenbanksystem zugrunde, indem die verschiedenen Datensätze in unterschiedlichen Datentypen vorliegen. Dabei kann man zwischen Raumdaten, Sachdaten und Metadaten unterscheiden. Im GIS bilden diese Datentypen jeweils einen zusammenhängenden Layer, der über ein Koordinatenpaar (X/Y), einem Koordinatensystem und ein Bezugssystem eindeutig im geometrischen Raum verortet werden kann (Jannidis et al., 2017: 300ff).

- Als Raumdaten bzw. Geodaten werden Daten bezeichnet, die über Koordinaten einen eindeutigen Raumbezug aufweisen und somit georeferenziert sind. Bei ihnen handelt es sich entweder um Rasterdaten oder Vektordaten (Jannidis et al., 2017: 299ff).

  Rasterdaten liegen in Form von quadratischen Rasterzellen in einem Rastermodell vor und besitzen durch ihre einfache Datenstruktur gute Methoden für die digitale Bildverarbeitung. Durch ihre flächenhaften Informationen können sie mit mathematischen Berechnungen einfach verarbeitet und analysiert werden. Die Abgrenzung von Objekten ist jedoch von der Größe der Rasterzelle abhängig, wodurch eine Zelle häufig Informationen unterschiedlicher Objekte beinhaltet. Deshalb lassen sich Grenzen zwischen Objekten besser über Vektordaten in einem Vektormodell darstellen. Vektordaten beschreiben georeferenzierte Objekte, die als Geometrie in Form von Punkten, Linien oder Polygonen vorliegen. Sie weisen eine hohe räumliche Genauigkeit auf und sind gegenüber Rasterdaten unendlich skalierbar. Die Linien und Polygone bestehen aus Hilfspunkten (engl.: Vertex) und einem Anfangs- und Endpunkt (engl.: Node) (vgl. Abb. 12; Glaser et al., 2017: 188ff).

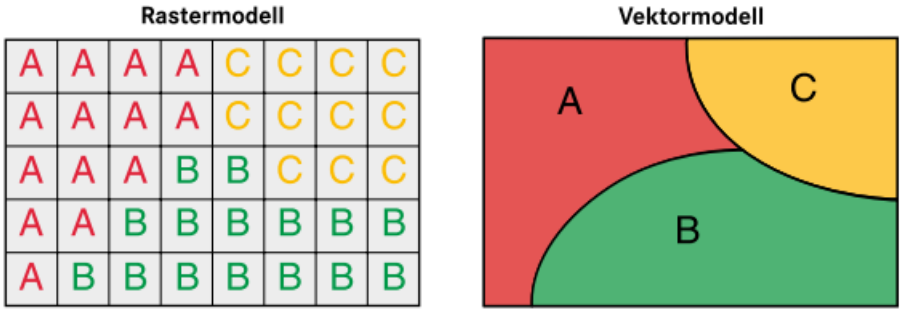


Abb. 12: Flächenabgrenzung im Vektor- und Rastermodell (Glaser, 2017: 188ff)

- Sachdaten beschreiben die Thematik von Geodaten über Attribute und können mit den Raumdaten verknüpft werden. Damit stellen sie zusätzliche Informationen für die Raumdaten dar (De Lange, 2013: 139; Jannidis et al., 2017: 302ff).
- Die Metadaten beschreiben wiederum die beiden Datentypen mit grundlegenden Informationen zur Datengrundlage, wie über den Bearbeiter, das Datum oder Erstellungsinformationen (De Lange, 2013: 256ff; Jannidis et al., 2017: 299ff).

Die graphische Benutzeroberfläche (Graphical User Interface, GUI) einer GIS-Software besteht in der Regel aus mehreren Komponenten (vgl. Abb. 13):
In einer Menüleiste können Karteneinstellungen vorgenommen und die grundlegende GIS-Funktionen aufgerufen werden (Nr. 1). Eine Symbolleiste dient der Auswahl von Funktionen und Tools für die Interaktion mit der Karte (Nr. 2). Über Widgets können verschiedene vom Benutzer ausgewählte Fenster integriert werden, z.B. ein Fenster mit den im Projekt enthaltenen Layern oder der Analysewerkzeuge (Nr. 3). In der Mitte befindet sich in der Regel das Kartenfenster, indem die geladenen Layer visualisiert werden (Nr. 4). Über die Statusleiste können Informationen zur Kartenansicht, wie das verwendete Koordinatensystem oder der Maßstab eingesehen und bearbeitet werden (Nr. 5). In der Regel lassen sich alle Fenster ganz nach den Vorlieben des Benutzers individuell anordnen, weshalb die in der Abbildung 13 zu sehende graphische Benutzeroberfläche des Geoinformationssystems „QGIS“ je nach Benutzer und verwendeter GIS-Software abweichen kann.

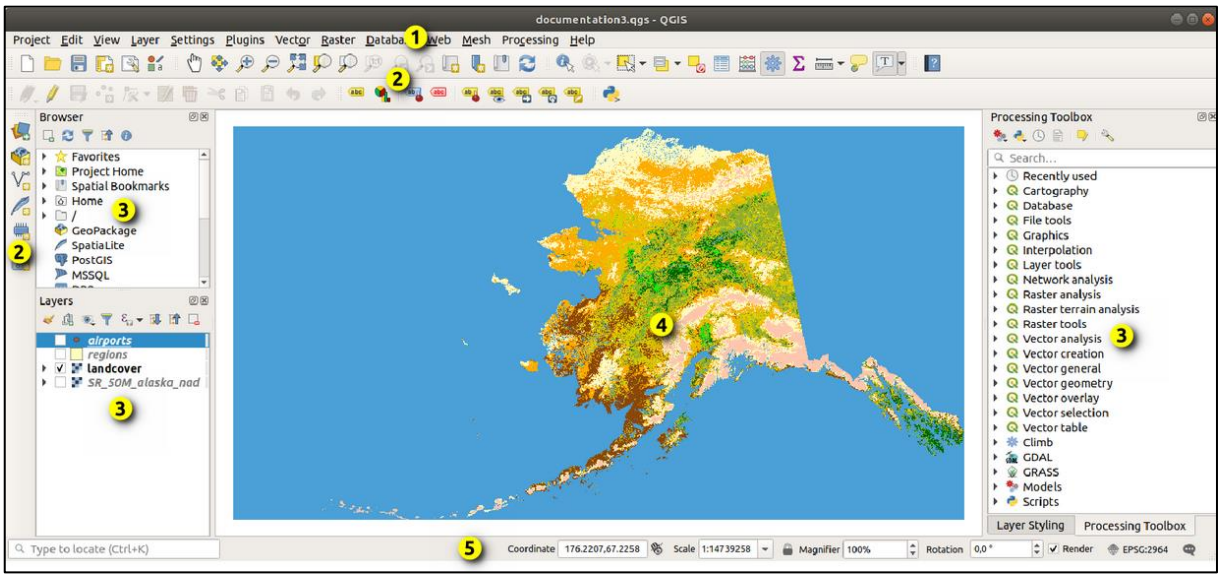


Abb. 13: Graphische Benutzeroberfläche der Software „QGIS“ (QGIS Documentation, 2023)

2.6 Digitale Geländemodelle

Ein digitales Geländemodell (DGM) ist die digitale Darstellung der Erdoberfläche durch dreidimensionale Koordinaten, welche durch Fernerkundungsmethoden erhoben wurden. Dabei wird die elektromagnetische Strahlung für Teile der Erdoberfläche mit Hilfe von photographischen oder elektronischen Methoden aufgezeichnet. Die Strahlung wird durch aktive oder passive Verfahren mittels Satelliten oder Flugzeugen erfasst. Bei passiven Verfahren wird nur die von der Erdoberfläche reflektierte Strahlung aufgezeichnet. Bei aktiven Verfahren wird vom Aufnahmesystem Strahlung ausgesendet und deren Reflektion aufgenommen. Über die Zeit zwischen der Ausstrahlung und Reflektion kann die Entfernung

zwischen dem Sensor und der Oberfläche bestimmt werden. In der Geoinformation hat dieses aktive Vermessungsverfahren der Erdoberfläche über die Airborne Laserscanning (ALS) Methode an Stellenwert zugenommen. Mit den Informationen aus ALS lassen sich digitale Geländemodelle erstellen, die neben den XY-Werten für die Lage auch einen Z-Wert für die Höhe enthalten (De Lange, 2013 201; Glaser et al., 2017: 188ff).
Neben DGMs gibt es noch ähnliche Bezeichnungen wie Digitales Höhenmodell (DHM) oder Digitales Oberflächenmodell (DOM). Das DOM umfasst alle Objekte der Oberfläche, wodurch die Höhenwerte nicht die Höhe der Oberfläche beschreiben, sondern der darauf befindlichen Objekte, wie beispielsweise die Vegetation oder Gebäude. Das DHM stellt die Höhe der Oberfläche dar und wird zum Teil synonym zum DGM verwendet. Allerdings muss sich ein DHM nicht unbedingt auf die Geländeoberfläche beziehen. Die Geländeoberfläche des DGMs kann dabei umfassender sein als die des DHMs und zusätzliche geographische Elemente wie Flüsse, Bergrückenlinien und Bruckanten beinhalten. Daher sollte grundlegend überprüft werden, um welche Höhenangaben es sich handelt (Li et al., 2005: 7ff).

Für die Oberflächenmodellierung werden hauptsächlich strukturierte Gitternetze mit gleichen Abständen der Höhenpunkte oder unstrukturierte Dreiecksnetze mit unterschiedlichen Abständen zwischen den Höhenpunkten verwendet.

- Ein strukturiertes Gitternetz wird durch ein Raster aus Zellen beschrieben, für das jeweils eine Höheninformation vorliegt. Hierbei werden die Höheninformationen zwischen den Laserscanpunkten interpoliert, wodurch eine gleichmäßige Darstellung der Oberfläche erzeugt wird. Aufgrund der Interpolation zwischen den Höhenpunkten wird die Oberfläche nur angenähert und durch die Vorgaben des Rasters entsteht ein kantiges und grobes Modell der Oberfläche (vgl. Abb. 14 (a); De Lange, 2013: 383; Li et al., 2005: 68ff)(Li et al., 2005).
- Dagegen werden unstrukturierte Dreiecksnetze (TIN) durch ungeordnete Punkte erstellt, bei denen jeder Punkt ein Eckpunkt mehrerer Dreiecke unterschiedlicher Größen darstellt. Dabei kommt es zunächst zu keinem Informationsverlust der Oberfläche, da für die Netzerstellung die gemessenen Laserscanpunkte benutzt werden. Jedoch werden für die Netzerstellung nur die wichtigeren Oberflächenpunkte genutzt und die übrigen im Sinne der Datenreduktion gelöscht. Durch die flexibleren Darstellungsformen von Dreiecken kann die Oberfläche mit unregelmäßigen Dreiecksnetzen exakter abgebildet werden, wodurch diese in der praktischen Geländemodellierung zunehmend benutzt werden. Unregelmäßige Dreiecksnetze werden auch als Triangle Irregular Networks (TIN) bezeichnet (vgl. Abb. 14 (b); Li et al., 2005: 69ff).

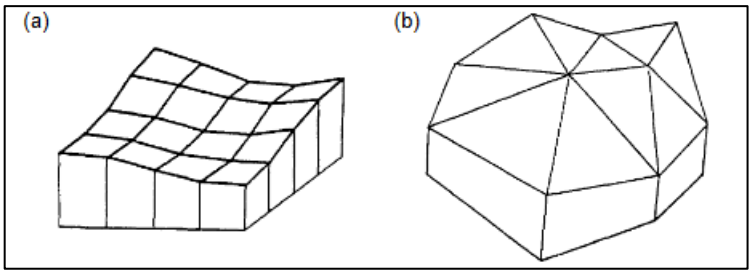


Abb. 14: Strukturiertes Gitternetz (a) und unstrukturiertes Dreicksnetz (b) (Li et al., 2005: 70)

Obwohl digitale Geländemodelle mit ihren Z-Werten über eine dreidimensionale Information verfügen, wird in der Geoinformation trotzdem nur von 2,5-dimensionalen Geländemodellen im 3-dimensionalen Raum gesprochen. Dies liegt daran, dass die DGMs nicht über alle Informationen, die für eine 3-dimensionale Modellierung notwendig sind, verfügen und im GIS nicht alle räumlichen Dimensionen, wie sie beispielsweise in Höhlen vorhanden sind, dargestellt werden können (Jannidis et al., 2017: 301; Li et al., 2005: 8).

2.7 GIS in der hydrologischen Modellierung

Die Integration von GIS in die hydrologische Modellierung hat in den letzten Jahrzehnten eine zunehmende Bedeutung erhalten und zu einer Zunahme von Modellen geführt. Der Wasserkreislauf und seine Teilprozesse, als Gegenstand der Forschung von hydrologischen Modellen, sind dynamische Prozesse, die zeitlich und räumlich variieren (vgl. Kapitel 2.1 & 2.2). Der räumliche Bezug kann dabei gut mit einem GIS abgedeckt werden, indem raumbezogene Daten, in die für hydrologische Modelle notwendige Form vorverarbeitet werden. Dabei bieten Geographische Informationssysteme die Möglichkeit verschiedene Daten mit gleichen Raumbezug über ein verwaltbares System zu integrieren, wodurch weniger vereinfachte Annahmen über die räumlichen Informationen gemacht werden müssen und insgesamt größere Bereiche der Realität abgedeckt werden können (Khatami & Khazaei, 2014: 42f).
Die Anpassung der Modellparameter kann dabei im GIS visuell überprüft werden, wodurch der Anwender weniger mit den Gleichungen im hydrologischen Modell zu tun hat. Dies gilt auch für die hydrologischen Ergebnisse, die als Karten präsentiert werden können und somit die Nachvollziehbarkeit der Modelle und Ergebnisse erhöht (Maidment, 1993: 147ff; Thakur et al., 2017: 1603f).

Wasser fließt in der Regel immer dem Gefälle folgend ab. Daher sind digitale Geländemodelle für hydrologische Modelle von grundlegender Bedeutung. Die deutlich gestiegene Verfügbarkeit und Qualität von digitalen Geländemodellen und die sich daraus ergebenden Abgrenzungsmöglichkeiten von Wassereinzugsgebieten, ermöglicht das Aufbauen von

räumlichen hydrologischen Datenbanken. DGMs können dabei unabhängig vom Maßstab für kleine und große hydrologische Simulationssysteme angewendet werden. Darüber hinaus bieten die Geodatenverarbeitungsfunktionen auch weiterführende Analysemöglichkeiten wie beispielswiese zur Neigung an (Heywood et al., 2006: 232f; Maidment, 1993: 147ff).

Zusätzlich können weitere Parameter festgelegt werden wie die Vegetation, der Bodentyp oder die Topographie einer Region, womit sich beispielsweise die Abflüsse und Überschwemmungen nach einem Niederschlagsereignis ermitteln lassen (Khatami & Khazaei, 2014: 48). Eine weitere Einsatzmöglichkeit wäre z.B. die Simulation von Sediment- und Nährstofftransport innerhalb eines Einzugsgebiets (Thakur et al., 2017: 1603).

Nach Sui & Maggio (1999: 41ff) gibt es verschiedene Herausforderungen, die beim Zusammenschluss von GIS und der hydrologischen Modellierung einhergehen:

- Datenbezogene Herausforderungen:
  Hydrologische Modelle benötigen umfangreiche und qualitativ hochwertige Daten zur Topologie, der Landnutzung, dem Niederschlag und dem Abfluss. Das Zusammenfügen dieser verschiedenen Datenformate aus verschiedenen Datenquellen kann zu Schwierigkeiten führen.

- Methodische Herausforderungen:
  Hydrologische Prozesse variieren räumlich und zeitlich stark, weshalb unterschiedliche Skalierungen mit Unsicherheiten einhergehen. Hinzu kommen Unsicherheiten betreffend der Modellparameter und -struktur

- Technische Herausforderungen:
  Geographische Informationssysteme und hydrologische Modelle erfordern in der Regel die Verwendung von verschiedenen Softwares. Die Interoperabilität zwischen diesen Softwares ist nicht immer gegeben und kann die Integration von GIS erschweren.

Generell wurden in der Fachliteratur vier verschiedene Ansätze zur Integration von GIS in der hydrologischen Modellierung verbreitet. Diese werden im Folgenden kurz beschrieben und können der darauffolgenden schematischen Abbildung 15 entnommen werden (Sui & Maggio, 1999: 34ff).

- Integration von GIS-Funktionen in hydrologische Modellierung
  Bei diesem Ansatz werden GIS-Funktionalitäten in die hydrologische Modellierungssoftware eingebettet. Die Softwareentwicklung ist dabei nicht durch GIS-Datenstrukturen eingeschränkt und bietet dem Entwickler viele Möglichkeiten. In der

Datenverwaltung und -visualisierung können sie allerdings mit kommerziellen GIS-Softwarepaketen nicht mithalten.

- Integration von hydrologischer Modellierung in GIS

  Hierbei werden hydrologische Modellierungsfunktionen in bestehende GIS-Softwarepakete integriert. Die Modellierungsfunktionen sind in der Regel simpler gehalten als in einer reinen hydrologischen Modellierungssoftware.

- Lose Kopplung

  Dieser Ansatz besteht aus einer eigenständigen GIS-Software und hydrologischen Modellierungssoftware, oder einer statistischen Software und hat keine gemeinsame Benutzeroberfläche. Die Integration erfolgt über eine Datenkonvertierung zwischen den Softwarepaketen durch ASCII- oder Binärdatenformate.

- Enge Kopplung

  Im Gegensatz zur losen Kopplung gibt es bei der engen Kopplung eine engere Integration zwischen GIS und hydrologischen Modellen. Dabei sind die GIS und Modellierungsfunktionen entweder in einem der Systeme integriert, oder sie haben eine enge Verknüpfung. Dadurch muss der Benutzer nicht zwischen den Softwarepaketen wechseln und keine Datenkonvertierungen durchführen.

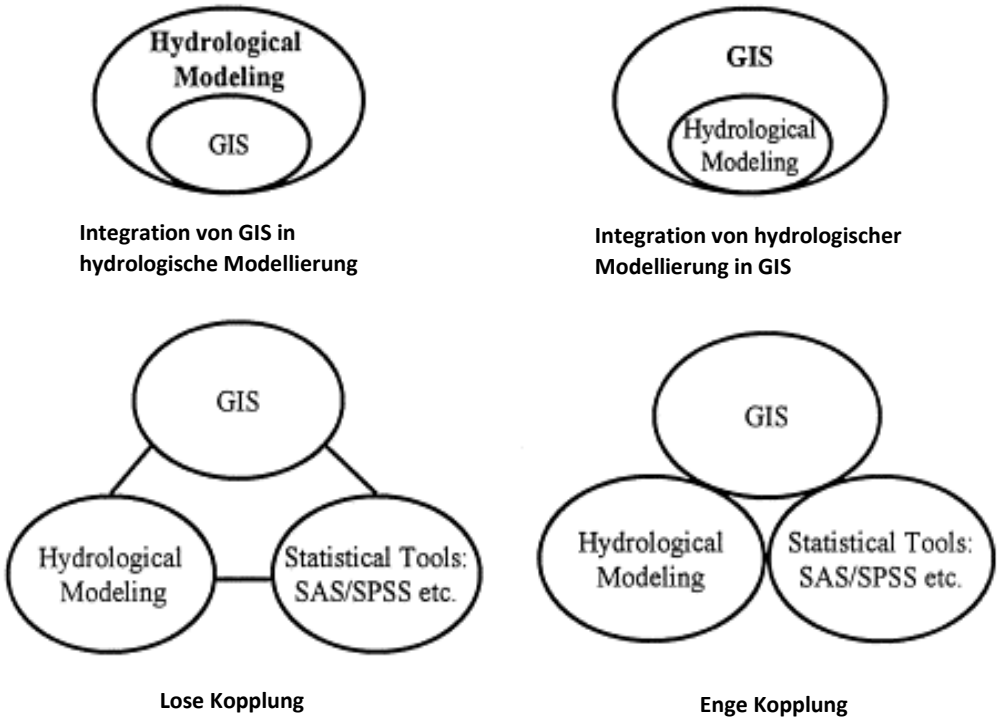


Abb. 15: Integrationsansätze zwischen GIS & Hydrologischen Modellen (Sui & Maggio, 1999: 35)

Die Integration von GIS in hydrologische Modelle ist von entscheidender Bedeutung für ein besseres Verständnis im Wassermanagement und kann über die Erstellung und Präsentation von Vorhersagemodellen eine wichtige Unterstützung für Entscheidungsträger sein. Die raumbezogenen Analysen und Szenarien werden vor allem in Hinblick auf den Klimawandel eine zunehmende Bedeutung haben. Dabei werden sie in Bereichen wie Umweltüberwachung und -planung, Wasserversorgung und -verschmutzung, sowie für wissenschaftliche Studien von hohem Nutzen sein (Thakur et al., 2017: 1604f). Für eine erleichterte Integration und genauere Vorhersageergebnisse sind verbesserte Datenquellen, standardisierte Methoden, sowie fortgeschrittene Analysetechniken notwendig (Sui & Maggio, 1999: 45f).

2.8 Hydrodynamisch-numerische Modelle

Für Flusslandschaften ergeben sich heutzutage viele komplexe Problemstellungen. Hochwasserbewertungen, die Planung von Flussrenaturierungen oder das Studieren natürlicher geformter Wasserläufe, machen den Einbezug größerer Gebiete, über die Grenzen des Fließgewässers hinaus, notwendig. Die Formeln für Durchflussberechnungen reichen hierfür nicht mehr aus, um die erforderlichen Informationen zu erhalten und auch der Einsatz von hydraulischen Modellen ist durch die Größe der zu untersuchenden Gebiete meist nicht möglich oder zu teuer. Daher kommen heutzutage verstärkt hydrodynamisch-numerische Modelle zum Einsatz (Vetsch et al., 2022e: 9f).

Ein hydrodynamisch-numerisches Modell (HN-Modell) ist ein Computerprogramm, mit dem das Fließverhalten von Wasser simuliert werden kann und somit diverse Fragestellungen vom Hochwasserschutz bis zur Strömungsoptimierung beantwortet werden können. Damit stellen HN-Modelle in den Wasserbau-Ingenieurwissenschaften die aktuelle Technik dar und kommen in der Wasserwirtschaft verstärkt zum Einsatz. Es ist eine spezifische Art von hydrologischem Modell, indem die Strömungshydraulik des Wassers durch die mathematischen partiellen Differenzialgleichungen zur Massen- und Impulserhaltung (Kontinuitäts- und Impulsgleichung) beschrieben werden, wodurch theoretisch auch kleinskalige Strömungsphänomene gelöst werden können. In der Natur ist es jedoch sehr unwahrscheinlich, alle Rand- und Anfangsbedingungen zu bestimmen, weshalb je nach Problemstellung auch vereinfachte mathematische Modelle verwendet werden. Durch diese kann auch die Rechenzeit reduziert werden, die zur Lösung der vollständigen Gleichung, bei hohen räumlichen und zeitlichen Auflösungen, benötigt wird. Die Grundlage zur Beschreibung der Strömungshydraulik stellt die Navier-Stokes-Gleichung dar, die jedoch bisher nicht lösbar ist und vereinfacht durch die Reynolds-Gleichung, Flachwassergleichungen oder die Bernoulli-Gleichung angenähert wird (Oertel & Bung, 2014: 19ff; ÖWAV, 2014: 16; Vetsch et al., 2022e: 14).

Zur Lösung der mathematischen Gleichungen kommen numerische Methoden zum Einsatz, die oft vom verwendeten Gitternetz abhängig sind. Ein numerisches Gitternetz ist die diskrete (endliche/abzählbare) Form des geometrischen Gitternetzes in der das Problem mit den mathematischen Gleichungen gelöst werden soll. Dabei teilt es das Gitter in eine bestimmte Zahl von Teilgebieten, die ähnlich wie bei den digitalen Geländemodellen in strukturierte und unstrukturierte Netze unterschieden werden (vgl. Kapitel 2.6; Ferziger & Peric, 2008: 31; ÖWAV, 2014: 16ff):

- Strukturierte Netze haben immer dieselbe Zellenanzahl in der x- und y- Achse, wodurch sie eindeutig über zwei Koordinaten identifiziert werden können. Dadurch können die mathematischen Richtungsableitungen rasch bestimmt werden, was eine geringe Datenmenge verursacht. Jedoch können mit strukturierten Netzen keine räumlich komplexen Gebiete abgebildet werden, was ihre Nutzungsmöglichkeiten stark einschränkt (vgl. Abb. 16).
- Durch Unstrukturierte Netze können auch die differenzierteren Gebiete abgebildet werden, was die Generierung jedoch sehr komplex macht und eine längere Rechenzeit bedeutet (vgl. Kapitel 2.6). Ihre Zellenanzahl ist nicht definiert, wodurch die Anzahl der Zellennachbarn unbekannt ist. Daher müssen die Punkte, die eine Zelle formen, mit ihren Koordinaten angegeben und ihr Zellbezug definiert werden. Die Gitternetze werden mit sogenannten Gittergeneratoren unter Hinzunahme verschiedener Kriterien, wie z.B. Zellengrößen oder Winkelkriterien, automatisiert erstellt (vgl. Abb. 16).

Ein numerisches Gitternetz wird in der Fachliteratur auch als Berechnungs- oder Rechennetz bezeichnet (vgl. Oertel & Bung, 2014; ÖWAV, 2014). Damit eine Unterscheidbarkeit zwischen den geometrischen und numerischen Gitternetzen gegeben ist, werden numerische Gitternetze nachfolgend nur noch als Rechennetze bezeichnet.

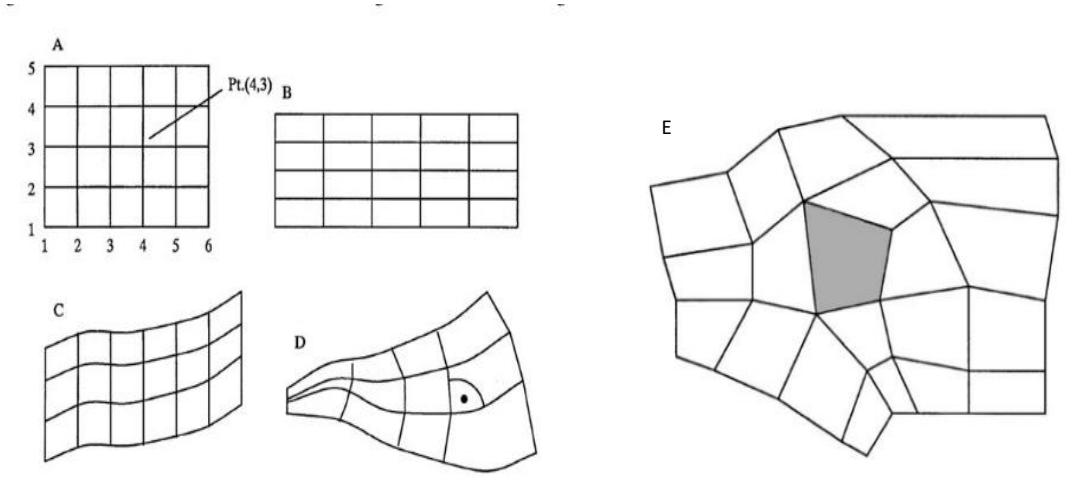


Abb. 16: Strukturiertes (A-D) und unstrukturiertes Netz (E) (vgl. ÖWAV, 2014: 17)

Die numerischen Methoden versuchen die in den mathematischen Gleichungen vorhandenen unbekannten Variablen mit einem Lösungsalgorithmus zu lösen, indem sie zwischen den Variablen eine Verteilung annehmen. Dadurch wird aus den kontinuierlich unbekannt verteilten Variablen eine diskontinuierliche Verteilung, was auch als Diskretisierungsmethode bekannt ist. Die numerischen Methoden unterscheiden sich dabei in ihrer Verteilungsart, wobei man zwischen drei Methoden unterscheiden kann (ÖWAV, 2014: 20f):

- Finite-Differenz-Methode, verwendet die Differenzialform der Gleichung
- Finite-Volumen-Methode, verwendet die Integralform der Gleichung
- Finite-Element-Methode, verwendet die schwache Integralform der Gleichung

Zur Lösung der Gleichungen wird das Rechennetz in diskretisierte Teilgebiete aufgeteilt und mit einer numerischen Methode gelöst. Hierfür müssen zusätzlich Rand- und Anfangsbedingungen definiert werden. Dabei handelt es sich um festgelegte Größen für den Rand des Rechennetzes, wodurch die numerische Lösung der Gleichungen bis weit ins Rechennetz beeinflusst werden kann. In der Regel werden für die Anfangsbedingung Abflussganglinien und für die Randbedingung Wasserstände benutzt (ÖWAV, 2014: 19; Vetsch et al., 2022e: 30).

Hydrodynamisch-numerische Modelle lassen sich in drei Modellarten unterscheiden, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile aufweisen und sich für unterschiedliche Fragestellungen eignen (Oertel & Bung, 2014: 22f; ÖWAV, 2014: 24):

- Eindimensionale Modelle bilden ein Gewässer durch aufeinanderfolgende Querprofile ab, womit dessen stationären aber auch instationären Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten durch die St.-Venant-Gleichung oder der einfachen Energieerhaltung berechnet werden können. Sie werden vor allem benutzt, wenn die Fließwege bekannt sind oder Abweichungen vernachlässigbar sind. Dabei weisen sie eine hohe Performance auf, wodurch sich Flussabschnitte von über 100km erstellen und simulieren lassen.
- Zweidimensionale Modelle werden durch ein Rechennetz dargestellt und mit tiefengemittelten Flachwassergleichungen berechnet. Theoretisch handelt es sich bei ihnen um 2,5-dimensionale Modelle, da ihr Rechennetz auf digitalen Geländemodellen beruht. Allerdings wird in der Fachliteratur nur von 2D-Modellen gesprochen, weshalb dies in dieser Arbeit beibehalten wird. Mit ihnen werden typischerweise Überflutungsszenarien simuliert. Sie können jedoch auch für Simulationen des Sedimenttransports und der Gewässergüte herangezogen werden. 2D Modelle werden daher für Simulationen benutzt, bei denen die Fließwege unbekannt sind. Durch das

Rechennetz haben diese Modelle im Vergleich zu 1D Modellen sehr viel längere Rechenzeiten und einen größeren Aufwand in der Erstellung und Wartung des Modells. Daher werden sie oft mit 1D Modellen gekoppelt, indem das bekannte Gewässer durch ein 1D Modell abgebildet wird und die umliegenden potenziellen Überflutungsbereiche mit einem 2D Modell. Dadurch lassen sich Modellgrößen bis zu 50km Länge simulieren.

- Dreidimensionale Modelle haben eine sehr hohe räumliche Auflösung, wodurch auch sehr komplexe Strömungen untersucht werden können. Durch ihren hohen Zeitaufwand in der Erstellung des Modells und durch die komplexen Randbedingungen sind sie größtenteils Experten vorbehalten und sind je nach Rechenleistung auf Modellgrößen von wenigen hundert Metern beschränkt. Daher eignen sie sich derzeit nur für Detailuntersuchungen wie Strömungen an Bauwerken oder in Fluss-krümmungen.

3 Die Donau-Auen

In diesem Kapitel werden die Donau-Auen östlich von Wien vorgestellt. Dabei wird zunächst die Entwicklung der Donau-Auen zu ihrem momentanen Zustand, durch die grundlegenden anthropogenen Eingriffe im 19. Jahrhundert erläutert (Kapitel 3.1). Anschließend wird der Nationalpark Donau-Auen, zu dem die Donau-Auen heute gehören, präsentiert (Kapitel 3.2). Abschließend wird das für die Methodik ausgewählte Projektgebiet dargestellt und auf wesentliche Merkmale verwiesen (Kapitel 3.3).

3.1 Historische Entwicklung

Die Donau-Auen sind ein rund 43 km langes Feuchtgebiet entlang der österreichischen Donau zwischen den Großstädten Wien und Bratislava (vgl. Abb. 17). Als sogenannte Au beschreiben sie einen Lebensraum, der von den wechselnden Wasserständen seines zugehörigen Flusses und den daraus resultierenden Grundwasserschwankungen bestimmt wird (vgl Kapitel 2.4; Manzano, 2000: 230ff; Schön, 1999: 249). Möchte man die Entwicklung der Donau-Auen zu ihrem derzeitigen Zustand nachvollziehen, muss man zwangsläufig die Entwicklung der Donau mit ihren anthropogenen Regulierungsmaßnahmen seit dem 19. Jahrhundert, die zu einer Veränderung in den Auen geführt haben, betrachten.

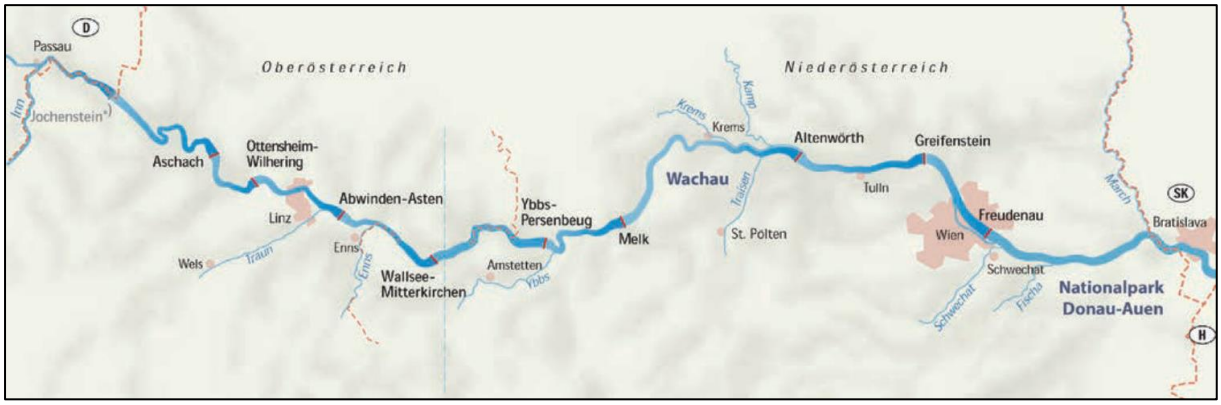


Abb. 17: Die österreichische Donau (Jungwirth et al., 2014: 235)

Die Donau ist mit einer Länge von 2.857 km der zweitgrößte und zweitlängste Fluss Europas und durchströmt auf ihrem Weg zum Schwarzen Meer auch Österreich auf rund 350 Flusskilometern von der Inn-Mündung an der deutschen Grenze bei Passau, bis zur March-Mündung an der slowakischen Grenze bei Bratislava (vgl. Abb. 17; Jungwirth et al., 2014: 16ff & 222). Dabei durchläuft sie mit einem mittleren Gefälle von 0,45‰ eine Höhendifferenz von ca. 157 m (Habersack et al., 2021: 7). Der Abschnitt von der Quelle im deutschen Schwarzwald bis zur österreichisch-slowakischen Grenze wird auch als Obere Donau bezeichnet und ist vor allem von den Alpen geprägt, welche der Donau durch die Schneeschmelze im Frühling und

Sommer und durch atmosphärische Niederschläge vorwiegend schwankende Abflüsse bescheren. Im Bereich der Donau-Auen können dadurch Abflussschwankungen von bis zu acht Metern auftreten (Lazowski, 1997: 71). Die vielen alpinen Zubringer führen dazu, dass allein in Österreich rund 22% der gesamten Abflussmenge der Donau eingespeist wird. Dazu werden von der Donau aus den Alpen enorme Mengen von Sedimenten in Form von Geschiebematerial und Schwebstoffen transportiert. Der Großteil davon wird erst hinter den Donau-Auen stromab von Budapest abgelagert (Habersack et al., 2021: 32ff; Jungwirth et al., 2014: 16ff).

Bis zu Beginn des 19. Jahrhunderts gab es an der internationalen Donau keine Wasserbauwerke, die den Donaustrom tiefgehend veränderten (Jungwirth et al., 2014: 150). Zwar wurden in Wien bereits seit dem späten Mittelalter kleinere Regulierungsmaßnahmen umgesetzt, um der Verlandung des Donaukanals entgegenzuwirken und die Schifffahrt zu sichern (Hohensinner, 2020; Jungwirth et al., 2014: 130). Jedoch bewirkten diese Maßnahmen keine entscheidende Veränderung der damaligen Donau, die nicht wie heute aus einem einzelnen Hauptstrom bestand, sondern sich aus mehreren Strömen mit großen Inseln dazwischen zusammensetzte und dem anabranching Flusstyp zugeordnet werden konnte (vgl. Kapitel 2.3; Jungwirth et al., 2014: 137).
Diese Flussarme waren sehr viel breiter als der heutige Hauptstrom und bildeten an den Ufern ausgeprägte Kiesbänke aus. Aufgrund der Breite waren die Flussarme um einiges flacher als der heutige Donauhauptstrom, wodurch diese bei Niedrigwasser teilweise sogar mit dem Pferd überquerbar waren. Die Gewässerarme entwickelten sich dabei unabhängig voneinander und bildeten gestreckte, verzweigte und mäandrierende Verläufe, die sich stetig veränderten. Zwischen den Gewässerarmen bildeten sich Auen, die infolge der wechselnden Abflussmengen der Donau ständigen Hoch- und Niedrigwassern ausgesetzt waren (vgl. Kapitel 2.4). In weiten Teilen der Augebiete kam es bei Hochwassern durch die starke Verzweigung der Seitenarme zu Überschwemmungen. Dabei konnte sich der Wasserlebensraum auf mehreren Kilometern ausbreiten und alte, verwachsene Flussarme anbinden. Diese Vernetzung ermöglichte den Austausch von wichtigen Lebensgrundlagen, wie Nährstoffen, Sedimenten und Biomasse im gesamten Augebiet und eröffnete den aquatischen Organismen Migrationswege zu diversen Habitaten. Durch die Verbindung der gesamten Au, infolge der vielen Flussarme, erschien das Flussauensystem durch den Wechsel aus Niedrig- und Hochwasser wie ein pulsierender Organismus. In der Literatur ist dieses Pulsieren als „flood pulse concept“ bekannt und wurde als Grundlage für die hohe Produktivität und Biodiversität in Flussauen anerkannt (vgl. Kapitel 1; Junk et al., 1989). Das Pulsieren des Oberflächenwassers führte auch zu Schwankungen des Grundwasserstands, welcher durch den Austausch von beispielsweise Nährstoffen, Sauerstoff und der Wassertemperatur eng mit dem Oberflächengewässern verbunden war. Die Erreichbarkeit des

Grundwassers war dabei für die Auenvegetation von hoher Bedeutung und ermöglichte die Etablierung von speziell auf diesen nassen Standort adaptierten Vegetationsarten. Hinzu kam, dass sich durch die ständige räumliche Veränderung der Gewässerarme das Augebiet in einem dauerhaften Verjüngungsprozess befand. Dabei wurden in rund 50 Jahren knapp zwei Drittel der Donau-Auen umgelagert, wodurch sich ein sehr dynamischer Lebensraum mit vielen verschiedenen Habitaten in unterschiedlichen Sukzessionsstadien bildete. Trotz dieser hohen Umgestaltungsdynamik befand sich dieser Lebensraum in einem Gleichgewicht, bei dem die Habitatzusammensetzung im Augebiet vergleichbar blieb. Dieses Mosaik von räumlich und zeitlich unterschiedlichen Habitaten wird in der Fachliteratur als „shifting habitat mosaic“ bezeichnet und bot die Voraussetzungen für eine vielfältige Biodiversität (Stanford et al., 2005). Insgesamt förderte die hohe Dynamik, zusammen mit den Oberflächen- und Grundwasserbedingungen, die Ansiedlung von semi-aquatisch angepasster und strömungsliebender (rheophiler) Flora und Fauna (Jungwirth et al., 2014: 136ff).



Abb. 18: Wien um 1760 (Jungwirth et al., 2014: 154)

Die Donau-Auen konnten vor dem 19. Jahrhundert also nicht eindeutig von der Donau abgegrenzt werden und bildeten ein eng miteinander verbundenes Flusssystem (vgl. Abb. 18).

Die Nutzung der Auen beschränkte sich bis dahin auf eine forst- und landwirtschaftliche Nutzung, sowie dem Einsatz von Schiffspferden, die vom Ufer aus Schiffe flussaufwärts zogen. Hierfür wurden die Ufer gerodet, weshalb die damalige anthropogene Nutzung die Dynamik der Donau-Auen wahrscheinlich erhöhte. Im 17. Jahrhundert führte dies zum Verlust von verschiedenen Siedlungen, was jedoch aufgrund der finanziellen Kosten und dem Aufwand von Regulierungsmaßnahmen in Kauf genommen wurde (Jungwirth et al., 2014: 150ff).

Eine Regulierung der Donau wurde erst wieder im 19. Jahrhundert durch das fortschreitende Wachstum der Stadt Wien und der steigenden Nachfrage an Gütern bedeutsamer. Wien wurde damals hauptsächlich über die Schifffahrt versorgt, welche Ansprüche an eine hinreichende Fahrwassertiefe hatte. In der Folge fanden die ersten Donaudurchstiche zwischen Mäandern in den Jahren 1823 bis 1837 statt, wobei man kleine Gräben aushob, die Donau einleitete und erodieren ließ. Ein verheerendes Eisstau-Hochwasser im Jahr 1830 führte schließlich auch zu einem Umdenken in der Bauweise von Holz- zu Steinmaterialien und von Quer- zu Parallelbauwerken. Bis 1849 wurden rund 37% des österreichischen Donauufers befestigt, wobei das Ufer damals noch breiter angelegt wurde und Kiesflächen und kleinere Inseln enthielt. Die Märzrevolution 1848, die durch den hungervollen Winter entstand, brachte die Regierung schließlich dazu neue Infrastrukturprojekte zu veranlassen. Dies resultierte in neuen Donaudurchstichen, Leitwerken und Abdämmungen größerer Donauarme mit dem Ziel, das Wasser im Hauptstrom zu konzentrieren und eine bessere Schiffbarkeit zu erreichen. Dabei orientierte man sich an dem Höchstwasserstand, an dem die Schiffszüge noch flussaufwärts gezogen werden konnten und errichtete die sogenannten Treppelwege etwas über diesem Höhenniveau, welches heute als höchster schiffbarer Wasserstand (HSW) bekannt ist (vgl. Kapitel 2.2). Für das Flussbett entschied man eine Breite von 340 bis 380m einzuhalten, wobei nicht genügend finanzielle Mittel vorhanden waren, um eine komplette homogene Linienführung zu erhalten. Bis 1865 wurden auf diese Weise rund 49% des österreichischen Donauufers reguliert (Jungwirth et al., 2014: 154ff).

Ein weiteres starkes Eisstau-Hochwasser im Bereich Wien im Jahr 1862 führte schließlich zu den größten Regulierungsarbeiten an der Wiener Donau und zu dem heutigen bekannten Flussverlauf. Das sich in den verzweigten Flussarmen stauende Eis sollte mit einem geradlinigen Flussverlauf zwischen der Wiener Pforte, stromauf von Wien und Fischamend, stromab von Wien verhindert werden. Um das zu erreichen, wurden von 1870 bis 1875, in der als „große Donauregulierung“ bekannten Maßnahme rund 16,4 Mio m³ Erdmaterial aus zwei Durchstichen ausgehoben, welche für die Stadterweiterung der Bezirke Leopoldstadt und Brigittenau genutzt wurden. Im April 1875 wurde schlussendlich das neue Donauflussbett geflutet und der vorherige Hauptarm, die heutige „Alte Donau“, fiel trocken (Jungwirth et al., 2014: 163ff).

Die nachfolgende Abbildung 19 zeigt ein historisches Foto der großen Donauregulierung, kurz vor dem Durchstich, mit dem neuen geradlinigen Donauhauptarm und dem alten Hauptarm auf der rechten Seite.



Abb. 19: Wiener Donau-Durchstich um 1875 (Jungwirth et al., 2014: 165)

Nach Fertigstellung der Donauregulierungen in Wien wurden die Maßnahmen in Niederösterreich fortgesetzt. Hierfür wurde ab 1882 stromabwärts von Wien der Marchfeldschutzdamm errichtet, welcher 1904 bei der Marchmündung vollendet wurde. Zusätzlich wurde die Donau im heutigen Nationalparkbereich, wie zuvor in anderen Abschnitten, reguliert und Maßnahmen gesetzt, um die Fahrwassertiefe für die größer werdenden Schiffe bei Niedrigwasser sicherzustellen. Dafür wurde eine weitere schmalere Fahrrinne innerhalb des Flussbetts eingearbeitet, indem vom Ufer senkrecht zum Strom ausgerichtete Buhnen angelegt wurden. Die Regulierungen an der österreichischen Donau wurden bis 1914 fertig gestellt und dauerten somit knapp 100 Jahre (Jungwirth et al., 2014: 166ff).

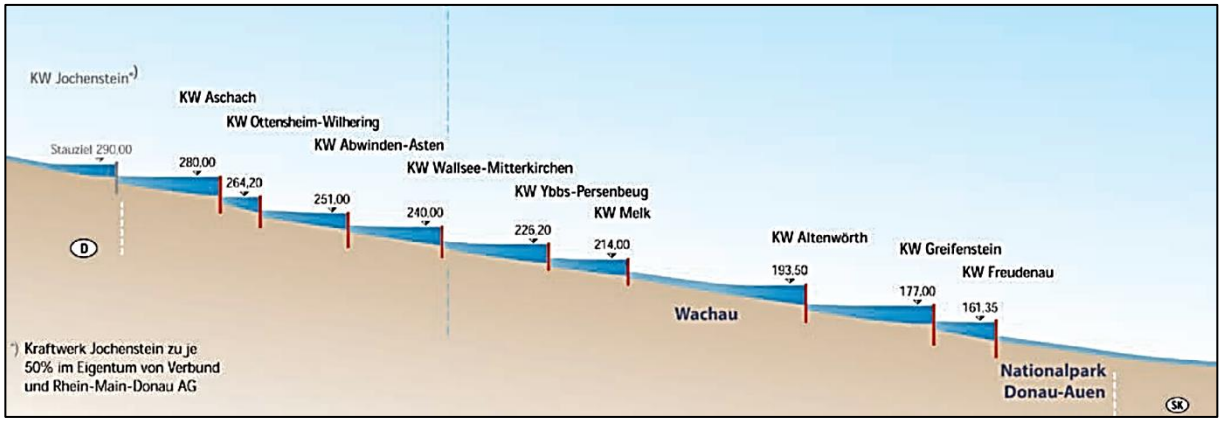


Abb. 20: Wasserkraftwerkskette an der österreichischen Donau (Jungwirth et al., 2014: 234)

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts, gab es bereits erste Pläne für den Bau einer Wasserkraftwerkskette an der österreichischen Donau. Jedoch wurden diese aufgrund der

Wirtschaftskrise und dem zweiten Weltkrieg wieder verworfen. Erst im Jahr 1952, mit dem Bau des Kraftwerks Jochenstein an der deutsch-österreichischen Grenze, wurden die Pläne wieder aufgegriffen und in die Tat umgesetzt. Der Bau der Kraftwerke verlief in einem so rasanten Tempo, dass bis 1984 im Schnitt alle drei Jahre ein neues Wasserkraftwerk in Betrieb ging. Die rund 350 km lange österreichische Donau wurde dadurch im Schnitt alle 28 km eingestaut, wodurch nur noch die Wachau und die Donau-Auen östlich von Wien als freie Fließstrecken übrigblieben (vgl. Abb. 20; Jungwirth et al., 2014: 233).

Auch der Abschnitt der Donau-Auen sollte mit dem nächsten Kraftwerk in der Stopfenreuther Au bei Hainburg eingestaut werden. Das zunehmende umweltpolitische Bewusstsein führte allerdings zu massiven Protestaktionen durch die Bevölkerung, wodurch die österreichische Regierung sich gezwungen sah, im Dezember 1984 einen „Weihnachtsfrieden“ auszurufen und weitere wissenschaftliche Forschungen zu ökologischen und ökonomischen Nutzungsmöglichkeiten von Auen abzuwarten (vgl. Kapitel 3.2.1; Kosz, 1996: 110f). Dies führte auch dazu, dass sich das bisher letzte Kraftwerk Freudenau einer umfangreichen Umweltverträglichkeitsprüfung stellen musste und bis zur Fertigstellung im Jahre 1997 nochmals 13 Jahre vergingen. Das Kraftwerk Nussdorf, welches aus energiewirtschaftlicher Sicht zum Kraftwerk Freudenau gehört, wurde im Jahr 2005 fertig gestellt und schließt die österreichische Kraftwerkskette ab (vgl. Abb. 20; Jungwirth et al., 2014: 236).
Das Kraftwerk bei Hainburg konnte dagegen verhindert werden und die Donau-Auen zwischen Wien und Bratislava wurden nach einem zwölfjährigen fachlichen und politischen Diskurs am 27. Oktober 1996 zum Nationalpark Donau-Auen ausgesprochen (vgl. Kapitel 3.2.1; Manzano, 2000: 234f).

Die Donauregulierungen im 19. Jahrhundert und die Errichtung der Kraftwerkskette im 20. Jahrhundert hatten große Auswirkungen auf den zu Beginn dieses Kapitels beschriebenen Zustand der Donau-Auen vor dem 19. Jahrhundert. Die vorher nicht differenzierbare Flusslandschaft wurde durch die Regulierungen räumlich in die Donau und die beidseitig angrenzenden Auen getrennt. Dabei führte die Einengung der Donau in ein schmaleres Flussbett zu einer Sohleintiefung bei Wien-Nussdorf und aufgrund des stromabwärts niedrigeren Gefälles zu einer verstärkten Sedimentation im Bereich der Donau-Auen. Hierdurch stieg der Mittelwasserstand (MW) der Donau an und es bildeten sich zum Bedauern der Schifffahrt neue Inseln und Kiesbänke. Zudem ermöglichte dies eine Sedimentation auch in höheren Augebieten. Trotz des gestiegenen Wasserstands kam es durch die Regulierungen zu einer Abtrennung der durchströmten Seitenarme, die nur noch bei Hochwassern erreicht wurden. Die durchströmten Seitenarme wurden somit zu stehenden Altarmen, dessen Flächenanteile dadurch zeitweise mit dem des Donauhauptarm vergleichbar waren. Durch die

Abtrennung der Seitenarme konnten diese die Abflüsse der Donau nicht mehr in diesen Mengen aufnehmen, wodurch die natürliche Retentionsfunktion der Auen zu einem Teil verloren ging (vgl. Kapitel 2.4). Auch wurde der natürliche Weitertransport der abgelagerten Sedimente unterbunden, da die Erosion stark eingeschränkt wurde. Die abgetrennten Altarme verlandeten in den darauffolgenden Jahrzehnten zunehmend oder wandelten sich in isolierte Altwässer um. Der pulsierende Charakter wurde durch die Abtrennung der Donauarme begrenzt und der „flood pulse“ war in vielen Bereichen der Auen nicht mehr möglich (Jungwirth et al., 2014: 169ff).

Die Auswirkungen der Donauregulierungen waren in der Lobau, dem nördlichen bzw. linksufrigen Augebiet direkt stromabwärts von Wien, besonders ausgeprägt. Der rund 60km lange Marchfeldschutzdamm, welcher nördlich der Donau von Wien bis zur March verläuft und die landwirtschaftlichen Flächen des Marchfeldes vor Hochwassern schützen soll, schnitt die Lobau komplett vom Flussgeschehen ab (Schön, 1999: 251). Durch die Entkoppelung kam es zu starken Verlandungen und einen Verlust der aquatischen und semi-aquatischen Lebensräume von rund 30% in 56 Jahren (Reckendorfer et al., 2013a). Erst nach der Lobau vergrößert der Marchfeldschutzdamm seinen Abstand zur Donau wieder, weshalb dieser nördliche Bereich, zusammen mit den bis zu einer natürlichen Geländekante südlich der Donau vorhandenen Auen, als dynamische Augebiete verblieben. Dagegen müssen die Auen hinter dem Marchfeldschutzdamm aufgrund der fehlenden Flussdynamik von natürlichen Auen differenziert werden (Schön, 1999: 249ff).

Der höhere Mittelwasserstand im Bereich der Donau-Auen kehrte sich im 20. Jahrhundert durch den Bau der Kraftwerkskette um. Durch die Kraftwerke wurde die zuvor frei fließende Donau in eine Aneinanderreihung von Stauseen umgewandelt, wodurch die Fließ-geschwindigkeit und dadurch das Transportvermögen der Donau sank. Zudem hielten die Kraftwerke das Geschiebe zurück, welches sich vor den Kraftwerken ansammelte. Da das Transportvermögen der Donau im Bereich der Donau-Auen erhalten blieb, entstand ein Geschiebedefizit. Da die Donau dieses Geschiebedefizit nicht aus den abgetrennten Auen entnehmen konnte, holte sie es sich aus der eigenen Flusssohle, wodurch sie sich eintiefte. Als Folge sank der Mittelwasserstand in der Donau und der Höhenunterschied zur Geländeoberkante der Auengebiete vergrößerte sich. Da das Sedimentationsniveau in den Donau-Auen seit der Donauregulierung höher lag, führte der sinkende Mittelwasserstand zu einem größeren Höhenunterschied als vor der Regulierung. Dies reduzierte das Pulsieren in den Auen, wodurch der korrespondierende Grundwasserstand absank. Diese veränderten Standortbedingungen führen heute zu einer trockener werdenden Au, welche durch den erhöhten Flurabstand zwischen Erdoberfläche und Grundwasser auch die natürliche Verjüngung der Vegetation einschränkt. Da die natürlichen Umlagerungsprozesse nicht mehr in dem früheren Ausmaß ablaufen, findet eine Regeneration der Augebiete nicht mehr statt.

Dies führt zu fortschreitenden Alterungsprozessen mit einem Wandel einer semi-aquatisch geprägten Au zu einer zunehmend terrestrisch dominierenden Au, mit negativen Folgen für die Biodiversität. Die Vegetation zeigt dabei eine starke Verholzungstendenz mit einem Wechsel der Arten einer Weichen Au hin zu denen einer Harten Au (Eckmüllner, 2012; Jungwirth et al., 2014: 169ff).

3.2 Der Nationalpark Donau-Auen

Dieses Kapitel gliedert sich in die Gründungsgeschichte des Nationalparks Donau-Auen (Kapitel 3.2.1), den räumlichen Aufbau (Kapitel 3.2.2) und die Lebensräume des Nationalparkgebiets mit seiner Biodiversität (Kapitel 3.2.3). Abschließend werden die Ziele der Nationalpark Verwaltung (Nationalpark Donau-Auen GmbH), die jeweils in einem zehnjährigen Managementplan festgehalten werden, vorgelegt (Kapitel 3.2.4) und bisherige Managementmaßnahmen vorgestellt (Kapitel 3.2.5).

3.2.1 Gründungsgeschichte

Der Nationalparkgründung im Jahr 1996 ging eine rege und lange umweltpolitische Diskussion voraus. Die staatliche Österreichische Donaukraftwerke AG, als Vorgänger der heutigen teilprivatisierten „Verbund AG“, erzielte 1983 die Erklärung des Kraftwerksbau in der Stopfenreuther Au bei Hainburg als bevorzugtes Wasserbauprojekt durch die Wasserrechtsbehörde. Damit wurde das Projekt dem öffentlichen Interesse zur Erholung, Tourismus oder Naturschutz übergeordnet und von der Bundesregierung, sowie den vom Bau profitierenden industriellen Akteuren, unter den Argumenten des Wirtschaftswachstums, Arbeitsplatzschaffung und der Sicherstellung der Stromversorgung getragen. Besonders für die Regierung war der erfolgreiche Abschluss des Projekts wichtig, nachdem zuvor der Bau des Atomkraftwerks Zwentendorf durch eine Volksabstimmung gescheitert war. In der Bevölkerung sah man jedoch durch die vorherigen Wasserkraftwerke zunehmend, dass diese nicht nur positive Aspekte mit sich brachten, sondern damit auch eine komplette Umgestaltung der Landschaft einherging. Die Vorgehensweise der Genehmigung mit der Ignoranz jeglicher Bedenken machte den Kraftwerksbau für die Bevölkerung zu einem demokratiepolitischen Konflikt. Mit überparteilichen und prominenten Vertretern wurde als Gegenkraft zur Regierung ein Personenkomitee geschaffen und ein Volksbegehren veranlasst. Trotz aller Bemühungen sollten am 8. Dezember 1984 die Rodungen in der Stopfenreuther Au beginnen, woraufhin rund 5.000 Aktivistinnen und Aktivisten die Baumfällungen blockierten. Zwei Tage später rückte die Polizei an, um den Auwald zu räumen, wodurch die Aufmerksamkeit durch die Medien in die breite Bevölkerung getragen wurde. In der Folge kamen zunehmend mehr

Menschen in die Au, von denen sogar 3.500 dauerhaft dort campierten. Die Regierung änderte ihren Kurs jedoch nicht und lies am 19. Dezember mit zusätzlichen Polizeieinheiten aus Wien die Au unter Anwendung von Schlagstöcken, Hunden und Wasserwerfern räumen und den zu rodenden Auwald mit Stacheldraht sichern. Der Aufschrei gegen die Polizeigewalt war enorm und führte zum Protest von 40.000 Menschen auf der Wiener Ringstraße, woraufhin die Regierung am 21. Dezember einlenkte und der damalige Bundeskanzler Sinowatz einen „Weihnachtsfrieden“, sowie eine Denkpause veranlasste. Ein Jahr später hob der Verwaltungsgerichtshof den Wasserrechtsbescheid für das Kraftwerk auf, womit dem Bau die Rechtsgrundlage fehlte. Mit dem Volksbegehren hatte man zudem rund 350.000 Unterschriften gegen den Kraftwerksbau gesammelt. Zwar war nun absehbar, dass ein Nationalpark als alternatives Projekt entstehen würde, jedoch wusste man nicht, wie man diesen im Einklang mit den Interessen der Schifffahrt auf der internationalen Donau als Wasserstraße bringt. Dazu gab es auch Gegenwind von der regionalen Bevölkerung, von denen 80% gegen die Gründung eines Nationalparks waren. Den ersten Schritt machte schließlich die Umweltschutzorganisation „WWF“, die 1989/90 ein Gebiet in der Regelsbrunner Au kaufte und somit schützte. Kurz darauf wurde ein Planungsvertrag zur Vorbereitung eines Nationalparks zwischen der Republik Österreich und den Bundesländern Wien und Niederösterreich unterzeichnet. Bis 1995 wurden verschiedene Konzepte diskutiert und wissenschaftliche Studien durchgeführt, wodurch neue Erkenntnisse, wie z.B. zum Fischartenreichtum, gewonnen wurden. Der Endbericht zum Planungsvertrag empfahl schließlich die Gründung eines Nationalparks und lange zwölf Jahre nach der Besetzung der Stopfenreuther Au im Jahr 1984 wurde schlussendlich am 27. Oktober 1996 der Vertrag zur Errichtung des Nationalpark Donau-Auen unterzeichnet. Ein Jahr später wurden die Donau-Auen offiziell von der International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN) als Nationalpark der IUCN-Kategorie II anerkannt. Seit 2005 haben die Donau-Auen mit dem „schlossOrth Nationalpark-Zentrum“ ein für die Besucher sichtbares Zentrum, von dem aus der Nationalpark verwaltet wird und Umweltbildung stattfindet (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a: 11ff). Darüber hinaus ist der Nationalpark ein Teil des Natura 2000 Netzwerks und wurde 2007 anteilsmäßig und seit 2011 komplett zum Europaschutzgebiet erklärt (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2019: 8). Seit 2007 nimmt der Nationalpark auch eine führende Rolle beim Ausbau eines internationalen Netzwerks von Donauschutzgebieten ein, was mit Hilfe von EU-Förderprogrammen im Jahr 2014 zur Gründung des Vereins „DANUBEPARKS“ führte. Diese aus derzeit 19 Donauschutzgebieten in neun Ländern bestehende Kooperation ist für den Erhalt der Ökosysteme an der europäischen Donau und für die Erreichung der europäischen Naturschutzziele unerlässlich (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022b: 59ff; DANUBEPARKS, 2023).

3.2.2 Aufbau

Der Nationalpark Donau-Auen, unter der Verwaltung der Nationalpark Donau-Auen GmbH, einer Gesellschaft, die sich zu 50% aus Bund und jeweils 25% der Länder Niederösterreich und Wien zusammensetzt, ist ein rund 40 km langes und bis zu 3km breites Gebiet zwischen den beiden Großstädten Wien und Bratislava (vgl. Abb. 21).

Die 96km² große Fläche verläuft beidseitig der Donau von der Oberen Lobau im 22. Bezirk in Wien, bis zur Mündung der March in die Donau an der niederösterreichisch-slowakischen Grenze (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a: 11ff). Quer durch den Nationalpark verläuft nördlich der Donau der ca. 60km lange Marchfeldschutzdamm, der im westlichen Bereich einen Abstand zur Donau von nur 350m aufweist und diesen nach Osten auf bis zu 2,2km ausdehnt. Südlich der Donau werden die Auen durch eine bis zu 40m hohe Geländekante auf natürliche Weise begrenzt. Die Auen zwischen dem Marchfeldschutzdamm und der Geländekante sind von der Donau durch eine befestigte Uferkante bis zu HSW getrennt. Bei Hochwassern tritt die Donau über die Uferkante, weshalb in diesen Gebieten noch auentypische hydrologische Bedingungen vorkommen. Dagegen werden die Augebiete hinter dem Marchfeldschutzdamm auch bei Hochwassern nicht mehr überflutet, weshalb die fluviale Dynamik weitestgehend verloren ist. Als Folge finden auch Grundwasserschwankungen nur noch in abgeschwächter Form statt (Manzano, 2000: 230; Schön, 1999: 251).

Diese, von der Abflussdynamik der Donau getrennten Augebiete, machen rund 40% der Nationalparkfläche aus, wovon 26% in der Lobau liegen. Von der übrigen Fläche liegen 39% auf der nördlichen Donauseite und 21% südlich der Donau (vgl. Abb 21).



Abb. 21: Offizielle Übersichtskarte des Nationalpark Donau-Auen
(Design & Grafik: www.projektblatt.at/Angela Batik;
Download: https://www.donauauen.at/ueber-uns/downloads/karten)

3.2.3 Lebensräume im Nationalparkgebiet

Die Lebensräume der Donau-Auen sind sehr vielfältig und setzen sich zu 20% aus Gewässerflächen und zu 80% aus Landflächen zusammen, die wiederum in Auwaldflächen (65%) und Offenflächen (15%) unterteilt werden können (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a: 16).

Die Gewässerflächen sind hauptsächlich vor der großen Donauregulierung, durch die flussmorphologischen Prozesse der Donau entstanden und setzen sich aus ehemaligen Seitenarmen und Altarmen zusammen (vgl. Kapitel 3.1; Abb. 22). Bei hohen Wasserständen bilden sie ein Netzwerk, das die Auen mit der Donau verbindet und somit die Grundlage für die landschaftsbildenden Prozesse der Au darstellt (vgl. Kapitel 2.4; Meyer, 2017: 40; Schön, 1999: 251).

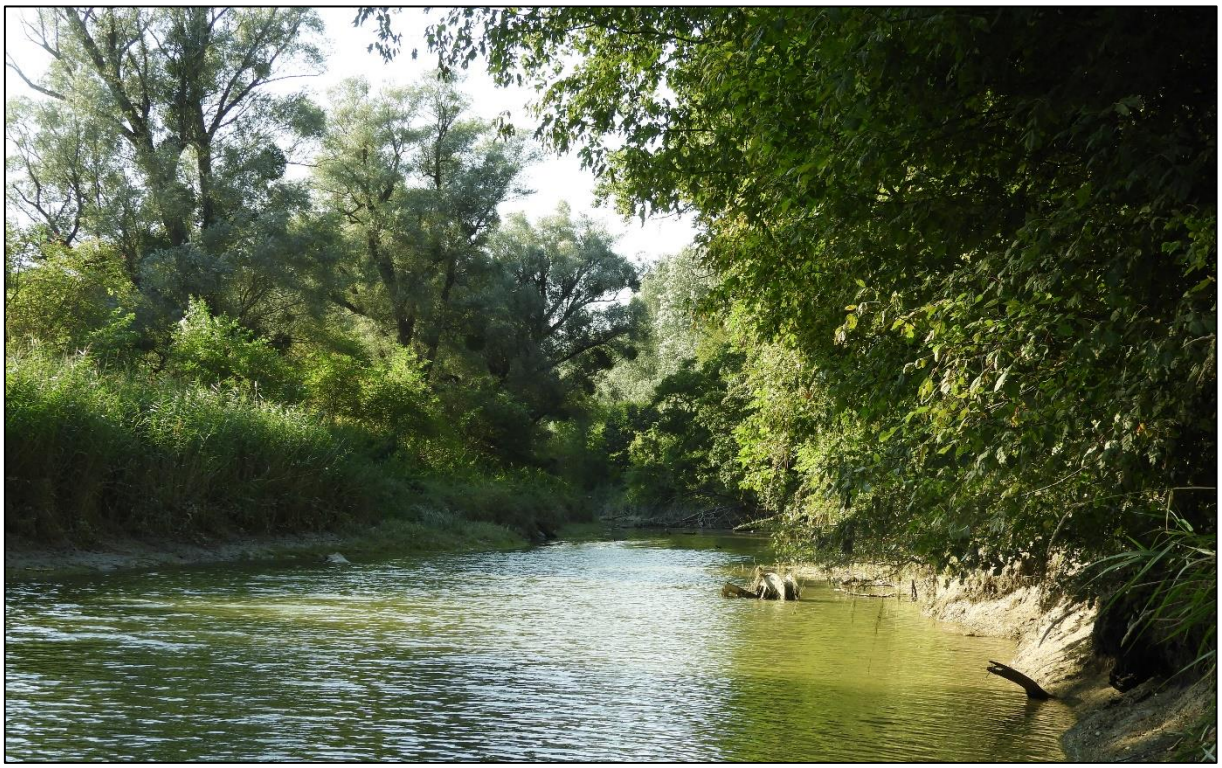


Abb. 22: „Kleine Binn“, Seitengewässer im Nationalpark Donau-Auen (Eigene Darstellung, 2023)

Die Auwälder setzen sich aus den verschiedenen auentypischen Sukzessionsstadien zusammen (vgl. Abb. 23). Für die Donau-Auen bei Wien läuft die Sukzession aufgrund des verzweigten und mäandrierenden Mischtyps der Donau und dem komplexen Abflussregime, mit einem pluvio-nival bedingten Abflussmaximum in den Frühlingsmonaten und einen möglichen zweiten pluvialen Abflussmaxima im Sommer oder Frühwinter in der Regel in drei Sukzessionsstadien ab (vgl. Kapitel 2.2; Jungwirth et al., 2014: 66; Mader et al., 1996: 72f).

Nach Margl (1973: 19ff) lassen sich für diese Stadien charakteristische Standorte in den Donau-Auen bei Wien beschreiben, die sich vor allem durch die am Boden abgelagerten

Sedimente und den darauf typisch wachsenden Vegetationsgesellschaften unterscheiden lassen:

- Im Pionierstadium lagern sich die größtenteils durch Hochwasser transportierten Sedimente in Form von Schotter ab. Dieser wird aufgrund seiner groben Zwischenräume vom Wasser gut durchspült, womit ein schneller Ausgleich der Wasserspiegellagen vorherrscht. Daher wird er vor allem von Pflanzen besiedelt, die bei diesen extremen Standortbedingungen überleben können und für die zugleich die Schotterschicht bis zum Grundwasser durchwurzelbar ist. Hierbei werden die Standorte der Feuchten Weidenau, Schwarzpappelau und Frischen Weidenau unterschieden. Typische Pflanzenarten sind die Silberweide, Schwarzpappel, Filzweide, Weißdorn & Kanadapappel.
- Der Übergang vom Pionierstadium zum Folgestadium der Weichen Au tritt durch Veränderungen am Standort ein, indem sich durch weitere Auflandungen die Wassereinflüsse des Flusses reduzieren. Dazu bildet sich eine Humusschicht, wodurch Vegetationsarten einwandern können, die auf dem rohen Schotter nicht aufkeimen können. Mit dem fortschreitenden Rückgang der Silberweiden übernehmen zunehmend Weißpappeln, Grauerlen und Traubenkirschen den Standort und bilden dabei je nach Höhe und Bodenart die Standorte der Feuchten –, Frischen – oder Trockenen Pappelau. Typische Pflanzenarten sind Rohrglanzgras, Auen-Brombeere, Schilf & Schwarzpappel.
- Das Endstadium grenzt sich durch die Vegetationsgesellschaften der Harten Au vom vorherigen Folgestadium der Weichen Au ab. In der Harten Au hat sich über die Zeit eine Aulehmschicht abgelagert, wodurch das ungleiche Relief der früheren Pappelau verebnet wurde. Trotzdem liegt die Harte Au nicht unbedingt höher als die Gebiete der Weichen Au. Jedoch ist die Entfernung zum Fließgewässer meist größer, wodurch die Harte Au seltener überflutet wird. Dies wirkt sich auch auf die vom Fluss verursachten Grundwasserschwankungen aus, die in der Harten Au stark abgedämpft sind und mit zunehmender Entfernung stärker von der Witterung abhängen. Diese Standortfaktoren führen zusammen mit den längeren Besiedlungszeiträumen für die Vegetations-gesellschaften in der Harten Au zu einer Vielzahl an Baumarten, wie z.B. Stieleiche, Feldulme, Haselstrauch, Edelesche, Feldahorn, Wilde Weinrebe. Die Harte Au lässt sich in die Standorte der Feuchten Harten Au, Frischen Harten Au, Trockenen Harten Au und der Frischen Lindenau unterscheiden.

Neben diesen Sukzessionstadien mit charakteristischen Vegetationsgesellschaften, die aufgrund des mitteleuropäischen Klimas hauptsächlich zur Bildung eines Auwalds führen, gibt es in der Flussaue auch Sonderstandorte, auf denen sich kein Auwald bilden kann (Margl, 1973: 24f).

- In Aubereichen unterhalb des mittleren Flusswasserstands bilden sich Vegetationsgesellschaften aus Wasser- und Halblandpflanzen. Bei diesen Standorten handelt es sich zumeist um seichtere Stellen des ehemaligen Flussbetts, in denen sich das Wasser zu Seen ansammelt. Dabei bilden sich die Vegetationsgesellschaften auf den Wasserflächen oder den zumindest über das Sommerhalbjahr unter Wasser stehenden Uferbereichen. Typische Vegetationsarten sind zum Beispiel die Gewöhnliche Seerose, Schilf oder die Blütensegge (Margl, 1973: 43ff).
- In Aubereichen mit höher gelegenen Schotterflächen bilden sich steppenähnliche Flächen, die als Heißländen oder Brenne bekannt sind. Die Heißländen grenzen sich vom umliegenden Auwald deutlich ab und bilden durch ihren sonnenexponierten Standort ein besonders warmes Mikroklima aus. Durch das im Schotter schnell versickernde Wasser verfügen Heißländen zusätzlich über eine schlechte Wasserverfügbarkeit, weshalb sie vor allem von trockenheitstoleranter Vegetation, wie Trockenrasen, Dorngebüsch und verschiedenen Orchideenarten besiedelt werden (Lazowski, 1997: 226; Meyer, 2017: 77).



Abb. 23: Auwald im Nationalpark Donau-Auen (Eigene Darstellung, 2023)

Die Offenflächen setzen sich aus den natürlich entstandenen Heißländen und den früher anthropogen genutzten Wiesen und Äckern zusammen. Da sich auf diesen Flächen eine schützenswerte Pflanzen- und Tiergesellschaft etabliert, von denen rund 100 Arten als gefährdet gelten, werden die Flächen durch Managementmaßnahmen wie die Mahd erhalten (vgl. Abb. 24; Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022b: 11; Pfundner et al., 2012: 11).



Abb. 24: Offenflächen im Nationalpark Donau-Auen, Links: anthropogene Wiese, Rechts: Heißlände (Eigene Darstellung, 2023; Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2023)

Eine besondere anthropogene Offenfläche stellt der künstlich geschaffene Lebensraum des Marchfeldschutzdamm dar. In diesem sehr trockenen Lebensraum hat sich eine artenreiche Flora mit über 400 Arten entwickelt (vgl. Abb. 25; Wesner, 2006: 4). Dazu bieten die Offenflächen der vom Aussterben bedrohten Europäischen Sumpfschildkröte ideale Bedingungen für ihre Nistplätze, weshalb für diese Flächen besondere Management-maßnahmen erforderlich sind (Rössler, 2000: 171ff).

Einen weiteren besonderen Lebensraum findet man an der südlichen Geländekante des Nationalparks. Auf diesem alten Prallhang der Donau hat sich ein außergewöhnlicher Hangwald entwickelt, der aufgrund der Nordausrichtung über ein besonders feuchtes und kühles Mikroklima verfügt. In dem sonst eher warmen und trockenen Klima Ostösterreichs konnten sich so untypische Baumarten und der tiefste Buchenwald Österreichs entwickeln (Herzog & Zukrigl, 1999).



Abb. 25: Marchfeldschutzdamm (Eigene Darstellung, 2023)

In den Donau-Auen stellen die Pionierstandorte den flächenmäßig kleinsten Anteil dar und sind vor allem an den Inseln und Grabenauflandungen zu finden. Die jungen Standorte der Weichen Au nehmen die größten Flächenanteile der Auwälder südlich des Marchfeldschutzdamm ein (Margl, 1973: 26). Vegetationskartierungen zeigen hier jedoch die Verschiebung von Pflanzenarten der Weichen Au hin zu denen der Harten Au, die ansonsten größtenteils in den nordwestlichen Donau-Auen, der Oberen Lobau, anzutreffen sind (Eckmüllner, 2012: 5f).



Abb. 26: Nationalpark Donau-Auen zwischen Kulturlandschaft; Landsat 8 (USGS Earth Explorer, 2023: Landsat 8)

Die verschiedenen Lebensräume der Donau-Auen beheimaten eine Vielzahl an Tier- und Pflanzenarten. Dabei geht man von mehr als 800 Arten höherer Pflanzen und mindestens 5.000 Tierarten aus, darunter 33 Säugetier-, acht Reptilien- und 13 Amphibienarten. Besonders die Zahl der Brutvogel- und Fischarten ist beachtlich. Mit 67 Fischarten beheimatet der Nationalpark rund 74% aller Arten Österreichs und mit 109 Brutvogelarten auf rund 100km² ergibt sich eine Artendichte, wie sie in Mitteleuropa sonst nur auf einer Fläche von 800 km² erreicht wird (Schön, 1999: 252; Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2023a). Der Nationalpark stellt dabei eine Art grüne Insel zu den umliegenden monotonen Agrarflächen dar und bietet für Zugvögel einen wichtigen Rastplatz, eine Nahrungsquelle und durch die verschiedenen Lebensräume viele unterschiedliche Nistplätze (vgl. Abb. 26).

Einer der bekanntesten ist der Seeadler, der seit 2005 wieder dauerhaft im Nationalpark vertreten ist und inzwischen über sechs Brutpaare verfügt. Ein anderer permanenter Auenbewohner ist der Eisvogel, der auf die erodierten steilen Uferkanten angewiesen ist, in

denen er seine Bruthöhle gräbt. Der Eisvogel ist dabei auch ein besonders guter Indikator für den ökologischen Zustand der Donau-Auen. Denn die steilen Uferkanten und das Vorhandensein von genügend vielen kleinen Fischen als Nahrung sind beides Zeichen einer funktionierenden naturnahen fluvialen Dynamik (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a: 80; Schön, 1999: 251f). Wie der Eisvogel sind die meisten Auenbewohner auf spezielle Standorte angepasst. Allein der von den Abflussimpulsen (Flow Pulses) betroffene Bereich, von den vegetationsfreien Schotterflächen bis zu den niedrigeren Gebieten der Weichen Au, beheimatet viele spezialisierte Arten, die nur dort überleben können. So benötigt der Flussregenpfeifer stets vegetationslose neue Schotterflächen, in denen er seine Eier ablegen kann. Ein weiterer Schottervogel, der Flussuferläufer, hat sich an die nächste Nische angepasst und ist auf den Schotterflächen mit ersten Vegetationssprösslingen zu finden. Die Flussufer-Riesenwolfspinne lebt wiederum in den Hohlräumen zwischen dem Schotter knapp über dem Wasserstand. Wie sie profitiert auch der stark gefährdete Laufkäfer von den extremen Bedingungen im Uferbereich, wodurch weniger Konkurrenz als im angrenzenden Auwald vorhanden ist (vgl. Abb. 27; Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a).
Die Schotterflächen werden auch von vielen Vegetationsarten zur Ansiedlung benötigt. Die im Nationalpark selten gewordene Schwarzpappel ist auf den grobkörnigen, feuchten und gut belüfteten Kies zum Auskeimen ihrer Samen angewiesen. Dabei wachsen ihre Wurzeln bis zu einem Zentimeter pro Tag, wodurch sie in der Lage ist dem, nach einem Hochwasser sinkenden, Wasserstand einfach nachzuwachsen. Auch der Zwerg-Rohrkolben benötigt als Pionierart die durch die Dynamik entstandenen Rohböden. Er kann jedoch nur in einer sehr schmalen ökologischen Nische überleben, da er eine sehr konkurrenzschwache Art ist und eine ganz bestimmte Gewässerdynamik zum Überleben benötigt (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a).

Dies sind nur wenige Beispiele der Flora und Fauna des Nationalparks Donau-Auen, jedoch zeigen besonders diese spezialisierten Arten, wie spezifische die Arten angepasst sind und wie sensibel sie auf die Auswirkungen der flussbaulichen Regulierungen reagieren. Durch die Uferbefestigungen der „großen Donauregulierung“ ging ein Großteil der Uferhabitate, wie die Schotterflächen, verloren was direkte Auswirkungen auf die Flora und Fauna hatte (vgl. Kapitel 3.1):
Die vor 150 Jahren weit verbreitete Flussufer-Riesenwolfspinne ist heute an der Donau kaum noch zu finden (vgl. Abb. 27). Der Schwarzpappel ging mit dem Rückgang der Schotterflächen auch ihr Auskeimstandort verloren und der Zwerg-Rohrkolben kann, aufgrund zu wenig geeigneter Standorte, bis heute keine eigenständige Population im Nationalpark etablieren. Auch der Donau-Kammmolch (vgl. Abb. 27), der in Autümpeln lebt, die von Verlandung bedroht sind oder der Europäische Hundsfisch, der in Österreich bereits als ausgestorben galt und nur noch in einem Gewässer am Aurand vorkommt, sind von einer Revitalisierung der

Gewässerdynamik abhängig (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a).

Die im Jahr 2011 an einem revitalisierten Flussabschnitt der Donau-Auen wiederentdeckte Flussufer-Riesenwolfspinne, die an den dynamischen Altarmen im Bereich Regelsbrunn höchste Brutdichte an Eisvögeln in Mitteleuropa, die Rückkehr des Seeadlers und auch der erfolgreiche Schutz der Sumpfschildkröte, die inzwischen wieder mehr als 2000 Exemplare aufweist, sind positive Beispiel für eine noch vorhandene fluviale Dynamik und die Chance der Arterhaltung durch eine Wiedergewinnung auentypischer Prozesse durch Renaturierungsprojekte (vgl. Abb. 27; Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a).



Eisvogel
(Alcedo atthis)



Seeadler
(Haliaeetus albicilla)



Europäische Sumpfschildkröte
(Emys orbicularis)



Flussufer-Riesenwolfspinne
(Arctosa cinerea)



Lederlaufkäfer
(Carabus coriaceus)



Donau-Kammmolch
(Triturus dobrogicus)

Abb. 27: Fauna des Nationalparks (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a)

3.2.4 Ziele der Nationalpark Verwaltung

Das Ziel der Nationalpark Donau-Auen GmbH ist es einen Nationalpark der IUCN-Kategorie II langfristig zu sichern. Die Aufgaben und Ziele sind durch das Nationalparkgesetz Artikel 15a B-VG festgelegt. Der Bund und die Länder haben sich dabei verpflichtet, die Unversehrtheit der Ökosysteme zu bewahren und die repräsentativen Landschaftstypen sowie deren Flora

und Fauna für künftige Generationen zu erhalten. Wirtschaftliche Nutzungen, die dem entgegenstehen werden ausgeschlossen, wohingegen Erholung, Forschung und Bildung auf umweltverträgliche Weise gefördert werden. Das Grundwasservorkommen, als wichtige Lebensgrundlage der Lebensräume der Donau-Auen muss erhalten bleiben. Der Schutz des Nationalparks wird dabei durch Informationsvermittlung, Bewusstseinsbildung und umweltverträgliche, konsequente Regeln gewährleistet (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a: 21).

Als Leitbild hat sich die Nationalpark Verwaltung vorgenommen dem Zustand der Donau-Auen vor der „großen Donauregulierung“ im Jahr 1850 wieder bestmöglich anzunähern (vgl. Kapitel 3.1; Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a: 39). Dafür wurde der Nationalpark in drei Zonen aufgeteilt, für die jeweils unterschiedliche Managementmaßnahmen vorgesehen sind (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a: 21):

- In der Naturzone darf keine wirtschaftliche Nutzung oder sonstige Eingriffe in die Natur, den Naturhaushalt oder das Landschaftsbild stattfinden. Eine Ausnahme stellen Renaturierungsmaßnahmen dar, die als vorübergehender Eingriff langfristig die natürliche Entwicklung fördern.
- In der Naturzone mit Managementmaßnahmen dürfen dagegen Naturschutzmaßnahmen erfolgen, um einen Lebensraum für seine Flora und Fauna zu erhalten. Darunter fällt zum Beispiel die Mahd von anthropogenen Wiesenflächen, welche eine hohe Artenvielfalt aufweist.
- In die Außenzone fallen bestimmte Sonderbereiche, wie der Marchfeldschutzdamm oder die Schifffahrtsrinne und Tourismus-, Fremdenverkehrs- und Verwaltungsbereiche.

Für die Einhaltung der gesetzlichen Ziele, aber auch zur langfristigen Annäherung des Leitbilds, wird jeweils für einen Zeitraum von zehn Jahren ein bundesländerübergreifender Managementplan mit den strategischen Zielen und Aufgaben vereinbart. Die aktuelle Managementperiode begann im Jahr 2019 und endet 2028. In dem 96-seitigen Bericht sind die strategischen Ziele für die Managementbereiche Naturraum, BesucherInnen & Region, Forschung & Monitoring und Kooperation festgelegt (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2019).

Zusätzlich werden in gewissen Abständen Leistungsberichte veröffentlicht, in denen der Zustand des Nationalparks und seiner Flora und Fauna, sowie die Maßnahmen der vergangenen Jahre vorgestellt werden (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022b). Die im Folgenden beschriebenen strategischen Ziele sind dabei von besonderer Bedeutung (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a: 40):

- Renaturierung:
  Für eine Verbesserung des ökologischen Zustands der Auen ist eine bessere Vernetzung mit der Donau unerlässlich. Hierfür sind neue Wasserbauprojekte, wie der Rückbau harter Uferstrukturen und eine erneute Anbindung von getrennten Seitenarmen erforderlich. Zudem ist eine weitere Sohleintiefung der Donau zu verhindern.

- Reduktion menschlicher Eingriffe und Nutzungen:
  Der Prozessschutz soll in den Naturzonen im Vordergrund stehen. Das bedeutet, dass in die natürlichen Prozesse und Abläufe in Ökosystemen nicht eingegriffen werden soll (NP Donau-Auen GmbH, 2022a: 106).
  Zeitlich begrenzte Waldumwandlungsmaßnahmen der früher forstwirtschaftlich genutzten Waldflächen zu standorttypisch und heimischen Baumarten sollen zukünftige Eingriffe überflüssig machen.

- Aktive Erhaltung spezieller Lebensräume und Arten:
  Besondere Lebensräume wie Auwiesen, Alleen, Heißländen, Trockenbiotope am Marchfeldschutzdamm und überschwemmungsfreie Stillgewässer sollen als Kulturlandschaftselemente aktiv erhalten bleiben. Für die Erhaltung und Wiederansiedelung ausgewählter Tier- und Pflanzenarten sind spezielle Schutzprogramme durchzuführen.

- Bildungs- und Besucherprogramm:
  Als Nationalpark der IUCN-Kategorie II müssen Forschungs-, Bildungs- und Erholungsangebote vorhanden sein. Hierfür gibt es Besucherzentren, Informationstafeln und Wanderwege, die fortlaufend gepflegt werden. Zusätzlich gibt es Exkursions- und Bildungsangebote, sowie eine kontinuierliche Öffentlichkeitsarbeit. Das Ziel der Bildungsarbeit ist es, langfristig das Verständnis für den Wert von Naturschutz in der Bevölkerung zu steigern.

- Forschung und Monitoring:
  Eine ständige Forschung und Monitoring sind die Grundlage für das Management im Nationalpark. Nur wenn genügend Wissen über den momentanen Zustand und potenzielle Gefahren vorhanden ist, können geeignete Maßnahmen erfolgen.

- Beitrag zur regionalen Entwicklung:
  Das Angebot oder die Partnerschaft bei lokalen Aktivitäten hilft bei der regionalen Entwicklung und leistet einen Beitrag, um die Akzeptanz bei der regionalen Bevölkerung zu erhöhen.

- Erhaltung der donauweiten Artenvielfalt durch gemeinsame Schutzstrategien und verbesserte Kooperation der Schutzgebiete:
  Der Nationalpark stellt nur einen kleinen Teil des gesamten Donauökosystems dar. Länderübergreifende Schutz- und Entwicklungsstrategien sind daher notwendig, um neue Großschutzgebiete an der europäischen Donau zu schaffen. Die DANUBEPARKS oder das INTERREG Alpen Karpaten Fluss Korridor Projekt sind erste Schritte hierfür.

3.2.5 Renaturierungsmaßnahmen

Die fluviale Dynamik der Donau-Auen ist die Grundlage für den Erhalt von auentypischen Bedingungen und deren Lebensräume (vgl. Kapitel 2.4). Da die Auen ohne diese Dynamik langfristig in ihrer Habitatzusammensetzung verarmen, ist die dauerhafte Erhaltung des frei fließenden Donauabschnitts im Nationalparkgebiet ein übergeordnetes Ziel (vgl. Kapitel 3.1). Dabei ist es wichtig, dass die heute nur noch spärlich zu sehenden frühen Sukzessionsstadien wieder mehr Flächenanteile bekommen und somit der Erhalt aller Lebensräume und deren Flora und Fauna gesichert wird. Hierfür ist es notwendig, die weitere Eintiefung der Donauflusssohle und die damit sinkenden Mittel- und Niederwasserpegel zu verhindern bzw. die Pegelstände unter Aufrechterhaltung der natürlichen Abflussschwankungen zu steigern. Zusätzlich müssen die Uferbefestigungen abgebaut werden, um natürliche Uferstrukturen und Seitenerosion zu ermöglichen, sowie ehemalige Seitenarme wieder an den Hauptstrom angebunden werden. Nur so lässt sich die fluviale Dynamik in der Au wieder erhöhen, wodurch erneut Umlagerungsprozesse stattfinden können und neue Flächen mit frühen Sukzessionsstadien entstehen (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a: 43).
Hierfür werden von der Nationalpark Verwaltung, zusammen mit der für den Donauraum zuständigen Wasserstraßenverwaltung viadonau verschiedene Renaturierungsmaßnahmen durchgeführt (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2019: 14):

- Das erste große Renaturierungsprojekt an der österreichischen Donau verlief direkt nach der Nationalparkgründung, in den Jahren 1996 bis 1998 und wurde von vielen Studien begleitet (Hein et al., 1999; Tockner et al., 1999a; Tockner et al., 1998; Tockner & Schiemer, 1997). In diesem Gewässervernetzungsprojekt wurde der durch die Donauregulierung abgetrennte Seitenarm Haslau-Regelsbrunn, durch drei Durchlässe knapp über Niederwasser wieder mit der Donau verbunden. Die Durchströmungstage des Nebenarms konnten damit von 20 auf über 200 Tage pro Jahr gesteigert werden.
- Kurz darauf wurden weitere Gewässervernetzungen stromauf von Orth an der Donau (2001-2002) und östlich von Schönau (2003-2004) durchgeführt (vgl. Kapitel 3.3). Dabei wurden in den Orther Auen die ehemaligen Seitenarme der „Großen und Kleinen

Binn“ durch eine Entfernung der harten Uferverbauung wieder angebunden und bei Schönau das „Kühwörther Wasser“ durch eine Absenkung der Ufersicherung an zwei Stellen wieder mit der Donau verbunden.

- Des Weiteren wurde bei Thurnhaufen in den Jahren 2002 bis 2006 das Ufer auf einer Länge von 2km und in den darauffolgenden Jahren bei Witzelsdorf auf einer Länge von 1,5km zurückgebaut. Zusätzlich wurden ökologisch optimierte Buhnenformen erprobt und Leitwerke abgesenkt.

Die Renaturierungsmaßnahmen zeigen eine deutliche Verbesserung in der Gewässerdynamik und die erhoffte Naturverjüngung in den renaturierten Flussabschnitten, mit positiven Effekten auf die Artengemeinschaft und Wasserqualität (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a: 45f).

Zeitgleich wurde das „Flussbauliche Gesamtprojekt“ auf den Weg gebracht, bei dem in einem Leitungsausschuss Vertreter aus der Wissenschaft, des Nationalsparks, der Schifffahrt sowie der Raumplanung zusammen acht Entwurfsgrundsätze festlegten, mit denen die verschiedenen Interessensbereiche abgedeckt wurden. Im Jahr 2006 wurde das „Flussbauliche Gesamtprojekt“ zur Umweltverträglichkeitsprüfung vorgelegt (Klasz et al., 2009: 7ff). Zeitgleich wurden erste Pilotprojekte umgesetzt, deren Erkenntnisse in das Genehmigungsverfahren einfließen sollten. Die Ergebnisse aus sechs Pilotprojekten führten jedoch dazu, dass man das „Flussbauliche Gesamtprojekt“ verwarf und ein neues Konzept mit den weiterentwickelten wasserbaulichen Maßnahmen entwarf. In diesem „Maßnahmekatalog für die Donau östlich von Wien“ werden die Erhaltungsziele statt eines Großprojekts nun durch mehrere wasserbauliche Optimierungsprojekte und Erhaltungsmaßnahmen sichergestellt (Tögel, 2017). Das derzeit jüngste abgeschlossene Projekt ist die Gewässervernetzung des Spittelauer Arms (2019-2020), bei dem die Einströmöffnung des Seitenarms tiefergelegt wurde, damit das Wasser ganzjährig einströmen kann. Ein weiteres Projekt, das bereits in Planung ist, stellt die Dotation für die sog. Panozzlacke in der Lobau dar (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a: 45f).

Die Lobau, die bereits seit 1978 ein Naturschutzgebiet ist, befindet sich im westlichen Nationalparkbereich und ist durch den Marchfeldschutzdamm fast komplett von der fluvialen Dynamik der Donau abgeschnitten (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a; Schön, 1999: 251). Nur durch die abgeschwächten Grundwasserschwankungen und einer Öffnung im Marchfeldschutzdamm am süd-östlichen Ende der Lobau finden noch Austauschprozesse statt. Durch die räumliche Abtrennung zur Donau zeigt sich in der Lobau eine sehr viel stärkere Verlandung und Austrocknung der Augebiete als südlich des Damms (Schiemer, 1995). Dieser Trend ist dabei inzwischen so weit vorangeschritten, dass eine Rückkehr zu auentypischen Verhältnissen einen Verlust der momentan etablierten Flora und Fauna mit sich ziehen würde. Die Herausforderung ist daher, den Trend zu stoppen und den derzeitigen Zustand zu verbessern und zugleich die entstandenen Ökosysteme zu erhalten (Funk et al., 2013;

Reckendorfer et al., 2013b; Schiemer, 1999). Hierfür soll über ein unterirdisches Rohr eine Verbindung von der Neuen Donau zur Panozzlacke hergestellt werden, worüber in kontrollierten Mengen Wasser in die Gewässer der oberen Lobau einströmen kann. Das Ziel ist es, damit wieder größere Wasserflächen mit einer verbesserten Durchgängigkeit herzustellen und zugleich stärkere Schwankungen der Wasserstände zu erreichen. Dabei soll die hydrochemische Differenzierung der nährstoffarmen Oberen Lobau und der nährstoffreichen Unteren Lobau erhalten bleiben (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a: 46).

Das derzeit mitunter wichtigste Projekt scheint jedoch das Geschiebemanagement der Donau zu sein. Die Donau bei Wien zeigte bei verschiedenen Messungen eine Transportkapazität von rund 350.000m³ Geschiebematerial pro Jahr (Habersack, 2014: 247f; Klasz et al., 2009: 3). Jedoch gibt es seit der Errichtung der Kraftwerkskette kaum noch einen Geschiebeeintrag in die österreichische Donau, wodurch der Donau Material fehlt. Das nun fehlende Material entnimmt sich die Donau aus ihrer eigenen Flusssohle, womit sie sich als Folge tiefer in ihr Flussbett gräbt (vgl. Kapitel 3.1; Habersack et al., 2021: 34; Jungwirth et al., 2014: 244). Für den größten Teil des Geschiebedefizits im Bereich des Nationalparks ist das direkt stromauf errichtete Kraftwerk Freudenau verantwortlich. Berechnungen deuten darauf hin, dass rund 270.000m³ Geschiebe vom Kraftwerk Freudenau am Transport gehindert werden. Daher wurden vom Kraftwerksbetreiber Verbund seit 1996 jährlich durchschnittlich 185.000m³ Geschiebe flussab des Kraftwerks eingebracht, wobei die genaue Menge jedes Jahr aus der tatsächlichen Wassermenge ermittelt wurde. Seit 2020 wurde die jährliche Geschiebemenge auf 235.000m³ erhöht. Trotz des Geschiebeeintrags durch den Kraftwerksbetreiber bleibt ein Geschiebedefizit, dem die „via donau“ seit 2009 mit Ausbaggerungen von Kiesmaterial aus der Donau und dem wieder Einbringen bis zu 20km stromaufwärts entgegentritt. Seit 2015 findet dieses offiziell im Rahmen des Geschiebemanagements statt, für das pro Jahr bis zu zwei Millionen Euro zur Verfügung stehen. In den Jahren 2017 und 2021 wurde das Geschiebemanagement zusätzlich mit Baggerungen bei Bad Deutsch-Altenburg und Hainburg erweitert. Da der Donaukies pro Jahr durchschnittlich 3km pro Jahr zurücklegt, stellt das Geschiebemanagement eine Kreislaufwirtschaft dar. Langfristig muss das Geschiebemanagement jedoch mit gröberem Kies angereichert werden, da sich das Geschiebe durch den Abrieb mit jedem Durchlauf verkleinert. Bis man eine bessere Lösung für die Sohleintiefung gefunden hat, ist das Geschiebemanagement eine notwendige Maßnahme, um die weitere Sohleintiefung der Donau und dessen Entkoppelung zu den Donau-Auen zu verhindern. Besonders in Hinblick auf die Gefahr eines Sohldurchschlags, bei dem die Donau die teilweise nur noch ein Meter dünne Kiessohle durchbrechen und so an die darunter liegenden Feinsedimente gelangen könnte, die zu einer viel schnelleren Vertiefung führen würden (Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a: 49ff).

3.3 Projektgebiet

Die Wahl des Projektgebiets für die hydrodynamisch-numerische Modellierung in Kapitel 5 fiel auf die Orther Au, als ein Teilgebiet der Donau-Auen.

Die Orther Au liegt direkt im Zentrum des Nationalparks bei der Gemeinde Orth an der Donau und verläuft linksufrig der Donau von Stromkilometer 1906,5 bis 1902,0 (Reckendorfer, 2000: 7). Das Augebiet grenzt im Westen an den Mannsdorfer Hagel und im Osten an die Eckartsau West. Im Norden wird die Orther Au durch den Marchfeldschutzdamm durchschnitten. Dieser dient als nördliche Projektgrenze, da die Gebiete dahinter vor den Abflussschwankungen abgedämmt sind (vgl. Kapitel 3.2.2). Im Süden stellt die Donau die Projektgrenze dar, wobei die rechtsufrigen Aubereiche Fischa Mündung und Maria Ellend nicht mit in das Projektgebiet aufgenommen wurden (Reckendorfer, 2004c: 89ff). Die Donau verläuft in diesem Bereich zunächst etwas nach Südosten und ab der Gemeinde Maria Ellend nach Nordosten, wodurch sich das Gebiet zwischen der Donau und dem Marchfeldschutzdamm auf bis zu 1,6km ausdehnt. Damit stellt die Orther Au einen rund 5,4km² großen Donau-Auen Abschnitt dar, der bei Hochwassern noch überflutet wird (vgl. Abb. 29).

In dem Gebiet schlängelt sich die „Kleine Binn“, als ehemaliger Donauseitenarm von West nach Ost. In sie mündet der „Rohrhaufenarm“, der im Westen der Orther Auen liegt. Etwas südlich davon liegt die „Große Binn“, die im ehemaligen Donauhauptbett verläuft. Im nordöstlichen Bereich verläuft der „Fadenbach“, der durch eine Straße in zwei Teile getrennt ist, die über einen Durchlass weiterhin miteinander verbunden sind. Der „Fadenbach“ ist über einen Durchlass zu einem Graben mit der „kleinen Binn“ verbunden (vgl. Abb. 28). Zusammen bilden sie mit kleineren Altwässern das Altarmsystem der Orther Auen (vgl. Abb. 29; Reckendorfer, 2000: 7).



Abb. 28: Fadenbach (unten) und Graben zwischen kleiner Binn und Fadenbach (oben) (Eigene Darstellung, 2023)

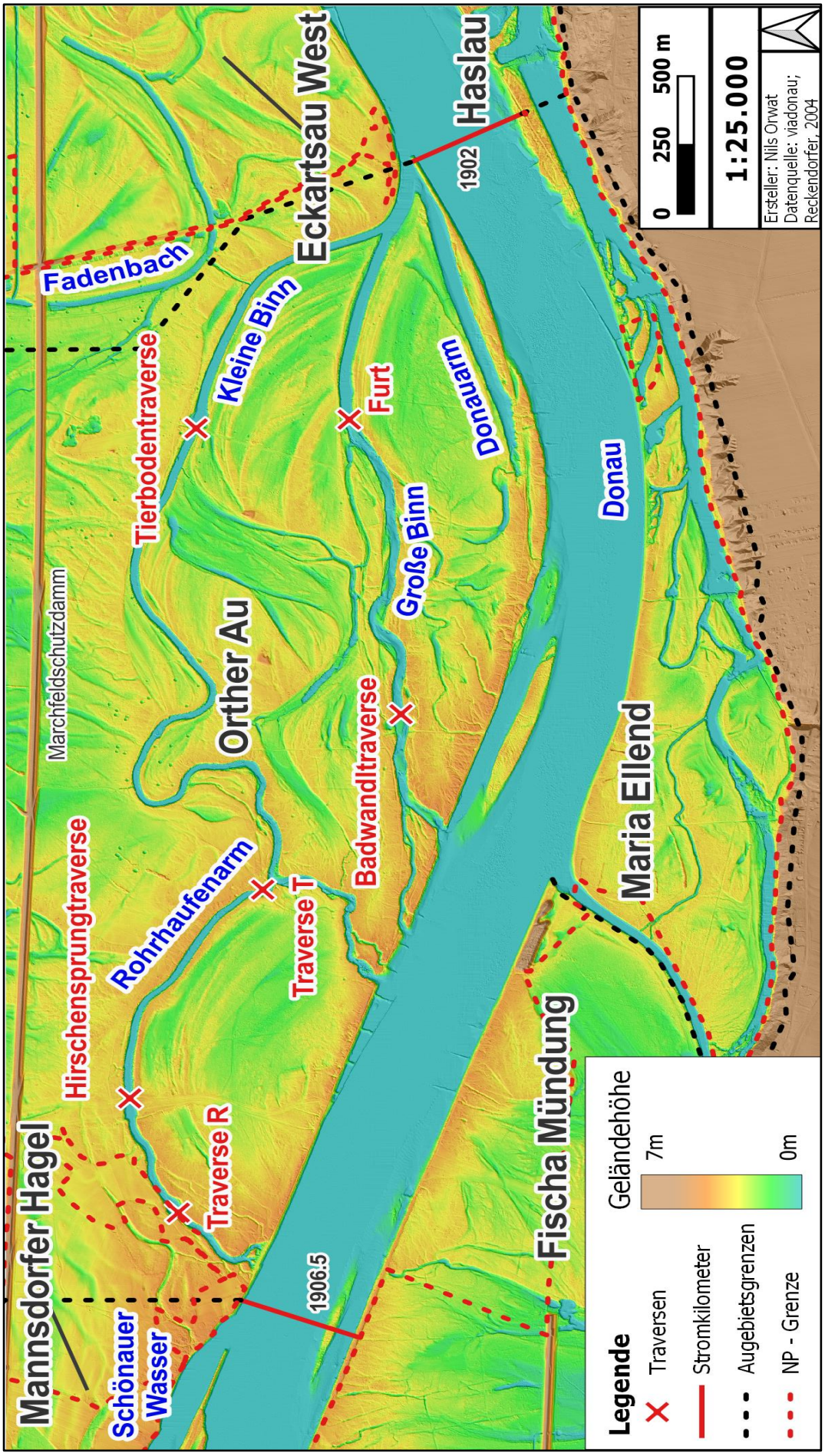


Abb. 29: Übersichtskarte des Projektgebiets (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK))

Mit der Donauregulierung im 19. Jahrhundert wurden diese Gewässer durch die befestigte Uferkante von der Donau abgetrennt und durch den Bau von Traversen in mehrere Becken unterteilt. Damit veränderte sich die Durchströmung dieser Gewässer erheblich. Die „Große Binn“ war zwar über die Altarmmündung noch ganzjährig mit der Donau verbunden, der mittlere Bereich zwischen der Badwandltraverse und der Furt wurde jedoch nur noch an 200 Tagen pro Jahr von der Altarmmündung aus durchströmt (vgl. Abb. 29 & 30). Die gesamte „Große Binn“ wurde im langjährigen Mittel nur noch an 21 Tagen pro Jahr durchflossen. Noch drastischer war die Regulierung für die „Kleine Binn“. Auch diese war über die Altarmmündung bis zur Tierbodentraverse noch ganzjährig mit der Donau verbunden (vgl. Abb. 29 & 30). Der Abschnitt von der Tierbodentraverse bis zur nächsten Traverse war dagegen nur noch an 53 Tagen pro Jahr angebunden. Komplett wurde die „Kleine Binn“ nur noch an 15 Tagen im Jahr durchströmt. Die Donauregulierung führte somit zur Entstehung eines Altarmsystems, welches nur noch bei Wasserständen unmittelbar unter HSW von stromaufwärts durchströmt wurde. Diese reduzierte Durchströmung führte in der Folge zu einer geringeren fluvialen Dynamik und Verlandungsprozessen, wodurch die Gewässerarme keine räumlichen Veränderungen mehr zeigten und Gewässerteile komplett verloren gingen (vgl. Abb. 29; Reckendorfer, 2000: 7ff).



Abb. 30: Altarmmündung des Orther-Altarmsystems in die Donau (Eigene Darstellung, 2023)

Im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten LIFE+ Projekts (LIFE98NAT/A/005422) wurde in den Jahren 2001 bis 2002 eine Gewässervernetzung für die Orther Auen durchgeführt. Das Ziel war es, die Altarme wieder stärker an den Donauhauptstrom anzubinden. Hierfür wurde an drei Einströmbereichen (GV1-GV3) die befestige Uferkante entfernt wird. Zusätzlich wurde die Badwandltraverse komplett entfernt und die Tierbodentraverse mit einem Brückendurchlass ausgestattet (vgl. Abb. 29 & 31). Durch die Maßnahme erhöhte sich die Zahl der Durchströmungstage für beide Gewässer bedeutend, womit diese wieder an 290 Tagen im Jahr durchströmt werden (Hein et al., 2002; Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2022a: 45). Die Gewässervernetzung Orth wurde zudem von mehreren

wissenschaftlichen Studien begleitet, die den Einfluss der Vernetzung auf die Ökologie und Hydrologie thematisieren (Hein et al., 2002; Raab, 2000; Reckendorfer, 2004a, 2004b; Schabuss & Reckendorfer, 2002).



Abb. 31: Tierbodentraverse knapp unter MW (Eigene Darstellung, 2023)

4 Modellauswahl

In diesem Kapitel werden die verschiedenen hydrodynamisch-numerischen Modellsoftwares anhand ausgewählter Kriterien einem theoretischen Vergleich unterzogen (Kapitel 4.1). Anschließend wird die aus diesem Vergleich für die Methodik ausgewählte Software präsentiert (Kapitel 4.2).

4.1 Software

Für Fragestellungen mit Bezug auf das Strömungsverhalten von Wasser wurden in den letzten Jahrzehnten immer häufiger numerische Modelle eingesetzt. Dementsprechend gab es eine zunehmende Entwicklung von Softwarelösungen, mit denen hydrodynamische Prozesse für Fragestellungen im Wasserbau und der Forschung modelliert werden können (Gegenleithner et al., 2020: 279).

Die Auswahl der Software kann für den Anwender oder die Anwenderin eine Schwierigkeit darstellen, da je nach Fragestellung verschiedene Faktoren berücksichtigt werden müssen. Daher sollte vorab klar sein, was für ein Szenario man modellieren möchte und welche physikalischen Prozesse hierfür simuliert werden müssen. Dies bedeutet, die korrekte Auswahl der HN-Modellart für das jeweilige klein- oder großskalige Szenario vorzunehmen und sich den jeweiligen Einschränkungen der Modellarten bewusst zu sein. Zusätzlich stellt auch das von der jeweiligen Software unterschiedlich erforderliche Hintergrundwissen des Anwenders einen Auswahlfaktor dar. So zeigen kommerzielle Softwarelösungen, aufgrund der meist besseren Benutzerfreundlichkeit und einfacheren Bedienbarkeit, sowie durch das Vorgeben von Standardparametern und stabilen numerischen Lösern, eine zunächst steilere Lernkurve. Dagegen zeigen Open-Source-Softwares eine oftmals unzureichende Dokumentation und Support und dadurch längere Einlernphasen. Jedoch sind sie, durch die frei zugänglichen Möglichkeiten in der Modellanpassungen, spezifischer auf die Anforderungen veränderbar und resultieren dadurch in einer höheren Lernkurve. Die Wahl zwischen kommerzieller oder kostenfreier Softwarelösungen ist dabei auch abhängig vom finanziellen Budget (Gegenleithner et al., 2020: 273ff).
Für die Auswahl der Software spielt auch die vorhandene Hardware eine entscheidende Rolle. Diese muss die notwendigen Anforderungen der Software erfüllen und sollte zugleich die für das zu simulierende Szenario notwendige Rechenzeit, in einem für den Anwender akzeptablen Rahmen halten. Aufgrund der in den letzten zwei Jahrzehnten stark gestiegenen Rechnerleistung zeigt sich hierbei ein Trend hin zu immer kürzeren Rechenzeiten, wodurch immer komplexere Simulationsszenarios möglich werden (Oertel & Bung, 2014: 26ff).

Für die Wahl der hydrodynamisch-numerischen Modellsoftware wurden verschiedene in der Fachliteratur zu findende Softwarelösungen ausgewählt (vgl. Chatterjee et al., 2008; Crispino et al., 2014; Gharbi et al., 2016; Huber et al., 2021; Vetsch et al., 2020). Diese werden im Folgenden kurz vorgestellt und mit der anschließenden Tabelle 2 auf die zuvor beschriebenen Faktoren verglichen.

- BASEMENT

  Die kostenfreie Software BASEMENT wird von der „Eidgenössischen Technischen Hochschule“ (ETH) Zürich entwickelt und betrieben und dient der Strömungssimulation von alpinen Flüssen und deren Sedimenttransport. Der Schwerpunkt der Softwareentwicklung liegt in der Schaffung von stabilen numerischen Modellen, einer Flexibilität des Rechennetzes und einer effizienten Berechnungsmethode durch problemabhängige Gleichungen, Modellkopplungen und einer Parallelisierung von Simulation durch die Verwendung mehrerer Computerrechenkerne (Vetsch et al., 2022e: 9f).

- CCHE1D, -2D; -3D

  Die vom “National Center for Computational Hydroscience and Engineering” (NCCHE) an der Universität von Mississippi (USA) entwickelten und nur noch kommerziell erhältlichen Softwarepakete CCHE dienen der Simulation des Strömungsverhalten und dem Sedimenttransport von Flüssen in der natürlichen Umwelt. In Partnerschaft mit dem „United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service” (USDA-ARS) liegt der Schwerpunkt der Softwareentwicklung darin, zukünftige Probleme des Agrarsektors, wie beispielsweise Bodenverlust, Verbesserung der Wasserqualität oder Bewässerungseffizienz, durch Rechenmodelle zu simulieren und Handlungs-empfehlungen für das Wassereinzugsgebietsmanagement zu geben. Hierfür wurden verschiedene Softwaremodule entwickelt, mit denen sich Fragestellungen zu Hoch- und Grundwasserströmungen, Sediment- und Schadstofftransport, Küstenmodelle oder Dammbrüche simulieren lassen (NCCHE, 2023).

- HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System)

  Die kostenfreie Software HEC-RAS wird vom „Hydrological Engineering Center“ der „U.S. Army Corps of Engineers“ entwickelt und betrieben und dient der Strömungssimulation von Flüssen, der Berechnung von Wasseroberflächenprofilen und Sedimenttransporten, sowie der Analyse der Wasserqualität. Die Softwarekomponenten lassen sich dabei über eine gemeinsame geometrische Datendarstellung nutzen, sowie grundlegende GIS-Funktionen über den integrierten „RAS Mapper“ ausführen (Hydrologic Engineering Center, 2023a).

- HydroAS

  Mit der kommerziellen Software HydroAS des deutschen Unternehmens „Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH“ können 2D-Simulationen von Fließgewässern und Oberflächenabflüsse von Niederschlägen simuliert werden. Dabei nutzt HydroAS das Programm SMS des amerikanischen Unternehmens „Aquaveo“ als Nutzeroberfläche zur Bearbeitung des Rechennetzes und der Visualisierung der Ergebnisse. Die Schwerpunkte von HydroAS liegen im Hochwasserschutz, der Gewässerentwicklung und der Vorhersage von Starkregen und städtischen Sturzfluten (Hydrotec, 2023).

- MIKE

  Die kommerzielle Software MIKE wird vom „Danish Hydraulic Institute“ (DHI) betrieben und umfasst Softwarepakete für weitgehend alle Fragestellungen mit Wasserbezug, wie z.B. Küsten und Ozeane, Städte, Grundwasser oder Wassermanagement für Flüsse, Hochwasser oder Sedimenttransport. Mit der breiten und hochwertigen Softwarepaketauswahl sollen komplexe Probleme in den verschiedensten Wasserbereichen auf Grundlage numerischer Modelle gelöst werden und bei der Entscheidungsfindung, sowie Planung unterstützen (MIKE, 2023).

- SOBEK

  Die kommerzielle Software SOBEK wurde vom niederländischen Institut „Deltares“ zusammen mit dem „National Dutch Institute of Inland Water Management and Wastewater Treatment“ RIZA und niederländischen Beratungsunternehmen entwickelt. Die Software umfasst drei Pakete, mit denen Wassermanagement für Fluss-, Stadt- oder Landgebiete betrieben werden kann. Dabei enthält jedes Paket wiederum einzelne Module, mit denen die unterschiedlichsten Situationen simuliert werden können. Aktuell entwickelt Deltares die neue Software „Delft3D FM Suite 1D2D“, die zu gegebener Zeit der Nachfolger von SOBEK sein wird (Deltares, 2018: 1f).

- TELEMAC-MASCARET

  Die Open-Source-Software TELEMAC-MASCARET wird von einem Konsortium, bestehend aus den Organisationen: „Artelia“ (Frankreich), der „Bundesanstalt für Wasserbau“ (Deutschland), „Centre d´Etudes et d´Expertise sur les Risques, l´Environnment, la Mobilité et l´Aménagement“ (Frankreich), „Electricité de France R&D“ (Frankreich) und der „HR Wallinford“ (Großbritannien) betrieben und zusätzlich durch das „Daresbury Laboratory“ (Großbritannien) und das „Centre Européen de Recherche et de

Formation Avancée en Calcul Scientifique“ (Frankreich) wissenschaftlich unterstützt. Mit der Software lassen sich Wasserströmungen an der freien Oberfläche und Sedimenttransporte simulieren, wobei für die unterschiedlichen Einsatzgebiete jeweils einzelne Softwaremodule vorhanden sind. Die Software ist in der Programmiersprache „FORTRAN“ geschrieben und verfügt über weiterführende Skripte zum Vorbereiten der Daten und Ausführen der verschiedenen Module in der Programmiersprache „Python“ (TELEMAC-MASCARET Consortium, 2022: 7ff).

Software	Version	Modellart	Dokumentation	Support	Hardware-Mindestanforderungen	Art	Websites (Stand Mai 2023)
BASEMENT	2.8.2	1D, 2D, 3D	Ja, auf Website	Ja	Prozessor: x64 RAM: 1GB pro Kern	kostenfrei	https://basement.ethz.ch/
CCHE	3.29.9	1D, 2D, 3D	Ja, in Installations-datei	Ja, aber nicht kostenfrei	keine Angabe	kommerziell, Testversion verfügbar	https://www.comphydrotech.com/
HEC-RAS	6.2	1D, 2D	Ja, auf Website	Ja	Prozessor: x64 *(i5 oder höher)* RAM: mind. 8GB	kostenfrei	https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/
HydroAS	5.5	2D	Ja, Lizenz erforderlich	Ja, aber nicht kostenfrei	Prozessor: x64 *(Intel Celeron Dual Core oder AMD Bulldozer FX)* RAM: unbekannt	kommerziell, Bildungslizenz verfügbar	https://www.hydrotec.de/software/hydroas/
MIKE	MIKE FLOOD 2023	1D, 2D, 3D	Ja, auf Website	Ja	Prozessor: x64 (mind. 2,2 GHz) RAM: mind. 4GB	kommerziell, Bildungslizenz verfügbar	https://www.mikepoweredbydhi.com/
SOBEK 2 Suite	2.16.004	1D, 2D	Ja, auf Website	Ja	Prozessor: x32/x64; (mind. 1,5 GHz) RAM: mind. 2GB	kommerziell, Bildungslizenz verfügbar	https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/sobek-suite
TELEMAC-MASCARET	v8p4	1D, 2D, 3D	Ja, auf Website	Ja	keine Angabe	kostenfrei	http://www.opentelemac.org/

Tabelle 2: HN-Modellsoftware-Vergleichstabelle (Eigene Darstellung, 2023; Quellen: siehe Spalte „Websites“)

Für die Auswahl der Software mussten zunächst die für die Modellierung des Projektgebiets bedeutsamen Faktoren definiert werden, sowie die für diese Arbeit vorgegebenen Faktoren, in Bezug auf das Vorwissen für hydrodynamisch-numerische Modellierungen, das Budget und die verfügbare Hardware, berücksichtigt werden.

Für die Simulation des Überflutungsgeschehen im Projektgebiet ist ein zweidimensionales Modell notwendig, da über eindimensionale Querprofile nur ausgewählte Querschnitte des Projektgebiets abgebildet werden könnten und aufgrund der Größe des Projektgebiets ein dreidimensionales Modell zu umfangreich wäre. Da die Donau die treibende Kraft für das Überflutungsgeschehen der Auen darstellt und somit die Anfangsbedingung des HN-Modells vorgibt, muss diese in das Modell integriert werden. Allerdings kann diese auch über ein eindimensionales Modell abgedeckt werden, da das Interesse vor allem den Auen gilt und somit die Größe des Rechennetzes und folglich die Rechenzeit reduziert werden könnte. Als Modellart ist somit ein 2D oder ein gekoppeltes 1D-2D HN-Modell notwendig. Alle vorgestellten Softwares bieten ein zweidimensionales HN-Modell an, wobei mit HydroAS kein 1D-Modell erstellt werden kann. Eine Kopplung von 1D und 2D Modellbereichen ist mit allen anderen Softwares möglich (vgl. Tabelle 2).

Im Rahmen der Bearbeitung dieser wissenschaftlichen Arbeit lag kein Vorwissen zu hydrodynamisch-numerischen Modellen und der Modellierung mit diesen vor. Daher war eine verfügbare ausführliche Dokumentation der Software, mit der ein selbstständiges Erlernen dieser möglich ist, ein notwendiger Auswahlfaktor. Auch die Verfügbarkeit von Tutorials und Testdaten zum Erproben und Erlernen der Software, sowie einem bei auftretenden Problemen unterstützender Support war ein Kriterium, das für die Software sprach. Nach einer ersten Beurteilung wurden diese Kriterien der Benutzerfreundlichkeit von allen Softwares erfüllt, jedoch kann die Dokumentation für die kommerziellen Softwares CCHE und HydroAS erst nach einem Erwerb der Softwarelizenz eingesehen werden. Dies gilt auch für die Inanspruchnahme des Supports, der je nach Softwarepaket in der Lizenz inbegriffen ist oder hinzu gebucht werden muss (vgl. Tabelle 2).

Für die Modellierung sollte, soweit möglich, eine kostenfreie oder günstige Software ausgewählt werden, da durch die Universität Wien und der Nationalpark Donau-Auen GmbH nur eine limitierte Förderung verfügbar war. Der Vorteil kostenfreier Software läge auch darin, dass die Nationalpark Verwaltung aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Modellierung weitere Simulationen durchführen könnte. Ein Nachteil besteht jedoch oft in den längeren Einlernzeiten und einem unzureichenden Support (Gegenleithner et al., 2020: 275). Komplett kostenfrei nutzbar sind nur die Softwares BASEMENT, HEC-RAS und TELEMAC-MASCARET, wobei die anderen Softwares über Studenten-Lizenzen verfügen, die kostenfrei, zeitlich begrenzt oder stark reduziert erworben werden können.

Als private Hardware lag ein AMD Ryzen 7 3700U x64-basierter Prozessor mit 4 Kernen, 16GB RAM und integrierter Radeon Vega Mobile Gfx Grafikkarte (2,3GHz) vor. Für die Simulation konnte jedoch bei Bedarf auch auf einen leistungsstärkeren universitären Rechner zugegriffen werden. Da die Hardwareanforderungen der Softwares heutzutage schon von den meisten Mittelklasserechnern erfüllt werden, sind im Grunde alle aufgelisteten Softwares nutzbar. Jedoch hängt die Durchführbarkeit auch von der Größe und Auflösung des zu simulierenden Szenarios ab, weshalb die Anforderungen nur eine Mindestanforderung darstellen und keine Garantie für eine gute Performance. Als Richtwert haben einige der Softwares die Laufleistung verschiedener Hardware getestet und Empfehlungen ausgesprochen. Von anderen Softwares wie CCHE oder TELEMAC-MASCARET konnten auf der Website keine Informationen zu Hardwareanforderungen gefunden werden (vgl. Tabelle 2).

Die beschriebenen Softwareanforderungen wurden nur von BASEMENT, HEC-RAS und TELEMAC-MASCARET vollständig erfüllt. Während BASEMENT und HEC-RAS über eine grafische Benutzeroberfläche verfügen, wird TELEMAC-MASCARET über die Kommandozeile und einem FORTRAN-Compiler, sowie Python-Scripte ausgeführt. Dies schränkt die Benutzerfreundlichkeit für Anwender ohne bzw. geringen Kenntnissen mit

Programmiersprachen ein. Da die Benutzerfreundlichkeit ein Auswahlkriterium ist, wurde die Software TELEMAC-MASCARET für die Auswahl nicht weiter berücksichtigt. Die übrigen beiden Softwares BASEMENT und HEC-RAS wurden in ihren Leistungen nochmals genauer verglichen.

Beide Softwares verfügen über eine grafische Benutzeroberfläche, über die man die Simulation erstellen und Modellbereiche (1D-2D) miteinander verknüpfen kann. Dabei benutzen beide Softwares zum Lösen der mathematischen Gleichungen die Finite-Volumen-Methode (vgl. Kapitel 2.8). Jedoch können die hierfür benutzen Rechennetze stark voneinander abweichen. Während in BASEMENT Rechennetze aus Drei- und Vierecken bestehen, die über externe Anwendungen oder dem zugehörigen QGIS PlugIn „BASEmesh“ erzeugt werden können, gibt es in HEC-RAS die Möglichkeit, über den integrierten „RAS-Mapper“ Rechennetze aus bis zu achteckigen Feldern zu erstellen (Hydrological Engineering Center, 2023b; Vetsch et al., 2022e: 47).

Für die Bedienung verfügen beide Softwares über eine ausführliche Dokumentation mit Schritt-für-Schritt-Anleitungen bzw. Tutorials zur Erstellung des Modells und aller notwendigen Eingangsdaten. Die Kriterien der Leistungen und Benutzerfreundlichkeit sind daher ebenbürtig und geben keine klare Tendenz für eine Software.

Eine nähere Betrachtung der Hardware-Anforderungen von HEC-RAS zeigt, dass die Empfehlungen hier für 2D-Modellierungen etwas höher liegen als die von BASEMENT. Dabei spricht HEC-RAS eine deutliche Empfehlung für so viele Prozessorkerne wie möglich aus, mit einer Geschwindigkeit von mindestens 3,2 GHz oder höher. Auch beim Arbeitsspeicher empfiehlt HEC-RAS eher 32GB statt der Mindestanforderung von 8GB, um auch größere Modelle mit bis zu einer Millionen Zellen simulieren zu können (Hydrological Engineering Center, 2023c). Dagegen spricht BASEMENT nur eine Empfehlung von mindestens 1GB pro Kern aus, zeigt jedoch über seine Test-Cases den Vorteil in der Verwendung mehrerer Computerkerne für eine Reduzierung der Rechenzeit von 1D und 2D Simulationen (vgl. Tabelle 2; Vetsch et al., 2022c: 26f).

Zwar werden die Mindestanforderungen der beiden Softwares vom privaten Rechner erfüllt, jedoch nicht die empfohlene Leistung für die Nutzung von HEC-RAS für 2D Modellierungen. Daher gab es hier eine klare Tendenz zu BASEMENT. In Anbetracht, dass BASEMENT speziell für alpine Flüsse entwickelt wurde und die Donau im Abflussverhalten ein Gebirgscharakter zugesprochen wird, schien eine Auswahl von BASEMENT für die Simulation des Überflutungsgeschehen in den Donau-Auen, nach Bewertung aller Kriterien als geeignete Software (vgl. Kapitel 3.1; Lazowski, 1997:71).

4.2 BASEMENT

Die Software BASEMENT (BAsic-Simulation-EnvironMENT) wurde von der ETH Zürich entwickelt und stellt ein Werkzeug zur numerischen Simulation von Wasserströmungen alpiner Flüsse und deren Sedimenttransport dar. Dabei verfolgt die ETH Zürich das Ziel, durch eine kostenfrei zugängliche Software, einen breiteren Anwenderkreis einen fachkundigen Ablauf in der Flussmodellierung zu ermöglichen und dadurch das Lösen möglichst vieler Problemstellungen im Bereich des Flussmanagement. Mögliche Einsatzgebiete von BASEMENT sind dabei (Vetsch et al., 2023b: 5ff):

- Technische Flussvorhaben mit Veränderungen der Flussgeometrie, z.B. bei Renaturierungen oder Schutzmaßnahmen
- Probleme im Zusammenhang mit Sedimenttransport in Wasserwegen, z.B. langfristige Flusssohlentwicklung
- Identifikation und Quantifizierung von Gefahren, z.B. Folgen von Hochwasser, Strömungs- und Sedimentationsverhalten, Erosionsgefahren
- Ökohydraulische Einsätze, z.B. Habitatmodellierungen

Mit über 20 Jahren Modellentwicklung befindet sich die Software derzeit in ihrer vierten Version (v.4.0.0), die 2023 noch während der Erstellung dieser Arbeit erschien. Die neuste Version setzt sich aus den zwei Hauptmodulen BASEMD (Multi Domain) und BASEHPC (High Performance Computing) zusammen. Das Modul BASEMD setzt sich wiederum aus den Untermodulen BASEchain für eindimensionale Strömungen, BASEplane für zweidimensionale Strömungen und BASEsub für dreidimensionale Untergrundströmungen zusammen. Dazu gibt

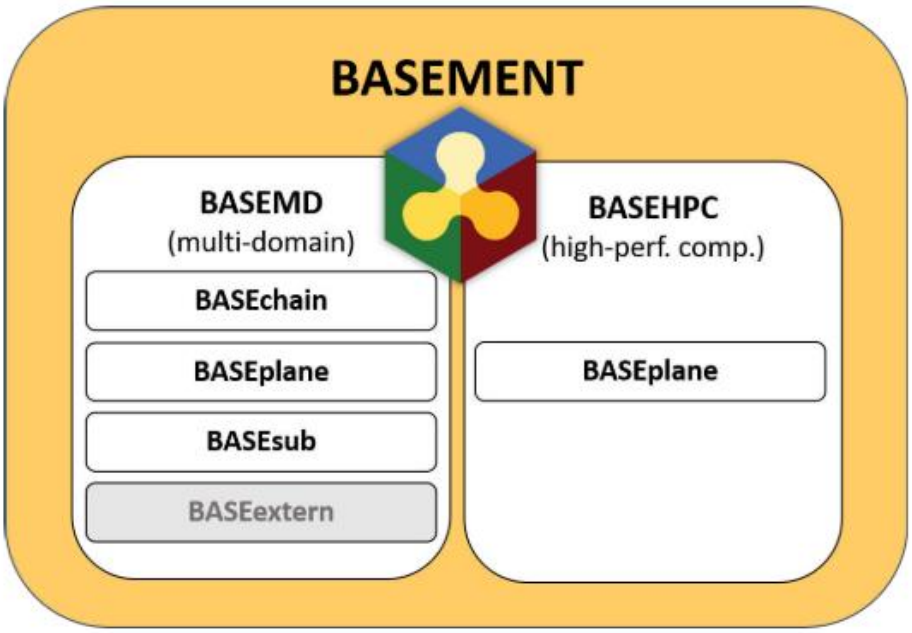


Abb. 32: BASEMENT Module (Vetsch et al., 2023b: 7)

es die Möglichkeit, die Untermodule miteinander zu koppeln, sowie mit dem Untermodul BASEextern Simulationsdaten während der Laufzeit mit anderen Programmen auszutauschen. Das zweite Hauptmodul BASEHPC enthält nur das Untermodul BASEplane, das zwar gegenüber dem BASEMD Modul über eine einfachere räumliche Diskretisierung verfügt, jedoch eine verbesserte Laufleistung besitzt. Dadurch wurden mit BASEMENT v.4.0.0 die beiden nebeneinanderstehenden Vorgängerversionen BASEMENT v.2.8.2 (BASEMD) und BASEMENT v.3.2 (BASEHPC) in einem Tool vereint, wofür andere Programme eine Vielzahl an Softwarepaketen aufweisen (vgl. Abb. 32; Vetsch et al., 2023b: 5ff).

Seit der Version 2.0 verfügt BASEMENT über eine grafische Benutzeroberfläche (GUI), mit der die gesamte Befehlsdatei für die Simulation erstellt und diese direkt auf Syntaxfehler oder Eingabefehler überprüft werden kann. Hierdurch hat sich die Benutzerfreundlichkeit von BASEMENT stark erhöht. Eine Nutzung von BASEMENT über die Konsole ist auch weiterhin möglich. Die Hardwareanforderungen von BASEMENT empfehlen für die Version 4.0.0 einen Intel-Multikernprozessor (Xeon, 12 bis 18 Kerne) mit 1GB RAM pro Kern, als Grafikprozessor (GPU) werden nur noch CUDA-fähige (Compute Unified Device Architecture) GPUs von NVIDIA unterstützt (Vetsch et al., 2022e: 61, 2023a: 6). Zum Vergleich, für die Vorgängerversion BASEMENT v.2.8.2 lagen die Hardwareanforderungen bei einem Intel oder AMD Single- oder Multikernprozessor mit 1GB RAM pro Kern. Für die GPU gab es keine Anforderungen oder Limitierungen (Vetsch et al., 2022a: 14).
Für den Anwender stellt die ETH Zürich auf ihrer Homepage eine umfassende Dokumentation der Software, in Form einer Installations-Anleitung, einem Benutzerhandbuch, ein Referenzhandbuch, Tutorials mit Testdaten und spezielle Testanwendungen zur Verfügung. Dazu gibt es ein kostenfreies Benutzerforum, in dem man Hilfestellungen von anderen Nutzern und den Entwicklern erhalten kann.

Aufgrund des erst im Februar 2023 erschienenen Softwareupdate auf Version 4.0.0, wurde BASEMENT noch mit der Vorgängerversion 2.8.2 angelernt. Da die Methodik zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen war, wurde von einer Aktualisierung auf die neue Version abgesehen. Die nachfolgend beschriebenen BASEMENT Modellkomponenten und der Modellaufbau beziehen sich daher auch vor allem auf die Vorgängerversion v.2.8.2 und die darin enthaltenen Untermodule BASEchain und BASEplane.
Die Untermodule in BASEMENT setzen sich jeweils aus drei Modellkomponenten zusammen. Der mathematisch-physikalische Baustein enthält die Strömungsgleichungen für das Verhalten der Flüssigkeit. Für dreidimensionale Simulationen in BASEsub wird die Strömungs- und Druckverteilung durch die Navier-Stokes-Gleichung beschrieben. Vereinfacht man diese, unter Annahme einer statischen Druckverteilung und dem Ausschluss vertikaler Strömungen,

erhält man die zweidimensionalen Flachwassergleichungen, die für Simulationen in BASEplane benutzt werden. Mit diesen Gleichungen können genaue Ergebnisse für Wasserstände und Geschwindigkeiten in einer Ebene erzielt werden. Ein weiteres Vereinfachen führt zur 1D-Saint-Venant-Gleichung, die für eindimensionale Simulationen in BASEchain verwendet wird. Mit dieser lässt sich der Wasserstand und die mittlere Geschwindigkeit in Fließrichtung ermitteln (vgl. Kapitel 2.8; Vetsch et al., 2022e: 13f).
Zusätzlich zu den hydrodynamischen Gleichungen enthält der mathematisch-physikalische Baustein auch die empirischen Formeln zur Berechnung des Sedimenttransports. Diese Formeln sind zwar physikalisch nicht korrekt, zeigen jedoch eine ausreichende Genauigkeit für das Lösen von Fragestellungen für den Sedimenttransport. Zwar könnte die Bewegung eines jeden einzelnen Teilchen auch mit der Berechnung der Bewegungsgleichungen numerisch gelöst werden, jedoch ist dieser Ansatz bisher noch zu teuer (Vetsch et al., 2022e: 13f).
Das Rechennetz stellt die zweite Komponente dar und repräsentiert die diskrete Form der Topographie, worauf die mathematisch-physikalischen Gleichungen angewendet werden. Die Modelldaten werden hierbei über Querprofile der Flussgeometrie für 1D-Modelle oder TIN´s für 2D-Modelle übergeben und in Form von unstrukturierten Rechennetzen dargestellt, die sich aus drei Objektarten zusammensetzen (vgl. Kapitel 2.8; Vetsch et al., 2022e: 14ff):

- Knoten (Nodes) sind Punkte, die im Bezug zu einem Koordinatensystem stehen
- Kanten sind Verbindungslinien zwischen zwei Knoten und definieren den Informationsfluss zwischen zwei Elementen
- Elemente werden durch mehrere Knoten definiert und übergeben die physikalischen Größen am Elementstandort

Die Querprofile im 1D-Modell bestehen aus zwei Knoten und einer Kante. Da die Informationen zur Geometrie, Geschwindigkeit oder Fließtiefe über die Knoten übergeben werden, wird die Darstellung des Querprofils besser, je mehr Knoten entlang der Kante bekannt sind. Dies ist besonders für Regionen mit gekrümmten Fließgewässerverläufen von Bedeutung. Das Rechennetz im 2D-Modell besteht jeweils aus Elementen, die durch mindestens drei Knoten begrenzt werden. Die Knoten übergeben dabei die bekannte Höheninformation des Geländes (vgl. Kapitel 2.6; Vetsch et al., 2022e: 14ff).
Die dritte Komponente ist der numerische Baustein, der die Methoden zum Lösen der mathematischen Gleichungen enthält. In BASEMENT werden die Differenzialgleichungen mit der Finite-Volumen-Methode diskretisiert (vgl. Kapitel 2.8; Vetsch et al., 2022e: 39). Dabei wird der Strömungsbereich in mehrere Zellen unterteilt, worauf die Erhaltungsgesetze angewendet werden. Für jede Zelle werden die Flussvariablen für bestimmte Punkte der Zelle bestimmt, wobei man zwei unterschiedliche Anordnungen unterscheidet (vgl. Abb. 33; Vetsch et al., 2022b: 56f):

- Bei der cell-centered Methode liegen die Punkte im Zentrum der Zellen, wodurch die Zellen mit den Elementen des Rechennetz übereinstimmen.
- Bei der cell-vertex Methode werden die Punkte um die Knoten des Rechennetz gelegt, wodurch sich die Zellen von den Elementen unterscheiden.

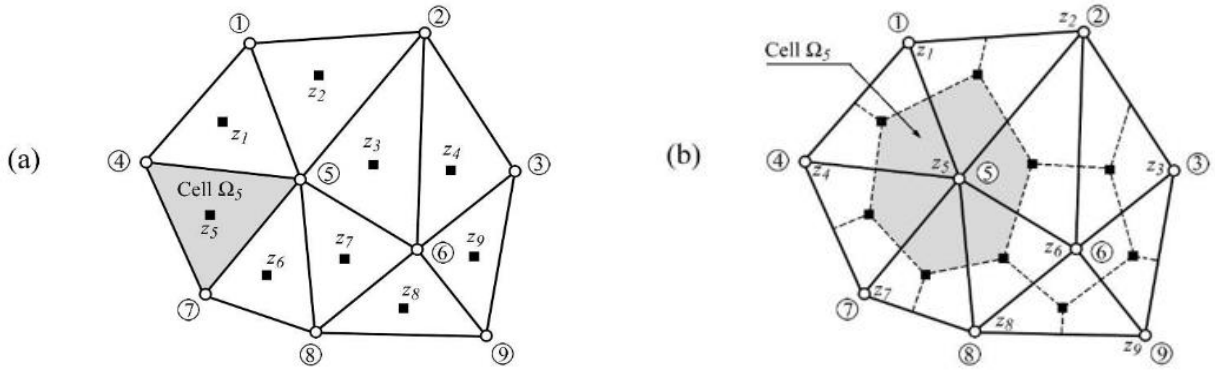


Abb. 33: Cell-centered Methode (a) und Cell-vertex Methode (b) (Vetsch et al., 2022b: 58)

Ein Vorteil der Finite-Volumen-Methode ist, dass die Form der Zellen für die Bilanzierung der Flüsse unrelevant ist, wodurch Dreiecke oder Vierecke in strukturierten oder unstrukturierten Rechennetzen erzeugt werden können. Dadurch lassen sich geometrisch komplexe Topographien gut simulieren (ÖWAV, 2014: 20f; Vetsch et al., 2022b: 56f).
Zum Lösen der Gleichungen kommen in BASEMENT die Riemann-Löser zum Einsatz. Dabei kann zwischen dem exakten und approximativen Riemann-Löser unterschieden werden, die sich voneinander durch den Rechenaufwand, der Anwendbarkeit und der Korrektheit unterscheiden. Der exakte Riemann-Löser verfolgt einen iterativen Ansatz, der zwar korrekter ist, jedoch sehr komplex ist und einen hohen Rechenaufwand erfordert. Der approximative Riemann-Löser versucht die relevanten Merkmale der exakten Lösung zu erhalten und diese anzunähern, wodurch dieser allgemein effizienter ist als der exakte Riemann-Löser. In BASEMENT gibt es neben dem exakten Riemann-Löser noch die beiden approximativen Riemann-Löser HLL bzw. HLLC, die von Harten, Lax & van Leer bzw. von Toro entwickelt wurden (Vetsch et al., 2022b: 59f).

Der Modellaufbau mit BASEMENT unterscheidet sich je nach Anwendungsproblem und ermöglicht vielfältige Kombinationsmöglichkeiten. Neben der Erstellung der numerischen Simulation in BASEMENT, beinhaltet der Modellaufbau auch die notwendigen Vorverarbeitungen der Eingangsdaten in einem Preprocessing und Nachbearbeitungen der Ausgabedaten in einem Postprocessing. Diese sind dabei zugleich auch die aufwendigsten Teile in der Modellierung mit BASEMENT (Vetsch et al., 2022e: 19).

Als Eingangsdaten benötigt BASEMENT topographische und hydrologische Daten. Für eine Simulation des Sedimenttransports werden zusätzlich Sedimentdaten benötigt. In dieser Arbeit wird jedoch keine Simulation des Sedimenttransports durchgeführt, weshalb im Folgenden auf diesen Bereich nicht weiter eingegangen wird.
Die topographischen Eingangsdaten beruhen in der Regel auf dreidimensionalen Punktwolken oder einem DGM und müssen, falls nicht bereits vorhanden, in Querprofile für 1D-Modelle oder TIN´s für 2D-Modelle transformiert werden (vgl. Kapitel 2.2 & 2.6; Vetsch et al., 2022e: 29f). Die Querprofile basieren oft auf Vermessungsdaten der Flussgeometrie und benötigen meist nur geringe Datenanpassungen, wohingegen die TIN´s meist eine umfassende Vorverarbeitung bedürfen, um die Anforderungen an die Netzqualität und Stabilität für die Berechnung zu erfüllen. Dies liegt daran, dass die Auflösung, der aus einheitlichen Punktwolken generierten TIN´s, für Bereiche von Interesse verfeinert werden sollte, um die Strömungen korrekt simulieren zu können. Zugleich sollten alle anderen Bereiche gröber dargestellt werden, um die Rechenzeit zu reduzieren. Für die Erstellung eines Rechengitters für 2D-Modelle gibt es verschiedene kommerzielle und kostenfreie Gittergeneratoren, die unterschiedliche Triangulationstechniken und Methoden zur Rechennetzverfeinerung anwenden (Vetsch et al., 2022e: 16ff). Für die Netzgenerierung hat die ETH Zürich den Gittergenerator „BASEmesh“ entwickelt, der als QGIS PlugIn unentgeltlich genutzt werden kann und somit den von der ETH Zürich angestrebten kostenfreien Workflow in der Flussmodellierung mit BASEMENT erhält. BASEmesh ist ein Werkzeug basierend auf dem Gittergenerator „TRIANGLE“, von Jonathan R. Shewchuk und unterstützt die automatisierte Erstellung von Dreiecksnetzen für zweidimensionale Rechennetze. Daneben bietet es die Möglichkeit einer Konvertierung der Formate von eindimensionalen Rechennetzen zwischen der Software HEC-RAS und BASEMENT (Vetsch et al., 2022e: 46f).
Als hydrologische Eingangsdaten müssen BASEMENT die hydrologischen Randbedingungen wie Abflussganglinien, Zeitreihen von Wasserständen oder Sedimentkonzentrationen im Wasser für alle Grenzen des Rechennetzes übergeben werden. Die Daten für die Randbedingungen müssen dabei speziell auf das zu simulierende Ereignis angepasst sein oder auf bestehenden Messdaten beruhen. Dazu müssen die Daten in das von BASEMENT geforderte Format umgewandelt werden (Vetsch et al., 2022e: 30).

Für die numerische Simulation mit BASEMENT muss die für das zu simulierende Szenario notwendige Modellstruktur erstellt werden, sowie die erforderlichen Parameter und Eingangsdaten ausgewählt werden. Die Modellstruktur wird in BASEMENT über den Command File Editor erstellt und unterteilt sich in Blöcke mit jeweils spezifischen Unterblöcken bzw. Tags. Über einen Informationsbutton können Hilfestellungen und vorgeschlagene Standardwerte zu den Blöcken und Tags eingeblendet werden. Dazu werden fehlerhafte Eingaben direkt über ein Validationsfenster angezeigt (vgl. Abb. 34; Vetsch et al., 2022e: 63ff).

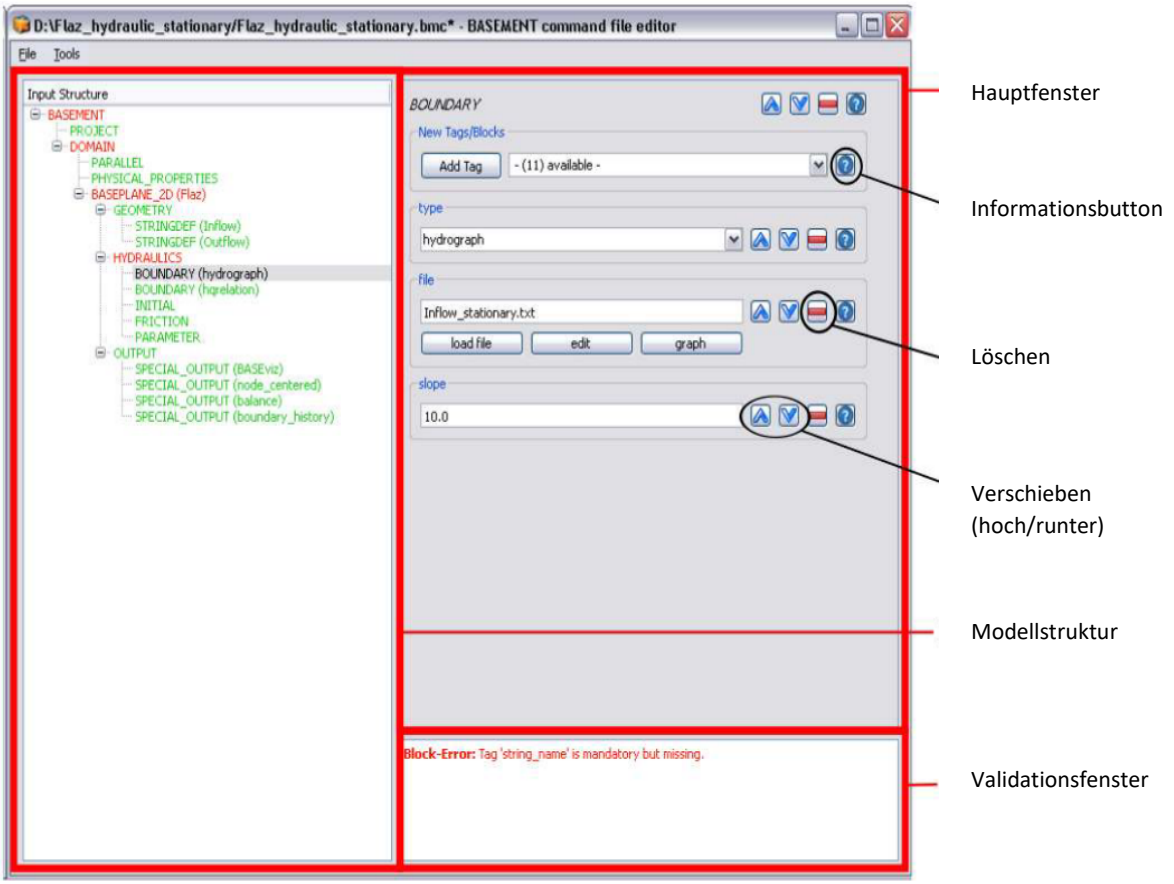


Abb. 34: BASEMENT Command File Editor (Vetsch et al., 2022e: 64)

Die Untermodule BASEchain und BASEplane können somit über verschiedene Blöcke erstellt werden und deren spezifischen Einstellungen, sowie Eingabe- und Ausgabedaten definiert werden. Zusätzlich können die Untermodule in verschiedensten Szenarios miteinander gekoppelt werden. Dabei sind einfache Modellkopplungen derselben Untermodule (1D-1D), sowie sehr komplexe Flussnetzwerke mit ein- und beidseitigen Verbindungen (1way & 2way coupling), Kreuzungen (junction) und Kopplungen verschiedener Untermodule (1D-2D) möglich (vgl. Abb. 35; Vetsch et al., 2022e: 90ff).

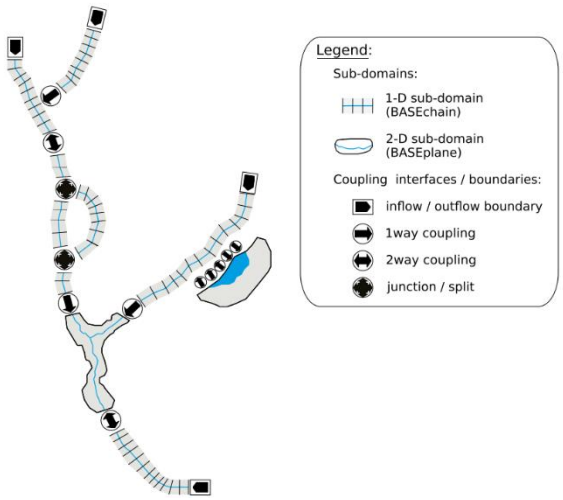


Abb. 35: Modellkopplungsmöglichkeiten mit BASEMENT (Vetsch et al., 2022e: 91)

Eine Nachbearbeitung und Visualisierung der Simulationsergebnisse wird bisher nicht von BASEMENT unterstützt und kann von eigenständigen Softwareprodukten über gemeinsame Schnittstellen erfolgen. BASEMENT bietet verschiedene Ausgabeformate, wie z.B. das Datenmodellformat „.xdmf“ oder das Textformat „.csv“ an. Eine Visualisierung der Ergebnisse ist über die Softwares ParaView oder QGIS möglich (Vetsch et al., 2023b: 10).

5 Methodik

In diesem Kapitel werden die methodischen Schritte für die Erstellung eines hydrodynamisch-numerischen Modells mit der Software „BASEMENT“ vorgestellt und mit diesem das Überflutungsgeschehen innerhalb der Donau-Auen für zwei unterschiedliche Abflussganglinien simuliert. Hierdurch sollen die von Pekárová et al. (2016) festgestellten Veränderungen in der Form der Abflussganglinien, auf Unterschiede in ihrem Überflutungsgeschehen, für das in Kapitel 3.3 beschriebene Projektgebiet, untersucht werden. Der Aufbau der Methodik wird im nächsten Kapitel 5.1 beschrieben.

Die Modellerstellung mit der Software „BASEMENT“ wurde dabei im Selbststudium angeeignet und die Methodik unter Anlehnung an das User Manual und die Tutorials von BASEMENT ausgearbeitet (Vetsch et al., 2022d; 2022e).
Neben BASEMENT_v2.8.2 wurden in der Methodik auch das geographischen Informationssystem QGIS 3.22.12, sowie die HN-Software HEC-RAS 6.2 benutzt. Die komplette Methodik ist dabei mit kostenfreien Softwarelösungen durchführbar. Als Hardware kam ein Lenovo Thinkpad E595 mit einem AMD Ryzen 7 3700U Prozessor mit 4 Kernen, 16GB Arbeitsspeicher und einer integrierten Grafikkarte Radeon Vega Mobile Gfx zum Einsatz (vgl. Kapitel 4.1). Dementsprechend war die Modellentwicklung durch die hardwarebedingte Rechenleistung begrenzt.

5.1 Konzeptioneller Aufbau

Für die Simulation des Überflutungsgeschehen in den Donau-Auen, wurde ein hydrodynamisch numerisches Modell erstellt. Hierbei sollte die Donau als eindimensionales und die linksufrig angrenzenden Donau-Auen als zweidimensionales HN-Modell modelliert werden (vgl. Abb. 36: 1-D cross section, 2-D floodplain). Die beiden Modelle werden dabei über das linke Donauufer, als gemeinsame Modellgrenze (coupling interface), lateral miteinander verbunden, wodurch sie ein gekoppeltes 1D-2D hydrodynamisch numerisches Modell bilden. Sobald der Wasserstand in einem der Modelle die gemeinsame Modellgrenze übersteigt, wird das

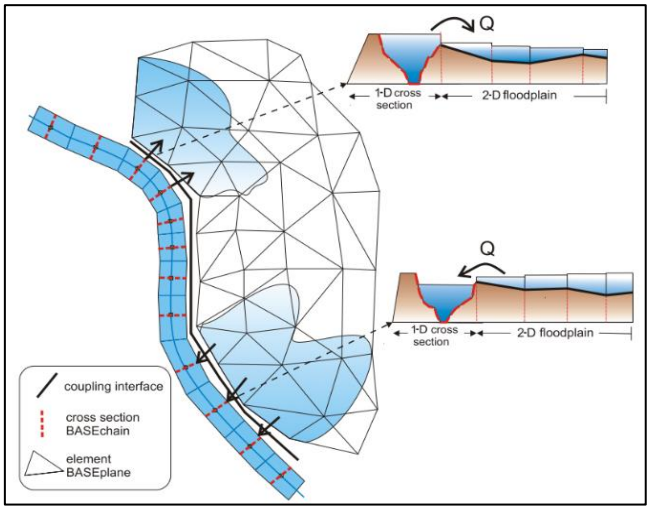


Abb. 36: Konzeptionelle Modellübersicht (Vetsch et al., 2022e: 97)

Wasser zwischen den Modellen ausgetauscht. Somit ist gewährleistet, dass die von der eindimensionalen Donau kommenden Abflüsse über das Donauufer in die zweidimensionalen Auen und wieder zurückfließen können (vgl. Abb. 36).

Die Erstellung eines 1D-2D gekoppelten hydrodynamisch-numerischen Modells mit der Software BASEMENT erfordert zunächst eine umfassende Datenvorverarbeitung, um die topographischen und hydrologischen Rohdaten in das für BASEMENT notwendige Eingangsformat zu bringen. Unter Einbezug verschiedener Software, läuft die Vorverarbeitung für die jeweiligen Modellbereiche getrennt voneinander ab. Als Eingangsdaten wird jeweils eine Geometriedatei für den 1D- und 2D-Modellbereich, sowie eine Abflussganglinie als Randbedingung des Modells benötigt (vgl. Abb. 37; Vetsch et al., 2022e: 29f).
Nachdem die drei Eingabedateien vorverarbeitet wurden, konnte die eigentliche hydrodynamisch-numerische Modellentwicklung in BASEMENT stattfinden. Diese setzte sich aus den Modelleinheiten BASEchain, für den eindimensionalen und BASEplane, für den zweidimensionalen Modellbereich zusammen, die über einen Kopplungsbereich miteinander verbunden wurden. Durch erste Gleichgewichtssimulationen mit stationären Abflussganglinien konnte die Lauffähigkeit des gekoppelten HN-Modells getestet werden und auftretende Fehler in der Modellstruktur oder in den Eingangsdaten detektiert und behoben werden. Anschließend konnten mit einer Sensitivitätsanalyse die Einflüsse der Modellparameter auf den Wasserstand am Modellausgang und die Rechenzeit des Modells getestet werden. Bevor das Modell für die Simulation der Abflussganglinien benutzt werden konnte, musste dieses an realen Messwerten kalibriert werden. Hierfür wurden die vorher getesteten Modellparameter so lange angepasst, bis die simulierten Wasserstände sich an die Referenzwerte angenähert hatten. Schließlich konnten die, in der Datenvorverarbeitung ausgewählten, instationären Abflussganglinien mit dem kalibrierten 1D-2D hydrodynamisch-numerischen Modell simuliert werden (vgl. Abb. 37).

Der konzeptionelle Aufbau der Methodik und die dabei verwendeten Softwares können dem folgenden Flussdiagramm entnommen werden (vgl. Abb. 37). Eine genauere Beschreibung der einzelnen Schritte erfolgt in den weiteren Kapiteln.

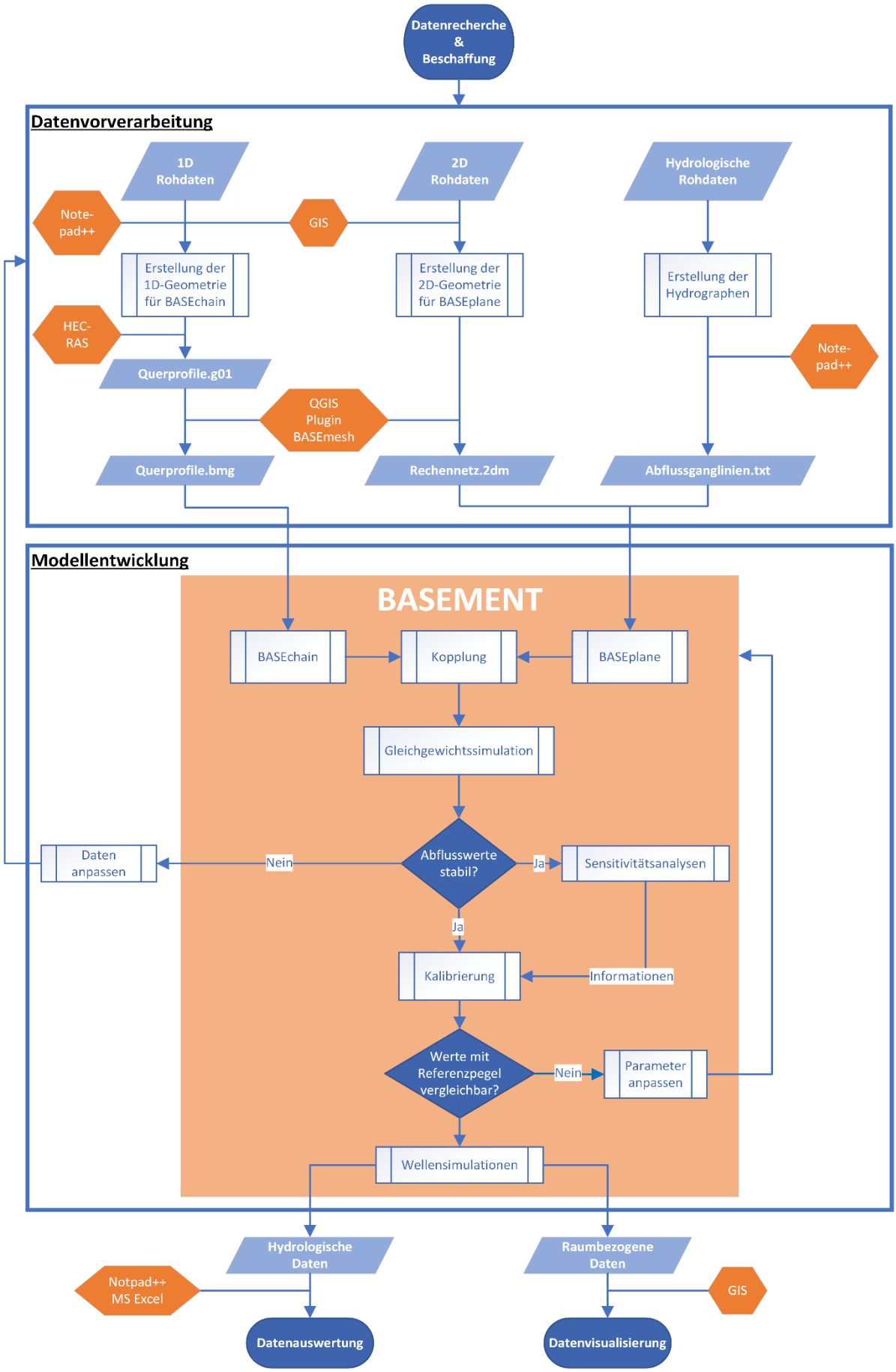


Abb. 37: Konzeptioneller Aufbau der Methodik (Eigene Darstellung, 2023)

5.2 Datenvorverarbeitung

Die Datenvorverarbeitung beinhaltet den Datenbezug und deren Weiterverarbeitung in das für die verschiedenen Modellbereiche notwendige Eingangsdatenformat und ist der mitunter zeitaufwendigste Teil in der Modellerstellung (vgl. Vetsch et al., 2022e: 19). Die Vorverarbeitung der Daten für den 1D und 2D Modellbereich, sowie die Auswahl und Verarbeitung der Abflussganglinien werden im Folgenden getrennt voneinander beschrieben (Kapitel 5.2.1 – 5.2.3). Die Lauffähigkeit und topologische Korrektheit der Daten konnte erst durch die in Kapitel 5.3.2 beschriebene Gleichgewichtssimulation getestet werden. In der Gleichgewichtssimulation detektierte Datenfehler, ergaben die Notwendigkeit die Datenanpassung mehrfach zu durchlaufen (vgl. Abb. 37).

5.2.1 Eindimensionaler Modellbereich

Für den eindimensionalen Modellbereich „BASEchain“ benötigt BASEMENT eine Geometriedatei mit den Querprofilen der Donau. Dabei stellt jedes Querprofil einen Querschnitt der Donau vom linken zum rechten Ufer dar. BASEMENT_v2.8.2 beinhaltet nur eine Option zum Bearbeiten von Querprofilen, jedoch nicht für eine Erstellung dieser, weshalb für die Querprofilerstellung auf die im BASEMENT Benutzerhandbuch empfohlene Software HEC-RAS 6.2 zurückgegriffen wurde (Vetsch et al., 2022e: 57).

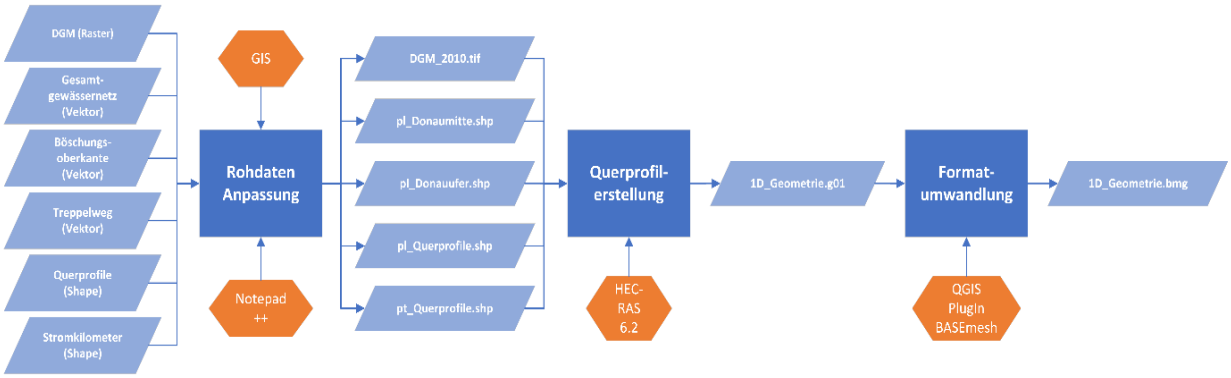


Abb. 38: Ablauf für die Erstellung der 1D Geometriedatei (Eigene Darstellung, 2023)

Mit HEC-RAS können Querprofile direkt digitalisiert werden, oder auf Grundlage von importierten Daten erstellt werden. Dabei werden den Querprofilen grundsätzlich Höheninformationen aus einem digitalen Geländemodell oder Profilpunkten übergeben (vgl. Kapitel 2.6). Zusätzlich werden die Gewässermitte und -ufer zur Zuordnung und Begrenzung der Querprofile benötigt. Die mit HEC-RAS erzeugte Querprofildatei kann anschließend mit dem QGIS PlugIn BASEmesh_v1.4.6 in das BASEchain Geometrieformat „.bmg“ exportiert werden. Da sämtliche Daten von der „viadonau Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft

mbH“ (viadonau) und der Nationalpark Verwaltung zur Verfügung gestellt wurden, oder über den „Open Data Österreich“ Katalog frei zugänglich waren, wurden die Querprofile auf Grundlage dieser erstellt. Die notwendigen Daten, ihre Herkunft und erste Verarbeitungsschritte werden im Folgenden beschrieben. Die Abbildung 38 stellt den Ablauf für die Erstellung der 1D Geometriedatei als Flussdiagramm dar.

Rohdatenanpassung:

- Gewässermitte als Linie *(Datenquelle: Umweltbundesamt GmbH)*

  Die Gewässermitte der Donau wurde aus dem Datensatz des Gesamtgewässernetz von Österreich in einem GIS selektiert. Die Daten werden vom Umweltbundesamt kostenfrei zur Verfügung gestellt und können über „Open Data Österreich“ im Shape-Format bezogen werden.

- Donauufer als Linien *(Datenquelle: viadonau/DHK)*

  Für die beiden Donauufer gab es keinen durchgehenden Datensatz. Daher wurde auf Daten der Böschungsoberkante und der Treppelwege, die entlang der befestigten Donauufer verlaufen zurückgegriffen. Die Datensätze wurden von der viadonau im Shape-Format übermittelt und mussten noch zu jeweils zusammenhängenden Uferlinien zusammengefügt werden, wobei fehlende Bereiche unter Hinzunahme eines DGM in einem GIS digitalisiert wurden. Die Seitenarme der Donau wurden dabei abgeschnitten.

- Profilpunkte *(Datenquelle: viadonau/DHK)*

  Die Donau wird vom wasserstraßenbeauftragten Unternehmen viadonau mittels Fächerecholot zweimal im Jahr vermessen, wodurch die Vermessungsdaten als Punktraster mit einer Auflösung von einem Meter oder als Profilpunkte mit einem Querprofilabstand von jeweils 25 Metern als Textdatei zur Auswahl standen. Für die Methodik wurden die Profilpunkte ausgewählt, welche auf einen Abstand von 100 Metern reduziert wurden. Zusätzlich wurde die Textdatei mit dem Texteditor Notepad++ in die von HEC-RAS geforderte Struktur gebracht.

- Digitales Geländemodell *(Datenquelle: Nationalpark Donau-Auen GmbH)*

  Die Vermessung der Profilpunkte deckt je nach Wasserstand nicht den gesamten Randbereich bis zur Uferkante ab. Für diese Lücken wurde ein DGM herangezogen. Von der Nationalpark Verwaltung wurde das ursprünglich von der viadonau im Rahmen einer Laserscanbefliegung (ALS) im Winter 2009/2010 hervorgegangene DGM übermittelt (vgl. Kapitel 2.6). Das DGM lag im Rasterformat mit einer Zellenauflösung von einem Meter vor.

- Querprofile als Linien

  Für die Querprofile gab es keinen bereits vorhandenen linienförmigen Datensatz. Mit den Profilpunkten war die Lage der Querprofile aber bereits vorgegeben, wodurch diese in einem GIS von der linken zur rechten Uferlinie, entlang der Profilpunkte im 100m Abstand digitalisiert werden konnten. Den Querprofillinien wurden zusätzlich die für HEC-RAS notwendigen Attributfelder „River“, „Reach“ und „RS“ (RiverStation) hinzugefügt.

Bevor die Daten in HEC-RAS importiert werden konnten, musste noch der genaue 1D-Modellbereich definiert werden. Hierfür wurde die Donau, die das in Kapitel 3.3 beschriebene Projektgebiet von Stromkilometer 1906,5 bis 1902 tangiert, flussaufwärts bis Stromkilometern 1907,5 und flussabwärts bis Stromkilometer 1900,2 erweitert, um potenzielle Abflussschwankungen durch laterale Austauschprozesse am Projektgebietsbeginn oder -ende abzudämpfen (Vetsch et al., 2022e: 94). Anschließend wurden die Daten im GIS auf den 1D-Modellbereich zugeschnitten, womit sie bereit für den Import in HEC-RAS waren.

Querprofilerstellung

Die Software HEC-RAS 6.2 setzt sich aus dem Geometry Editor und dem RAS-Mapper zusammen, die sich beide über das Hauptfenster der grafischen Benutzeroberfläche öffnen lassen. Der RAS-Mapper ist ein simpel gehaltenes geographisches Informationssystem, womit sich Querprofile digitalisieren oder aus bereits vorhandenen Raster-, Vektor- oder Textdateien erstellen lassen. Mit dem Geometry Editor können die Querprofile anschließend überprüft und nochmals überarbeitet werden.

Für die Querprofilerstellung mit HEC-RAS mussten die zuvor beschriebenen Daten in den RAS-Mapper importiert werden. Hierbei empfiehlt sich zunächst das DGM (Terrain) und die Linienlayer zu importieren und auf Fehler zu überprüfen. Dabei müssen die Gewässermitte (Rivers) und Uferlinien (Bank Lines) in Fließrichtung, sowie die Querprofillinien (Cross Sections) von links nach rechts verlaufen (vgl. Abb. 39). Die Linienrichtungen lassen sich dabei im RAS-Mapper anzeigen und bei Bedarf ändern. Zusätzlich lassen sich Geometriefehler detektieren. Hierfür hat der RAS-Mapper eine „Validate Geometry“ Funktion, mit der fehlerhafte Features aufgelistet werden können. Mögliche Fehler wären ein zu kleines DGM, fehlende Schnittstellen zwischen Gewässermitte und Querprofilen oder Querprofilen und Uferlinien.

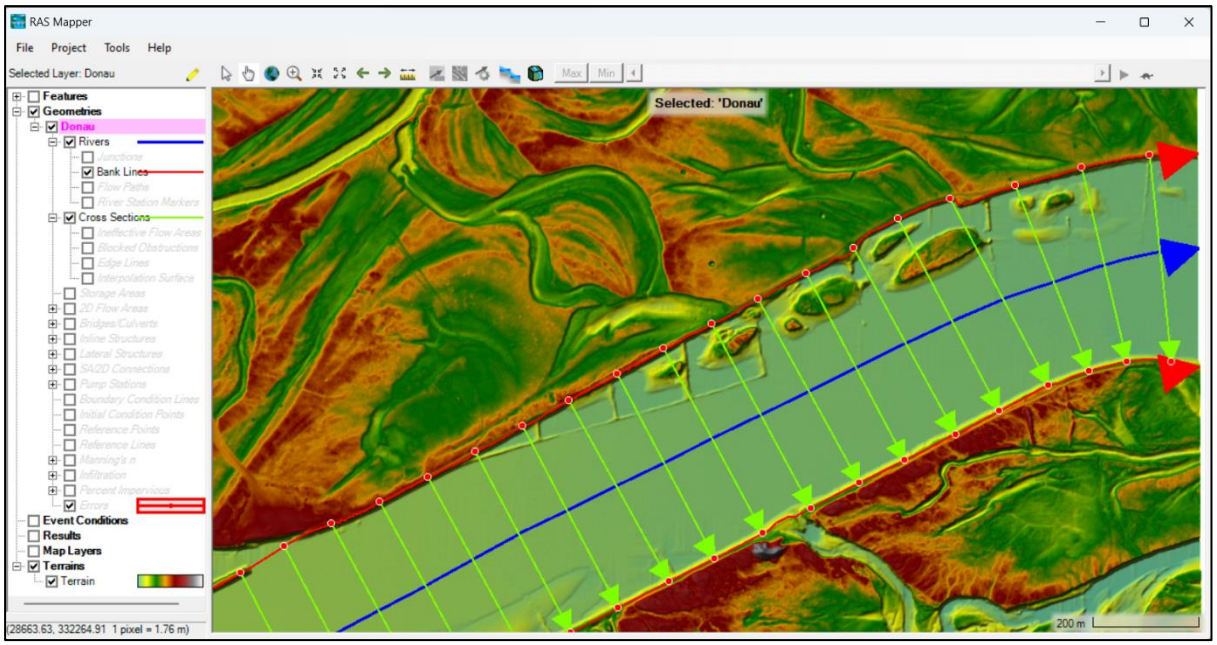


Abb. 39: RAS-Mapper mit Linienlayer (Eigene Darstellung, 2023)

Nachdem die Layer validiert wurden, gilt es die Profilpunkte zu importieren und die Querprofile mit den Höheninformationen des DGM und der Profilpunkte zu erweitern (vgl. Abb. 40). Da die Profilpunkte die Randbereiche bis zu den Uferlinien nicht abdecken, müssen die Querprofile zunächst mit den Höheninformationen des DGM versehen und anschließend durch die Profilpunkte aktualisiert werden. Die teilweise großen Höhenunterschiede zwischen den äußersten Profilpunkten und dem DGM führten hier zu unrealistischen Höhensprüngen. Daher wurden die Profilpunkte nochmals in den Randbereichen, an denen das DGM erste Höhenveränderungen zeigte, um weitere Punkte erweitert. Hierdurch konnte ein realistischeres Abbild der fehlenden Randbereiche erreicht werden (vgl. Abb. 40).

Die nachfolgende Abbildung 40 zeigt die Entwicklung der Querprofile durch die Verschneidung mit den unterschiedlichen Datenquellen für das Querprofil „1906800“. Zunächst wird dem Querprofil (Cross Section) die Höheninformation aus dem DGM (Terrain Elevation) übergeben, welche der grünen Linie entspricht (Cross Sections 1906800) (vgl. Abb. 40: A). Die Höheninformationen der importierten Profilpunkte (Elevation Points) sind über die lila-farbige Linie dargestellt und werden von ihrem äußersten Messpunkt bis zum Uferpunkt (Bank Points) interpoliert. Eine Verschneidung würde daher zu einem unrealistischen Querprofil führen (vgl. Abb. 40: B). Daher wurde ein zusätzlicher Profilpunkt an die Stelle digitalisiert, an der das DGM erste Höhenveränderungen aufweist und dem Punkt die Höhe des DGM übergeben. Hierdurch konnte die abrupte und unrealistische Höhenveränderung im Querprofil verhindert werden (vgl. Abb. 40: C). Für den Randbereich wurden dann wieder die Höheninformationen aus dem DGM übernommen, womit insgesamt ein besseres Abbild der Querprofile erzeugt werden konnte (vgl. Abb. 40:A-D).

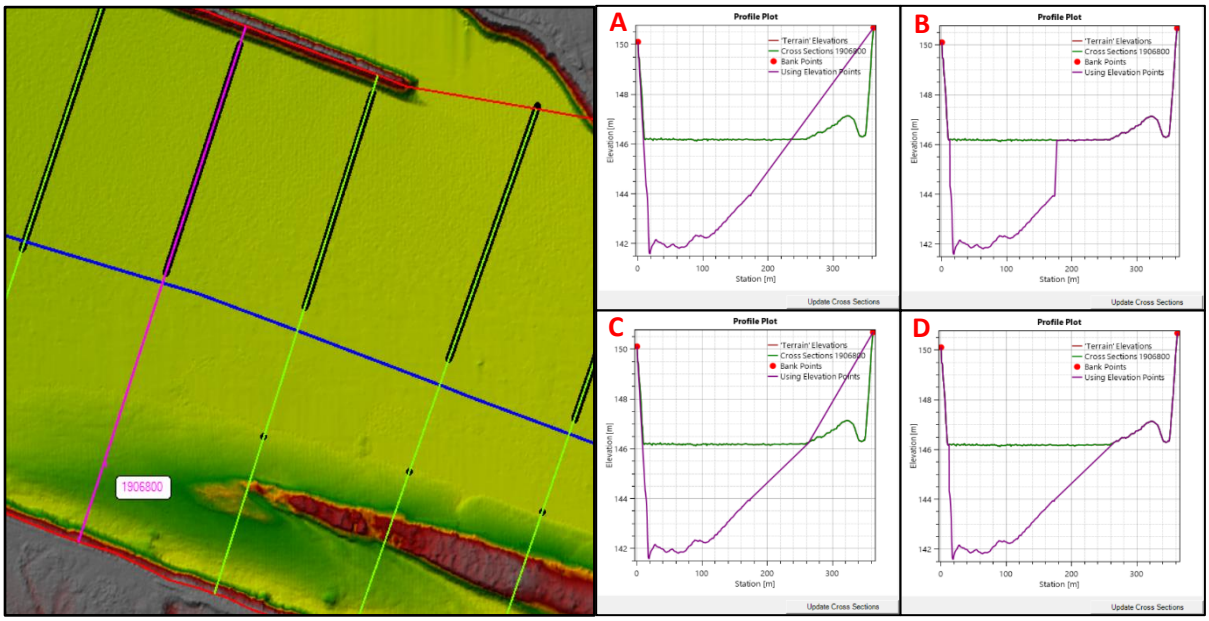


Abb. 40: Querprofilentwicklung in HEC-RAS, Reihenfolge A -> D (Eigene Darstellung, 2023)

Im Geometric Editor wurden die Querprofile anschließend auf die korrekte Darstellung der Höheninformationen aus den Profilpunkten und dem DGM überprüft. Hierbei wurden die Stützpunkte der Querprofile reduziert, da für den 1D-Modellbereich eine moderate Genauigkeit ausreicht und sich eine Vereinfachung der Querprofile reduzierend auf die Rechenzeit in BASEMENT auswirkt (Vetsch et al., 2022e: 72f). Die teilweise weit über 1000 Stützpunkte pro Querprofil konnten mit dem Verarbeitungswerkzeug „Cross Section Point Filter“ auf rund 15 Punkte reduziert werden. Für jedes der 76 Querprofile wurde die Reduktion überprüft und letzte Korrekturen manuell vorgenommen (vgl. Abb. 41). Danach konnten die Querprofile als Geometrie Datei im „.g01“ Format abgespeichert werden, womit die Verarbeitung mit HEC-RAS abgeschlossen war.

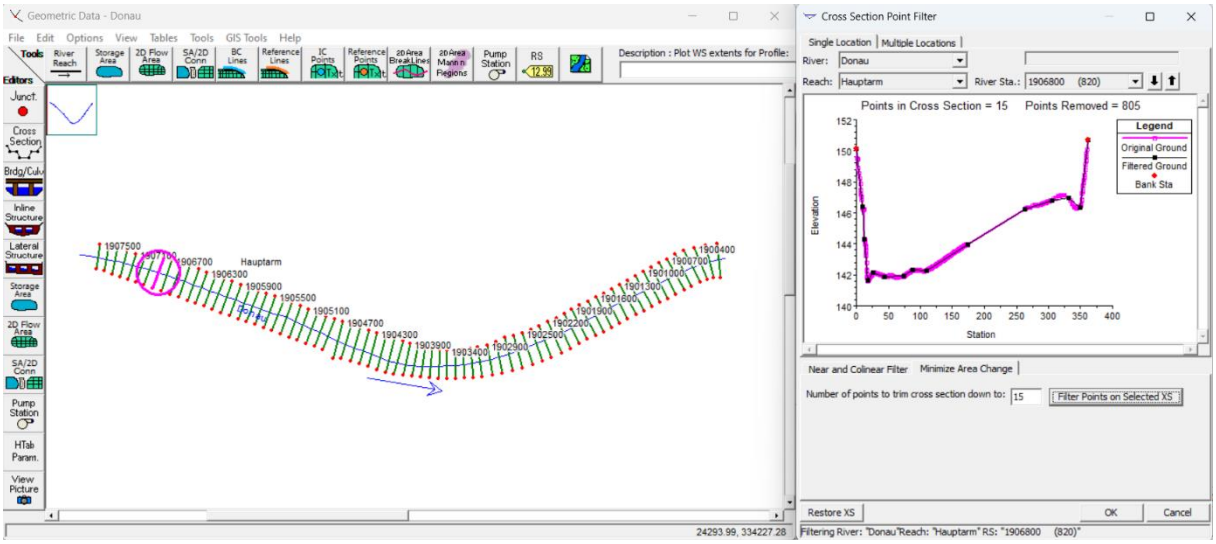


Abb. 41: Geometric Editor mit dem Verarbeitungswerkzeug “Cross Section Point Filter” (rechts) (Eigene Darstellung, 2023)

Formatumwandlung

Die Querprofile mussten nun noch in das für BASEMENT notwendige Format „.bmg“ konvertiert werden. Hierfür gibt es in dem von der ETH Zürich entwickelten QGIS PlugIn „BASEmesh“ die Möglichkeit, die Geometrie Datei im „.g01“ Format zu importieren und anschließend diese im „.bmg“ Format zu exportieren. Damit ist die Datenvorverarbeitung der 1D-Geometrie für den BASEchain abgeschlossen.

5.2.2 Zweidimensionaler Modellbereich

Für den 2D-Modellbereich BASEplane musste ein Rechennetz, für das in Kapitel 3.3 vorgestellte Projektgebiet der Donau-Auen, erstellt werden (vgl. Kapitel 2.8). Dieses kann über das QGIS PlugIn „BASEmesh“ in Form eines unstrukturierten Dreiecksnetz erzeugt werden (vgl. Kapitel 2.6; Vetsch et al., 2022e: 46f). Hierbei wird zunächst ein sogenanntes „Quality Mesh“ erstellt, dass die für die numerische Berechnung verwendeten Gitterelemente- und knoten enthält (vgl. Kapitel 4.2). Diese sind für die spätere Qualität des Modells entscheidend und sollten daher gewisse Kriterien, wie Elementgröße und Winkel, erfüllen. Das Quality Mesh umfasst alle räumlichen Informationen auf der XY-Ebene und muss noch mit einem digitalen Geländemodell interpoliert werden, um die Knotenpunkte auch auf der Z-Ebene zuordnen zu können (Vetsch et al., 2022e: 52ff). Das aus der Interpolation hervorgehende Rechennetz ist sogleich die Eingangsgeometrie für den 2D-Modellbereich BASEplane (vgl. Abb. 42).
Die Qualität des Rechennetzes ist entscheidend für die Laufzeit und das Ergebnis der Simulationen. Eine zu hohe räumliche Auflösung resultiert in einer Vielzahl an Gitterelementen und führt zu sehr langen Rechenzeiten. Zu wenige Elemente führen zu einem groben Dreiecksnetz, wodurch es zu einem Informationsverlust und somit zu falschen Simulationsergebnissen kommen kann (Vetsch et al., 2022e: 48). Da das Rechennetz erst nach der Fertigstellung der Modellstruktur in der Gleichgewichtssimulation getestet werden kann, führte dies zu einigen „Trial and Error“-Versuchen, die eine mehrfache Datenanpassung notwendig machten.
Die Vorverarbeitung der Eingangsdaten für das Quality Mesh stellen den mitunter aufwändigsten Schritt in der Rechennetzerstellung dar, da die anschließende Erzeugung des Quality Mesh sowie die Interpolation der Knotenpunkte, nach Eingabe aller Daten und Einstellungen durch BASEmesh automatisiert erfolgt. Für die Erzeugung des Quality Mesh benötigt BASEmesh die 2D Modellgrenze als Polygon, Bruchkanten als Linien und Regionen mit gleichen Eigenschaften als Punkte. Für die Interpolation ist zusätzlich ein digitales Geländemodell notwendig. Die Schritte für die Erstellung der 2D-Geometrie können auch dem nachfolgenden Flussdiagramm entnommen werden (vgl. Abb. 42). Anschließend wird die Erstellung der vier Eingangsdaten und ihre Datengrundlage kurz vorgestellt:

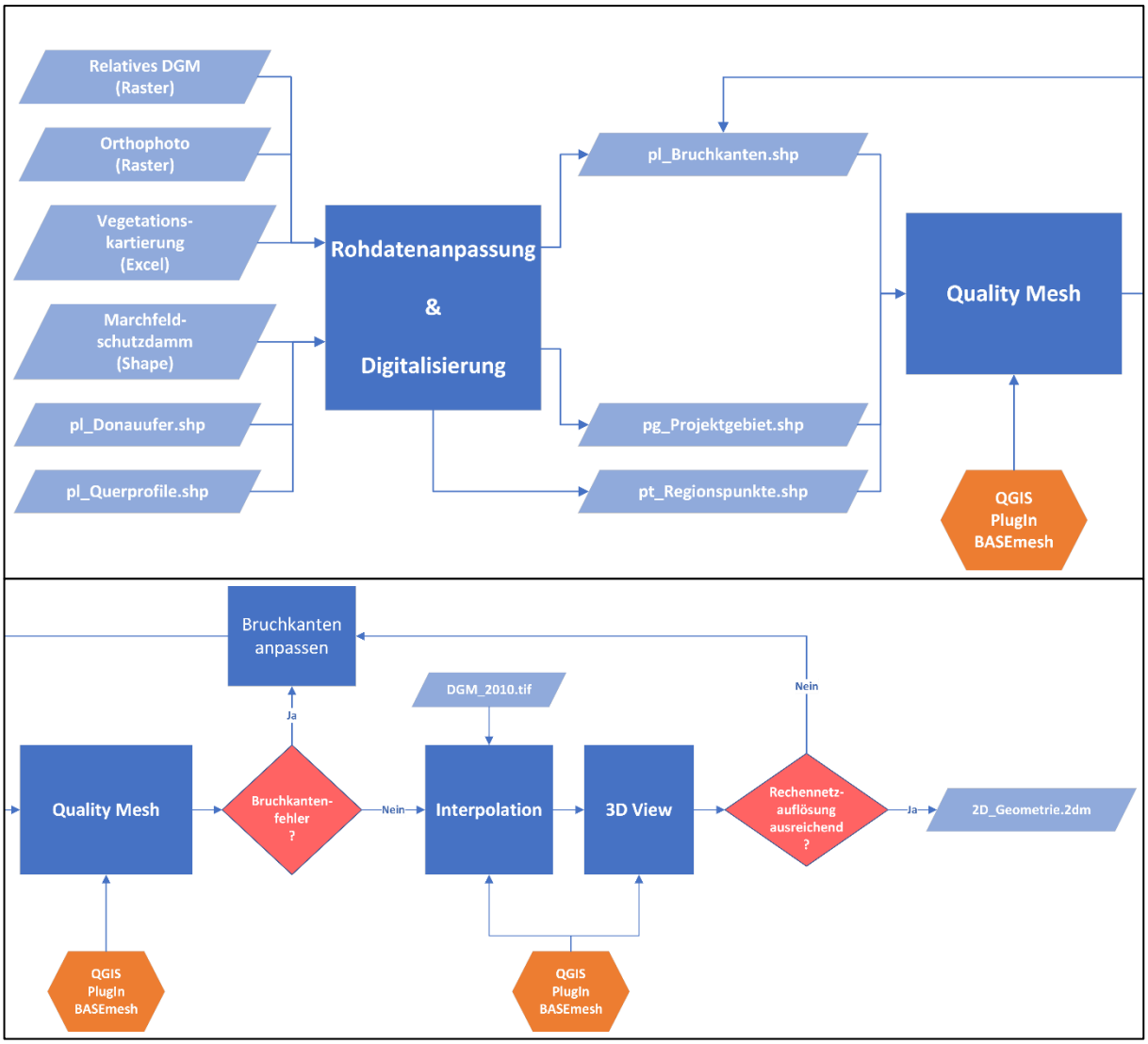


Abb. 42: Ablauf für die Erstellung der 2D Geometriedatei (Eigene Darstellung, 2023)

Rohdatenanpassung & Digitalisierung:

- 2D Modellgrenze als Polygon *(Datenquelle: viadonau/DHK & Teildigitalisierung)*

Die Modellgrenzen stellen die Fläche des von BASEmesh zu generierenden Dreiecksnetz dar. Für den 2D-Modellbereich wurden die Grenzen, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, ausgewählt und liegen im Süden am 1D-Modellbereich, um eine Kopplung der Modellbereiche zu ermöglichen. Dabei sollten zwischen den beiden Modellgebieten keine Überschneidungen oder Lücken auftreten, um eine fehlerfreie Simulation zu gewährleisten (Vetsch et al., 2022d: 150). Daher wurde für die südliche Modellgrenze die bereits für die 1D Geometrie benutzte, linke Uferkante der Donau ausgewählt und aus HEC-RAS 6.2 exportiert. Die nördliche Modellgrenze stellt der Marchfeldschutzdamm dar, welcher von der viadonau als Vektordatei übergeben wurde. Bei den östlichen und westlichen Modellgrenzen wurden die Stromkilometer 1901,8 und 1906,5 ausgewählt. Aus diesen vier Linien wurde die 2D Modellgrenze als Polygon erzeugt (vgl Kapitel 3.3 & 5.2.1).

- Digitales Geländemodell als Raster *(Datenquelle: Nationalpark Donau-Auen GmbH)*

  Bei dem digitalen Geländemodell handelt es sich um dasselbe DGM, das bereits für den 1D-Modellbereich herangezogen wurde (vgl. Kapitel 5.2.1). Zusätzlich lag das Rastermodell noch als relatives DGM vor, bei dem die Höhenwerte über dem Mittelwasserstand 2010 der Donau angegeben waren.

- Bruchkanten als Linien *(Datenquelle: viadonau/DHK)*

  Bruchkanten sind eindeutige Veränderungen in der Oberflächenböschung, wie sie zum Beispiel an steilen Flussufern oder Deichkämmen auftreten. Für das Quality Mesh sind sie von entscheidender Bedeutung, denn über diese Linien dürfen keine Dreieckselemente verlaufen. Als Folge erzwingen sie die Erstellung neuer Elemente an diesen Linien, wodurch Gebiete mit starken Höhenveränderungen detaillierter dargestellt werden. Daneben eignen sie sich auch, um Regionen mit unterschiedlichen Eigenschaften voneinander abzugrenzen (Vetsch et al., 2022e: 51).

  Innerhalb des BASEMENT Benutzerhandbuch werden die Bruchkanten synonym für die Abgrenzung von Höhenveränderungen und Regionen unterschiedlicher Eigenschaften benutzt. Dies wird in dieser Arbeit übernommen, mit dem Verweis, dass es sich bei der Gesamtheit der Linien nicht um Bruchkanten im eigentlichen Sinne handelt.

  Von der viadonau wurden Bruchkanten für das Projektgebiet als Vektordatensatz übermittelt. Die Daten waren jedoch zu detailliert, was in der Netzerstellung zu sehr vielen Dreieckselementen und Fehlern aufgrund von Elementgrößen- und Winkelkriterien führte. Des Weiteren lagen die Bruchkanten natürlicherweise nur für Bereiche vor, an denen sprunghafte Höhenveränderungen stattfinden. Dadurch waren verschiedene Regionen wie z.B. Gewässer, Auwald oder Offenflächen nicht voneinander abgegrenzt. Da die Bruchkanten neben den Höhenveränderungen auch Regionen mit unterschiedlichen Eigenschaften anzeigen sollten, wurde ein anderer Ansatz zur Bruchkantenerstellung verfolgt. Dabei wurden zunächst Bruchkanten für verschiedene Höhenklassen erstellt, welche erweitert wurden, um Bruchkanten für verschiedene Landschaftsklassen. Dadurch war das durch die Bruchkanten abgegrenzte Gebiet immer einem Höhentyp und einer Landschaftsklasse zugeordnet.

Für die Bruchkanten der Höhentypen wurden zwei Höhenwerte ausgewählt, mit denen die Nebengewässer von der flachen Au und diese von der hohen Au abgegrenzt werden können (vgl. Abb. 43). Da das Projektgebiet nach Osten hin um rund 2,5m abfällt, wurde ein relatives Geländemodell für die Auswahl der Höhenwerte verwendet. Der Vorteil des relativen DGM ist, dass es die Höhe über dem Mittelwasserstand der Donau angibt und somit das Projektgebiet kippt, wodurch ähnlich flache oder hohe Gebiete durch dieselbe Konturlinie angezeigt werden. So wurde für die Abgrenzung der Nebengewässer von den flachen Augebieten eine Höhe von

0,25m über dem MW 2010 benutzt, wobei niedrigere Bereiche innerhalb der flachen Augebiete trotzdem dieser zugeordnet wurden. Für die Differenzierung der flachen und hohen Augebiete wurde auf Basis der durchschnittlichen MW-HSW Höhenunterschiede zwischen Stromkilometer 1902 und 1907 eine Höhe von 2,75m über dem MW ausgewählt (vgl. via donau, 2010). Zusätzlich wurde mit dem digitalen Geländemodell überprüft, ob Bereiche mit hoher Steigung durch Bruchkanten abgegrenzt waren, um eine Erstellung großer Dreieckselemente über diese Bereiche zu verhindern. Beide Konturlinien wurden anschließend weiter vereinfacht, indem sie individuell gebuffert und ihre Knotenpunkte reduziert wurden, um eine Generierung zu vieler Dreieckselemente zu verhindern. Die nachfolgende Karte zeigt das Ergebnis der Bruchkanten für die Höhentypen „Nebengewässer“ und „Hohe Au“ (vgl. Abb. 43).

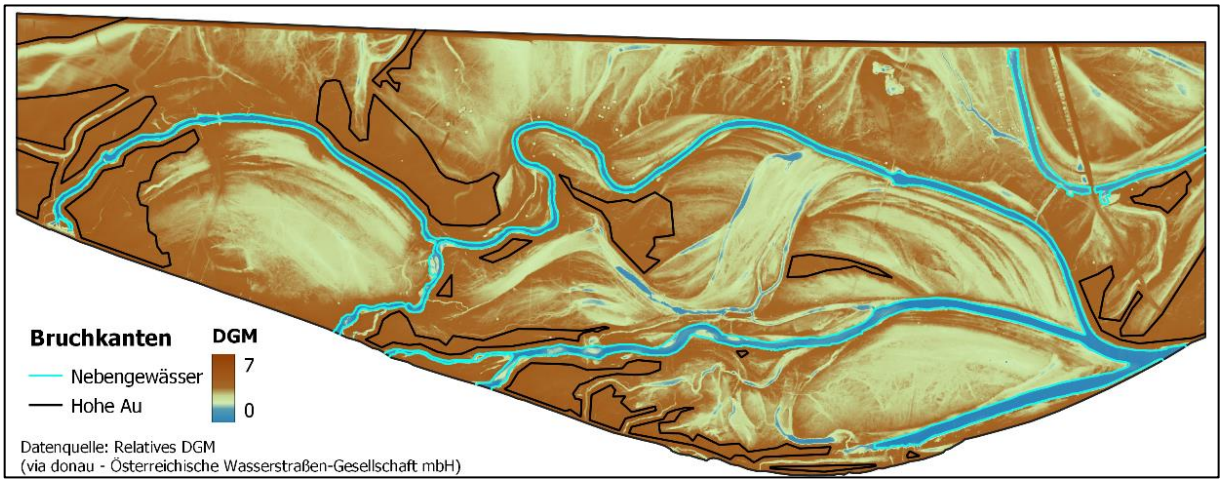


Abb. 43: Bruchkanten der Höhentypen: Nebengewässer & Hohe Au (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK)

Für die Bruchkanten der Landschaftsklassen wurde ein vom Land Niederösterreich zur Verfügung gestelltes Orthophoto aus dem Aufnahmezeitraum 2010 bis 2012, sowie eine von der Stadt Wien und der Nationalpark Verwaltung in den Jahren 2018/19 durchgeführte punktuelle Naturrauminventur herangezogen (Datenquelle: Stadt Wien; Nationalpark Donau-Auen GmbH). Das Projektgebiet wurde in fünf Klassen unterteilt:

- Die Gewässerklasse „Nebenarm“ war bereits zuvor durch die Bruchkanten für die Höhentypen abgegrenzt und erforderte keine weiteren Abgrenzungen.
- Die im DGM besonders flachen linienartigen Verläufe wurden der Klasse „Graben“ zugeordnet.
- Die in der Naturrauminventur als Verlandungszone markierten Regionen und mit einem sichtbaren dünnen Baumbestand im Orthophoto wurden der Klasse „Verlandungszone“ zugeordnet.
- Deutlich sichtbare Wiesen oder Äcker wurden als „Offenland“ klassifiziert.

- Bei den übrigen Flächen handelte es sich um dichte Baumbestände, die in der Naturrauminventur als weiche oder harte Au klassifiziert waren. Da die Naturrauminventur nur punktuell vorlag und aus diesem Datensatz nicht eindeutig abgrenzbar war, wo die weiche Au endet und die harte Au anfängt, wurden diese als „Auwald“ zusammengefasst.

Die zuvor halbautomatisiert erstellten Bruchkanten der Höhentypen wurden um die Bruchkanten der Landschaftsklassen händisch erweitert, wodurch das Projektgebiet schlussendlich aus vielen Regionen unterschiedlicher Höhentypen und Landschaftsklassen bestand (vgl Abb. 44).

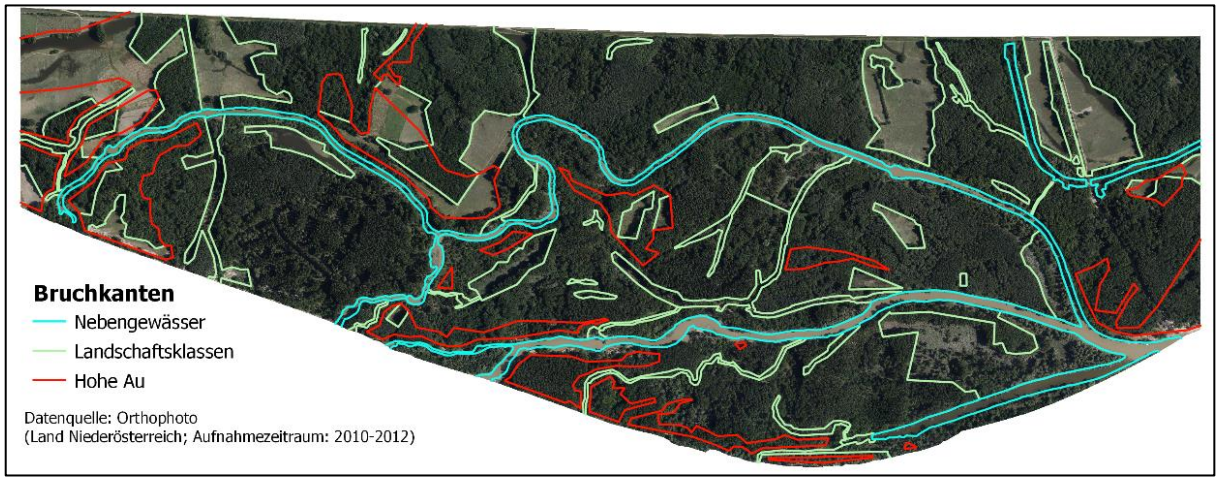


Abb. 44: Bruchkanten der Höhentypen (Nebengewässer & Hohe Au) und der Landschaftsklassen (Eigene Darstellung, 2023)

Die Erstellung der Bruchkanten kann ein zeitaufwendiger Prozess sein, bei der die Einhaltung verschiedener Prinzipien umfassende Nachbearbeitungen ersparen kann. Als Grundsatz gilt es, die Bruchkanten so simpel wie möglich zu halten um Fehler, die zur Erstellung vieler Dreieckselemente führen, zu vermeiden und Probleme bei der Netzgenerierung vorzubeugen.

Im Quality Mesh wird jeder Bruchkantenstützpunkt zu einem Knotenpunkt. Daher sollten diese so gut wie möglich reduziert werden. Auch enge Bruchkanten oder spitze Ecken führen zur Bildung sehr vieler kleiner Dreieckselemente (vgl. Abb. 45: A, B & C).

Für Bruchkanten, die sich berühren, sollte ein identischer Knotenpunkt benutzt werden, da dies sonst oftmals zu kleinen Lücken führt. Für diese Lücken werden von BASEmesh sehr viele Dreieckselemente erzeugt oder es kommt zu einem Abbruch der Netzgenerierung, wenn der Arbeitsspeicher der Hardware nicht ausreicht. Alternativ können sich Bruchkanten auch schneiden, wobei die Schnittlänge lang genug sein sollte (vgl. Abb. 45: D). Die nachfolgende Abbildung 45 zeigt, die im Quality Mesh gefundenen Fehler in den Bruchkanten, die zur Erstellung vieler Dreieckselemente geführt haben.

A)
Enge
Knotenpunkte

B)
Enge Bruchkanten

C)
Spitze Bruchkanten

D)
Lücke zwischen
Bruchkanten

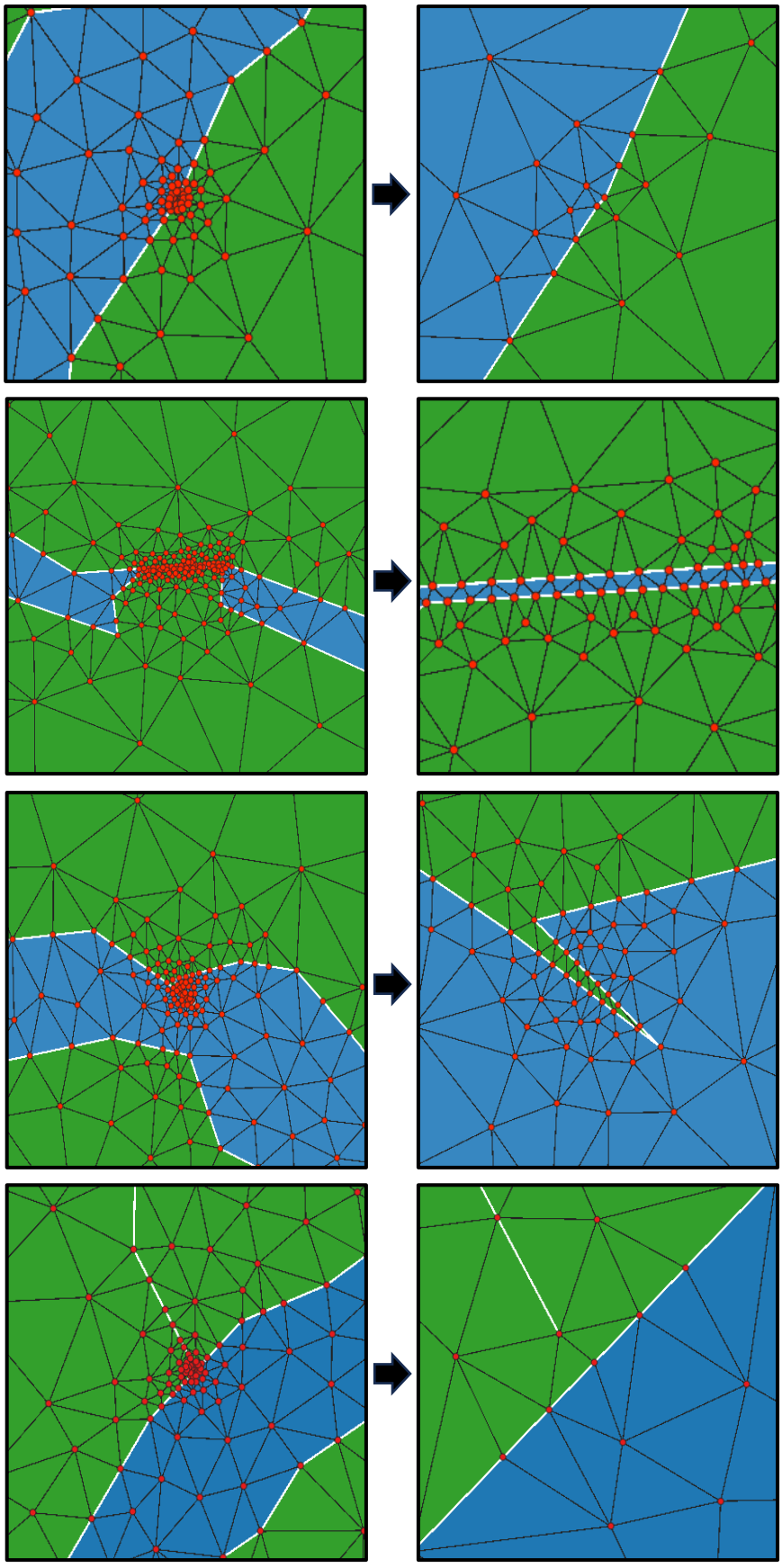


Abb. 45: Quality Mesh mit Bruchkantenfehlern (Eigene Darstellung, 2023)

- Regionspunkte

Die Regionspunkte übergeben den durch die Bruchkanten voneinander abgegrenzten Regionen ihre Eigenschaften. Hierbei kann die maximale Elementgröße (AreaMax) der Dreiecke im Quality Mesh, sowie ein Material Index (MatID) für die jeweiligen Regionen festgelegt werden.

Landschafts-klasse	Maximale Elementgröße (m^3)	Material Index
Nebenarm	30	1
Graben	20	2
Verwaldungszone	1000	3
Offenland	1000	4
Auwald	1000	5

Tabelle 3: Attributwerte der Landschaftsklassen (Eigene Darstellung, 2023)

Über die maximale Flächengröße der Dreieckselemente wird bestimmt, wie genau der Bereich dargestellt wird, da nach der Interpolation mit dem DGM jeder Dreiecksknotenpunkt eine Höheninformation erhält. Je enger die Knotenpunkte zueinander liegen, umso mehr Höheninformationen sind vorhanden und umso genauer wird das Gelände dargestellt. Ein enges Rechennnetz benötigt durch die vielen Informationen jedoch auch eine längere Rechenzeit, weshalb Bereiche mit wenigen Höhenveränderungen, wie in der flachen Au, gröber und Bereiche mit starken Veränderungen, wie die Gewässer, feiner dargestellt werden sollten (vgl. Vetsch et al., 2022e: 52).

Über den Material Index wird in BASEMENT ein Rauhigkeitsbeiwert zugeordnet, wodurch die unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten berücksichtigt werden können (Vetsch et al., 2022e: 50).

Die Regionspunkte können in einem GIS manuell oder über ein Tool automatisiert erstellt werden, welches sich bei einer hohen Anzahl an Regionen empfiehlt. Hierbei müssen den Punkten entsprechende Attributfelder, für die maximale Elementgröße und den Material Index, gegeben werden. Die vergebenen Attributwerte können der Tabelle 3 entnommen werden. Eine nützliche Option ist das Hinzufügen eines Attributfeldes für die Information, ob die Region für die Netzgenerierung des Quality Mesh mitberücksichtigt werden soll. Hierdurch können Regionen ausgegrenzt werden, um die Elementanzahl des Rechennetz und dadurch die Rechenzeit zu reduzieren.

Quality Mesh

Nachdem die drei Eingangsdaten für das Quality Mesh erstellt wurden, kann dieses mit dem QGIS PlugIN BASEmesh erzeugt werden. Dabei müssen die drei Eingangsdaten ausgewählt und zusätzlich für die Regionspunkte die Attributwerte für die Elementgröße und den Material Index vergeben werden. Dabei wurden für die Klassen Nebenarm und Graben kleine

Elementgrößen bis maximal 30m² ausgewählt, da für die teilweise sehr feinen Strukturen eine hohe räumliche Auflösung benötigt wird, damit sie korrekt dargestellt werden. Zu große Elementgrößen führten in Testläufen zur Bildung von großen Elementen, wodurch Höheninformationen der Gewässerverläufe verloren gingen. Dadurch wurden diese Bereiche vom Wasser gar nicht oder erst zeitlich später durchflossen als bei einer Darstellung mit kleineren Elementgrößen. Für die flachen und hohen Auregionen konnten dagegen größere Elementgrößen bis maximal 1000m² ausgewählt werden, da sich die Höhe in diesen Regionen nur noch geringfügig veränderte und die Bildung von kleineren Elementen in Bereichen mit größeren Höhenunterschieden durch die Bruchkanten sichergestellt war. Entlang der Bruchkanten wurden dabei durch die Knotenpunkte, mehr Elemente gebildet, die sich mit zunehmender Entfernung vergrößerten. Dadurch wurden die Übergangsbereiche zwischen den Gewässer- und Auregionen durch kleinere Dreieckselemente abgebildet und zu große Elementgrößenunterschiede verhindert.

Neben der Auswahl der Eingangsdaten müssen die Einstellungen für die Netzerstellung durch den Netzgenerator „TRIANGLE“ festgelegt werden. Hierbei wurden die von BASEMENT vorgeschlagenen Standardeinstellungen für die Netzerstellung durch die „Delaunay“ Triangulationsmethode, sowie einem minimalen Dreieckswinkel von 28° beibehalten (vgl. Abb. 46; Kapitel 4.2; Vetsch et al., 2022e: 52).

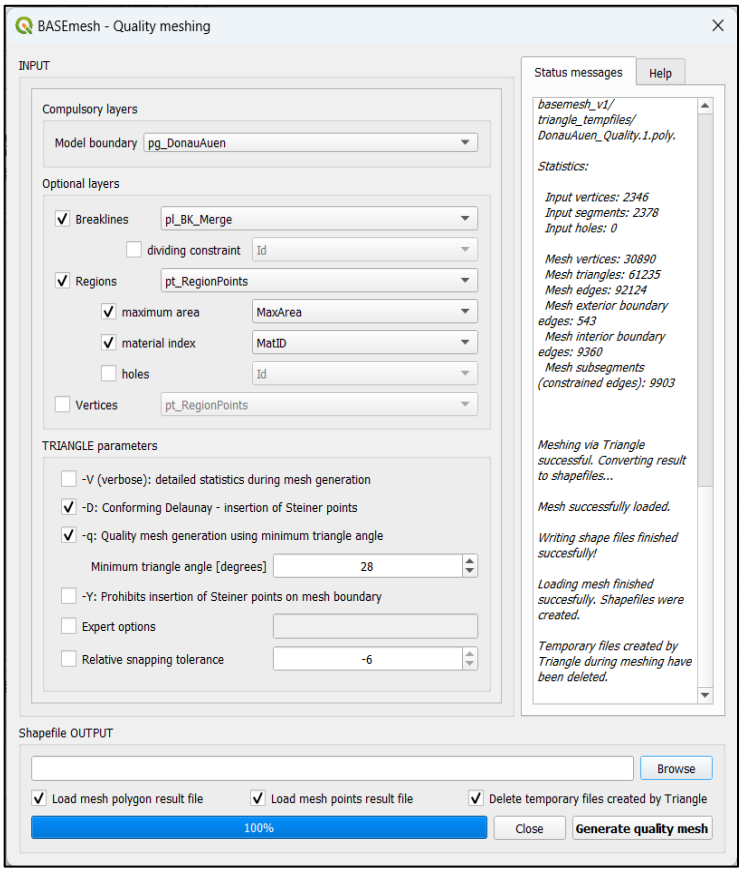


Abb. 46: Erstellung des Quality Mesh mit dem QGIS PlugIn BASEmesh (Eigene Darstellung, 2023)

Für diese Einstellungen erzeugte BASEmesh ein Quality Mesh, aus 61.235 Dreieckselementen und 30.890 Knotenpunkten (vgl. Abb. 46 & 47). Die Erstellung der beiden Dateien im Shape-Format kann dabei je nach Anzahl der zu erstellenden Dreiecke und Stützpunkte eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen. Nachdem das Quality Mesh generiert wurde, kann dieses visuell auf problematische Dreieckselemente überprüft werden. Dabei ist besonders auf die bereits beschriebenen Bruchkantenfehler zu achten, sowie die korrekte Zuweisung der Regionen zu ihrer MatID (vgl. Abb. 47).

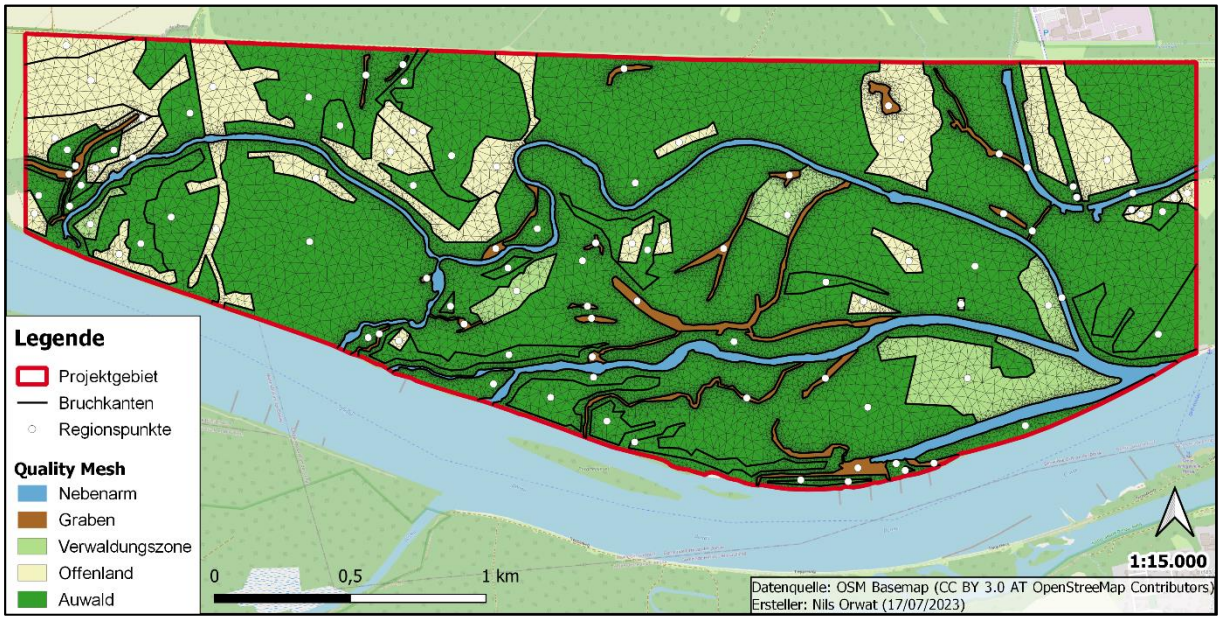


Abb. 47: Quality Mesh (Eigene Darstellung, 2023)

Interpolation & 3D View

Das Quality Mesh beinhaltet bisher keine Informationen zur Höhe, weshalb in einem nächsten Schritt mit BASEmesh den Knotenpunkten, über eine Interpolation, die Z-Werte des digitalen Geländemodells übergeben werden. Danach gibt es mit BASEmesh die Option, eine 3D-Ansicht zu generieren und somit eine erste visuelle Überprüfung des Rechennetz vorzunehmen. Dabei können die Z-Werte um einen Faktor erhöht werden, um die Geländestruktur zu verstärken und Auffälligkeiten leichter auffindbar zu machen.
Nachdem alle Fehler aus dem Rechennetz beseitigt wurden, können die Shapedateien der Dreieckselemente und die interpolierten Knotenpunkte in BASEmesh über die Funktion „Export Mesh“ in das für BASEplane erforderliche 2dm-Format exportiert werden.

5.2.3 Abflussganglinien

Neben den Geometriedateien benötigt BASEMENT die zu simulierenden Abflussganglinien (Hydrographen) als Randbedingung des Modells. Die Daten können dabei auf realen Messwerten beruhen oder für ein zu simulierendes Ereignis erstellt werden (Vetsch et al., 2022e: 30).

Als Datengrundlage wurde auf das Handbuch der kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau von der viadonau zugegriffen (vgl. via donau, 2010). In diesem sind alle wichtigen Pegelstellen und deren Messwerte zu verschiedenen Wasserständen an der österreichischen Donau enthalten. Dazu können die aktuellen Messdaten der viadonau für den Nationalparkbereich auch auf der Website des Landes Niederösterreich abgerufen werden (NOEL, 2023).

Im Nationalpark befinden sich die Pegel Fischamend, Orth, Wildungsmauer, Bad Deutsch-Altenburg, Hainburg-Straßenbrücke und Hainburg (vgl. Abb. 48). Davon liegt der Pegel Fischamend stromaufwärts, der Pegel Orth innerhalb und der Pegel Wildungsmauer stromabwärts des Projektgebiets.

Von der viadonau wurden die Messdaten der Pegelmessstellen auf Anfrage in Form von Wasserstandsdaten und Abflusswerten in 15-Minuten-Intervallen übermittelt. Da beim Pegel Fischamend die Einflüsse des Schönauer Wassers nicht berücksichtigt werden und der Pegel Orth zu nahe an der Seitenarmanbindung der „Großen Binn“ liegt, wurden die hydrologischen Daten für den Pegel Wildungsmauer für die Jahre 2000 bis 2020 als Textdatei bezogen. Für den Pegel Orth wurden zusätzlich die Wasserstandsdaten aus dem KWD (2010) als Referenzwerte herangezogen (vgl. Abb. 48).

Pegelstelle	Art	Ufer	Str.-km	PNP	RNW 2010		MW 2010		HSW 2010		HW_{30}		HW_{100}	
				m ü.A.	WST cm	Kote m ü.A.	WST cm	Kote m ü.A.	WST cm	Kote m ü.A.	WST cm	Kote m ü.A.	WST cm	Kote m ü.A.
KW Freudenau UW	**K**	**R**	**1920,67**	**0,00**	**15083**	**150,83**	**15221**	**152,21**	**15555**	**155,55**	**15811**	**158,11**	**15864**	**158,64**
Donaukanalmündung	S	R	1919,43	149,82	69	150,51	201	151,83	520	155,02	801	157,83	859	158,41
Mannswörth Rohrbrücke	F	R	1917,70	149,00	70	149,70	212	151,12	528	154,28	857	157,57	927	158,27
Barbarabrücke	F	R	1914,24	147,48	88	148,36	239	149,87	547	152,95	869	156,17	938	156,86
Fischamend	S	R	1907,90	143,92	216	146,08	363	147,55	659	150,51	933	153,25	991	153,83
Orth	S	L	1901,72	0,00	14392	143,92	14533	145,33	14809	148,09	15055	150,55	15106	151,06
Wildungsmauer	S	R	1894,72	139,48	162	141,10	293	142,41	564	145,12	832	147,80	895	148,43
Bad Deutsch-Altenburg	S	R	1886,86	137,18	54	137,72	198	139,16	497	142,15	787	145,05	856	145,74
Hainburg Straßenbrücke	S	R	1886,24	136,00	141	137,41	282	138,82	582	141,82	883	144,83	952	145,52
Hainburg	S	R	1883,92	135,25	120	136,45	278	138,03	593	141,18	895	144,20	970	144,95
Bratislava-Devín	SA	L	1879,80	133,45	130	134,75	276	136,21	600	139,45	895	142,40	985	143,30
Thebnerstraßl	S	R	1879,25	133,26	132	134,58	280	136,06	598	139,24	884	142,10	986	143,12
Devín-Lom	FA	L	1876,85	132,34	136	133,70	291	135,25	614	138,48	901	141,35	1001	142,35
Wolfsthal	S	R	1874,84	130,21	283	133,04	437	134,58	749	137,70	1044	140,65	1160	141,81
Berg	F	R	1873,50	129,75	299	132,74	441	134,16	726	137,01	1047	140,22	1167	141,42

Abb. 48: Auszug aus dem KWD (via donau, 2010: 14)

In der Studie von Pekárová et al. (2016) wurden die Abflussganglinien an der österreichischen Donau an 20 verschiedenen Messstationen für die Jahre 1876 bis 2013 analysiert und auf Veränderungen untersucht. Dabei zeigte ein Vergleich der Zeitreihen 1876-1945 und 1945-2013 eine Veränderung in der Form der Abflussganglinien im Bereich zwischen MW und HSW, hin zu steileren Anstiegs- und Abfallraten im Kurvenverlauf, sowie insgesamt höheren Abflussscheiteln. Mit dem HN-Modell sollten diese festgestellten Veränderungen auf Unterschiede in ihrem Überflutungsgeschehen innerhalb der Donau-Auen untersucht werden. Daher wurden für die Simulation zwei unterschiedliche Hydrographen ausgewählt, die sich mit den beschriebenen Formen der Abflussganglinien decken (vgl. Abb. 49).

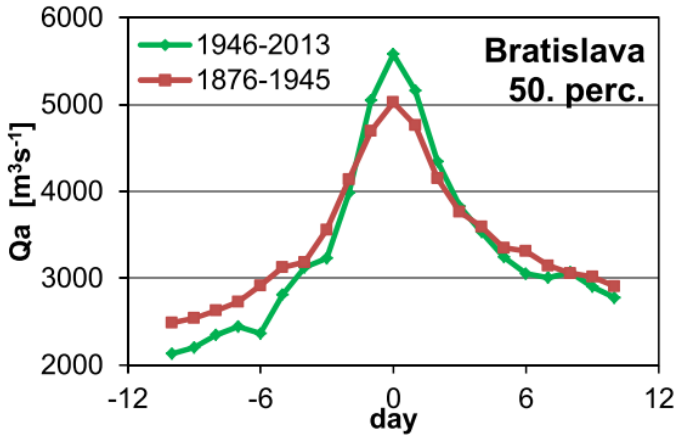


Abb. 49: Median der Abflussganglinien an der Messstation Bratislava für zwei Zeitperioden (Pekárová et al., 2016: 401)

Hierfür wurden aus den Messwerten des Pegels Wildungsmauer für die Jahre 2000 bis 2020 die niedrigen Durchflussimpulse mit einer Laufzeitlänge von maximal 21 Tagen selektiert und diese aufgrund der hohen Anzahl stichprobenartig verglichen. Dabei wurden zwei Abflussganglinien ausgewählt, die sich in ihrer Laufzeit und in ihrem Wellenvolumen ähneln, sowie mit den nach Pekárová et al. (2016) beschriebenen Wellenformen übereinstimmen (vgl. Abb. 49 & 50):

- Die Ganglinie A stellt den zwischen den Jahren 1876 bis 1945 häufiger auftretenden Kurvenverlauf nach und entspricht einer Abflussganglinie aus dem Frühjahr 2004. Sie hat einen stetigen Anstieg bis zur Scheitelhöhe von 4802 m³/s, den sie nach rund 43,5 Stunden erreicht und 1,5 Stunden hält. Danach läuft die Ganglinie in rund 169,75 Stunden wieder auf die Abflusswerte eines MQ ab, womit sie eine Gesamtlaufzeit von 214,75 Stunden aufweist.
- Die Ganglinie B stellt die zwischen 1945 und 2013 nachgewiesene, häufigere Kurvenform dar und durchströmte die Donau im Frühjahr 2016. Sie hat eine sehr viel kürzere Anstiegszeit von nur 23 Stunden und erreicht eine Scheitelhöhe von 5032 m³/s.

Die Ablaufzeit ist mit 169,25 Stunden ähnlich zur Ganglinie A, wobei die Ganglinie B während der Ablaufzeit fast durchgehend geringere Abflusswerte zeigt. Insgesamt hat die Ganglinie B eine Gesamtlaufzeit von 192,25 Stunden.

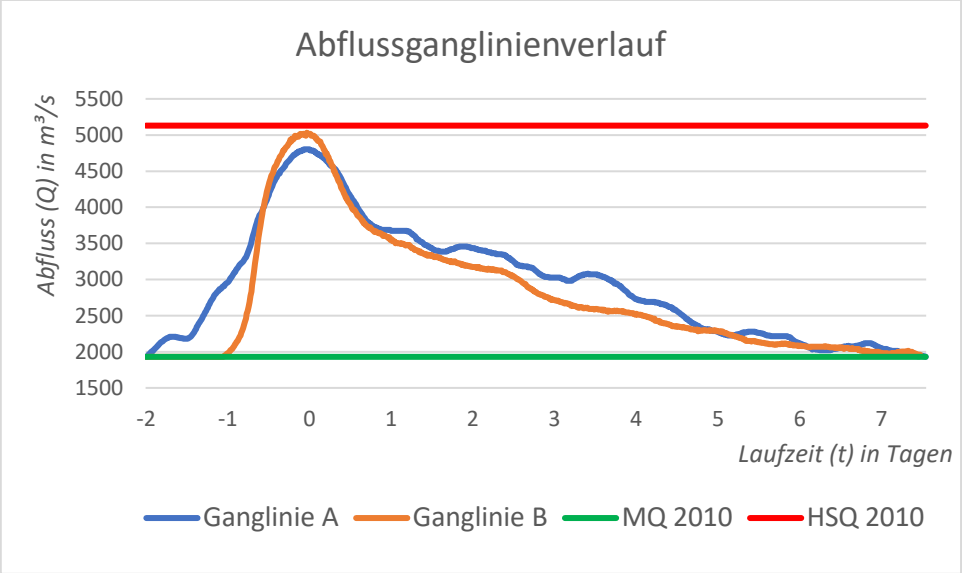


Abb. 50: Vergleich der ausgewählten Abflussganglinien (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK)

Für die Simulation der beiden Abflussganglinien in Kapitel 5.3.4 durch BASEMENT mussten instationäre Hydrographen übergeben werden (vgl. Abb. 51). Hierfür muss jeweils eine Textdatei erstellt werden, in der die Abflusswerte (Q) in Kubikmeter pro Sekunde (m³/s) für die jeweilige Simulationszeit (t) in Sekunden vorgegeben sind. Dafür wurden die von der viadonau bereitgestellten Messdaten der Abflussganglinien für den Pegel Wildungsmauer benutzt und in die notwendige Form gebracht, indem die Zeitintervalle beibehalten, jedoch die Zeitangaben in Sekunden umgerechnet wurden. Die fehlenden Abflusswerte zwischen den Zeitintervallen werden in der Simulation von BASEMENT interpoliert.

Zusätzlich wurden stationäre Hydrographen für die Abflusswerte eines MQ und HSQ erstellt, um mit diesen Gleichgewichtssimulationen durchzuführen (vgl. Kapitel 5.3.2). Da sich der stationäre Abflusswert nicht verändert, muss für die stationären Hydrographen nur ein Abflusswert für den Start- und Endzeitpunkt der Simulation angegeben werden (vgl. Abb. 51).

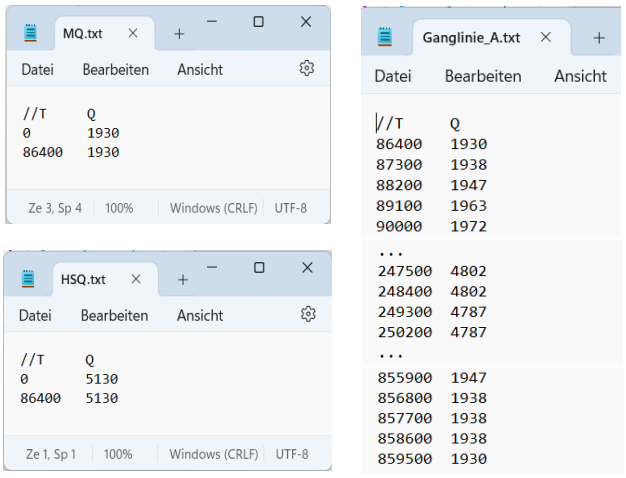


Abb. 51: Stationärer (links) und instationärer (rechts) Hydrograph (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK)

5.3 Modellentwicklung

Nachdem die Daten in die von BASEMENT geforderte Form gebracht wurden, kann das hydrodynamisch-numerische Modell angefertigt werden. Dazu wird zunächst die erstellte Struktur innerhalb BASEMENT erläutert, welche sich vor allem in die Untereinheiten BASEchain, BASEplane und den Kopplungsbereich aufteilen (Kapitel 5.3.1). Anschließend können mit den Eingangsdaten erste Gleichgewichtssimulationen stattfinden, womit die Lauffähigkeit der BASEMENT-Struktur und der Eingangsdaten getestet werden kann (Kapitel 5.3.2). Danach kann man die Modellparameter mit einer Sensitivitätsanalyse auf ihren Einfluss auf die Wasserstandswerte und die Rechenzeit testen, wodurch diese für die anschließende Kalibrierung gezielter angepasst werden können (Kapitel 5.3.3). Die Modellstruktur wurde abschließend mit den kalibrierten Parametern aktualisiert und für die Simulationen der beiden Abflussganglinien freigegeben (Kapitel 5.3.4).
In dem Prozess der Modellentwicklung ist ein ständiges Bearbeiten, Verbessern und Anpassen der Eingangsdaten ein fester Bestandteil (vgl. Kapitel 5.2).

5.3.1 Modellstruktur

Die hydrodynamisch-numerische Modellstruktur in BASEMENT besteht aus den Untereinheiten BASEchain für den eindimensionalen Modellbereich und BASEplane für den zweidimensionalen Modellbereich (vgl. Kapitel 4.2). Da es sich bei dem Modell um ein gekoppeltes System aus zwei Einheiten unterschiedlicher räumlicher Auflösung und Darstellung handelt, gibt es zudem einen Block, indem die Kopplungseinstellungen definiert sind. Daneben müssen in einem weiteren Block immer die physikalischen Eigenschaften angegeben werden. Zusätzlich kann die Anzahl der zu benutzenden Computerkerne eingestellt werden, um die Rechenzeiten der Simulation zu beeinflussen. Die Struktur wird im Folgenden beschrieben und kann der darauffolgenden Abbildung 54 entnommen werden:

Öffnet man die Software BASEMENT_v2.8.2 gelangt man in der grafischen Benutzeroberfläche über „Edit Command“ in den BASEMENT Command File Editor. In diesem Editor können über einen Reiter die Blöcke und ihre „Tags“ ausgewählt werden und die Modellstruktur erstellt werden. Dazu vergibt man seinem Projekt zunächst einen passenden Namen und erstellt die Domain, in der die einzelnen Untereinheiten miteinander verknüpft werden. In der Domain müssen die fünf Blöcke PHYSICAL_PROPERTIES, BASECHAIN_1D, BASEPLANE_2D, COUPLINGS und PARALLEL erstellt werden.

Der erste Block PHYSICAL_PROPERTIES definiert die physikalischen Eigenschaften des Modells. Dazu gehört die Schwerkraft, die Viskosität und die Dichte. Die Werte werden hier bereits von BASEMENT für Wasser vorgegeben und können übernommen werden.

Anschließend können die beiden Blöcke BASECHAIN_1D und BASEPLANE_2D erstellt werden, die beide wiederum aus den Unterblöcken: GEOMETRY, HYDRAULICS; TIMESTEP und OUTPUT bestehen.

Im GEOMETRIE-Block wird die jeweilige Geometriedatei über den Tag „file“ importiert. Zusätzlich muss für BASECHAIN_1D die Reihenfolge der Querprofile angegeben werden. Bevor die 1D-Geometrie in die Modellstruktur integriert wird, empfiehlt sich eine vorherige Überprüfung der aus BASEmesh exportierten Querprofile. Über die BASEMENT Benutzeroberfläche kann die 1D-Geometrie unter *„Edit 1-D Grid“* geladen und jedes einzelne Querprofil überprüft werden (vgl. Abb. 52). Dabei können den Querprofilen verschiedene Tags, wie z.B. der Wasserströmungsbereich oder Rauhigkeitsbeiwerte vergeben werden. Die Rauhigkeitsbeiwert wurde hierbei aufgrund der nach Chow et al. (1959: 109ff) und Jirka & Lang (2009: 23) vorgeschlagenen Strickler-Werte zwischen 30 bis 40 für Flussbetten zunächst auf einen Wert von 35 eingestellt. Zusätzlich muss der für die Simulation aktive Querprofilbereich eingestellt werden, mit dem sich auch Bereiche des Querprofils ausgrenzen lassen. Hierbei ist darauf zu achten, dass der aktive Bereich die linke Querprofilgrenze inkludiert, da hierüber der Austausch mit dem 2D Bereich stattfindet (Vetsch et al., 2022d: 152). Da in diesem Fall die Querprofile nur den Flussbereich darstellen, wurde der gesamte Querprofilbereich als aktiv ausgewählt und die zusätzlichen Tags vernachlässigt.

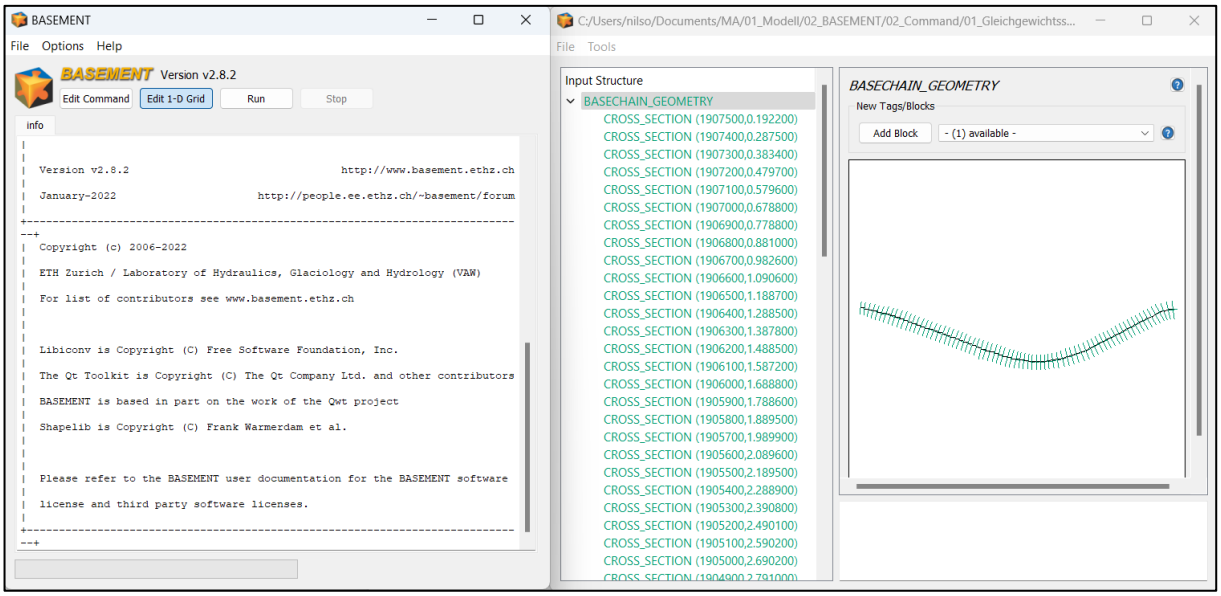


Abb. 52: BASEchain Geometrie im BASEMENT GUI (Eigene Darstellung, 2023)

Im HYDRAULICS-Block werden die Modellgrenzen (BOUNDARY) für den jeweiligen Modelleingang und -ausgang der Untereinheiten übergeben, sowie Blöcke für die Reibungseinstellungen (FRICTION), die Anfangsbedingungen (INITIAL) und zusätzliche Parameter definiert (PARAMETER).
In BASECHAIN_1D wird die Modellgrenze für den Eingang über einen Hydrographen der Abflussganglinie als Textdatei bestimmt, der den Abfluss (Q) zur Simulationszeit (t) für das erste Querprofil flussaufwärts vorgibt. Der Hydrograph muss dabei mindestens einen Abflusswert zu Beginn und Ende der Simulation enthalten (vgl. Kapitel 5.2.3). Für den Modellausgang wurde der Typ hq-relation ausgewählt, bei dem das bekannte Verhältnis aus Abfluss und Wassertiefen genutzt wird und mit der gegebenen Topografie und dem Gefälle berechnet wird (Vetsch et al., 2022b: 94). Das Gefälle der Donau ist dabei mit 0,46‰ bekannt (Stadt Wien, 2023). In BASEPLANE_2D gibt es dagegen keinen Block für die Modellgrenze, da die Abflüsse nur über die BASEchain Geometrie lateral in das 2D-Modellgebiet ein- oder ausströmen können.
In den Reibungseinstellungen müssen der Reibungskoeffizient und die Rauhigkeitsbeiwerte ausgewählt werden. Dabei wurde der Strickler-Koeffizient ausgewählt und für die 2D-Geometrie die Reibungsbeiwerte für die Material Indexwerte übergeben (vgl. Kapitel 5.2.2). Als Rauhigkeitsbeiwerte wurde jeweils der Mittelwert aus den nach Chow et al. (1959: 109ff) empfohlenen Wertebereichen ausgewählt. Die Werte werden in der Sensitivitätsanalyse präsentiert (vgl. Kapitel 5.3.3).
Die Anfangsbedingungen der beiden Modellbereiche wurden für die Gleichgewichtssimulation zunächst in einem trockenen Zustand festgelegt. Nachdem das Modell im Gleichgewicht ist, kann der Modellzustand als neuer Startpunkt für eine Hochwassersimulation benutzt werden. Dafür muss die Anfangsbedingung von „dry“ auf „continue“ umgestellt und die bei der Gleichgewichtssimulation erzeugten Restart-Dateien für die Geometriedateien über einen „file“ Tag geladen werden.
Im Parameter-Unterblock können allgemeine numerische Parameter für die hydraulische Simulation angegeben werden, wie z.B. die minimale Wassertiefe, das Simulationsschema oder die Lösungsgleichung für das Riemann Problem (vgl. Kapitel 4.2). Als minimale Wassertiefe, bis zu der noch ein Abfluss simuliert wird, wurde ein Wert von 0,05m ausgewählt. Das Simulationsschema und die Lösungsgleichung für das Riemann Problem wurden auf ihren Standardwerten „explicit“ und „roe“ belassen.

Im TIMESTEP-Block werden weitere numerische Parameter, die einen Zusammenhang mit der Zeit haben, für die Simulation festgelegt. Erforderlich ist dabei die Angabe der Simulationslaufzeit. Zusätzlich vorgegebene Parameter, wie die Zeitschritte oder die CFL-Nummer, können angepasst werden, um die Laufzeit und -stabilität der Simulation

anzupassen. Für die Parameterauswahl wurden die Standardwerte benutzt, die in beiden Modellbereichen identisch sein sollten.

Im OUTPUT-Block müssen für BASEchain und BASEplane noch die Ausgabedaten angegeben werden. Für BASEchain sollten für die Querprofile am Modelleingang und -ausgang die berechneten Wasserstände und Abflüsse für alle 15 Minuten der Simulationszeit in eine Datenbankdatei (.dat) geschrieben werden. Für BASEplane sollten die Geschwindigkeit, Wassertiefe und der Wasserstand für jeden Knotenpunkt des Triangulationsnetzes ebenfalls im 15 Minutentakt ausgegeben werden. Als Ausgabeformat wurde „sms“ ausgewählt, womit eine .sol-Datei erzeugt wird, die in QGIS für den zugehörigen TIN-Layer geladen werden kann. Dazu wurde in BASEplane der Output „BASEviz“ ausgewählt, wodurch die Simulation mit einem grafischen Interface beobachtet werden kann.

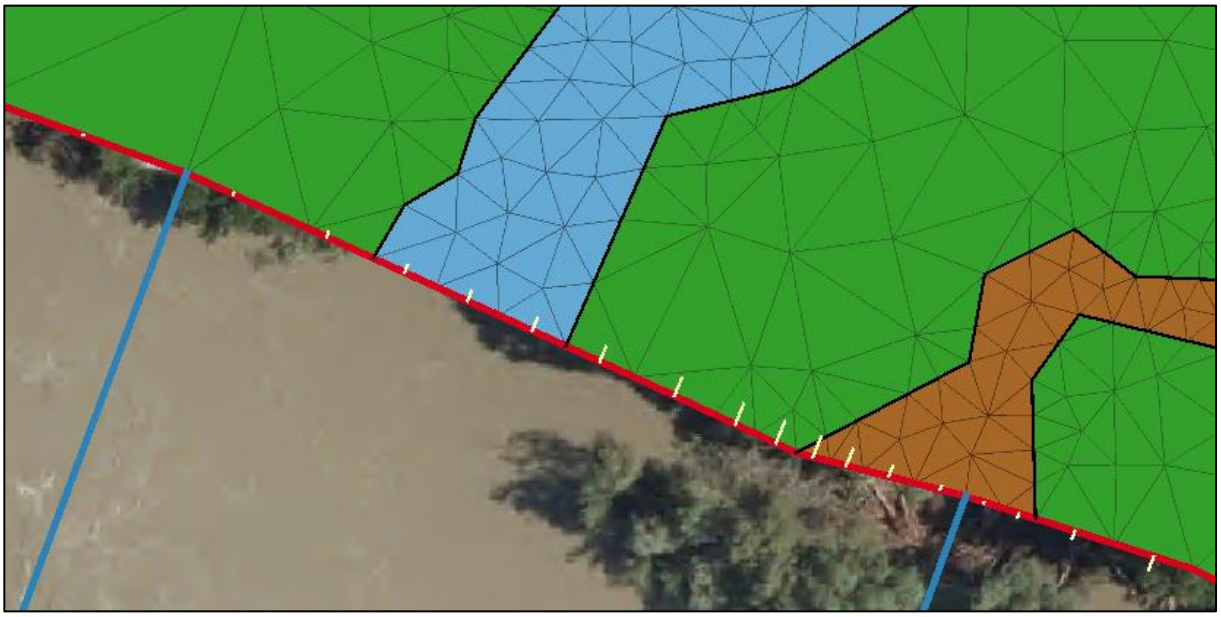


Abb. 53: Verbindungsstellen der lateralen Kopplung (weiß) (Eigene Darstellung, 2023)

Nachdem die beiden Blöcke BASECHAIN_1D und BASEPLANE_2D fertig erstellt wurden, müssen diese im COUPLINGS-Block miteinander verbunden werden. Da es sich um eine seitliche Verbindung der beiden Modellbereiche handelt, muss der Unterblock COUPLING_LATERAL hinzugefügt werden. In diesem müssen die beiden Modellbereiche ausgewählt und die Verbindungsstellen, an denen es zum Austausch der Abflüsse kommt, definiert werden. BASEMENT verfügt über die Option die Verbindungen automatisch zu finden und zu erstellen. Hierfür muss der Tag „connections_automatic“ auf „yes“ gestellt und die Distanz der Verbindungsstellen, sowie die Material Indexwerte der Elemente zu denen Verbindungen erstellt werden sollen, angegeben werden. Zusätzlich muss ausgewählt werden, ob die Höheninformationen für die Verbindungen aus der 1D oder 2D-Geometrie übernommen wird. Hierbei empfiehlt sich die 2D-Geometrie auszuwählen, da diese durch das

DGM über genaue Höhenangaben verfügt, wohingegen die Höhe zwischen den 1D Querprofilen interpoliert wird. Mit diesen Einstellungen kann das Modell gestartet werden, um die Datei mit den Verbindungsstellen zu erzeugen. Zusätzlich zur .dat-Datei wird die Verbindungsdatei auch im Shapeformat erstellt, um diese in einem GIS überprüfen zu können (vgl. Abb. 53). Anschließend kann der Tag „connections_automatic“ auf „no“ gestellt und die Verbindungsdatei unter dem Tag „connections_filename“ importiert werden.

Mit dem letzten Block PARALLEL kann die Anzahl der zu verwendenden Computerkerne für die Simulation bestimmt werden. Dabei bestimmt die verwendete Hardware über die maximale Anzahl der Kerne. Die Nutzung mehrerer Kerne kann die Rechenzeit der Simulation beschleunigen.

Die komplette BASEMENT Modellstruktur für die Simulation zeigt die nachfolgende Abbildung.

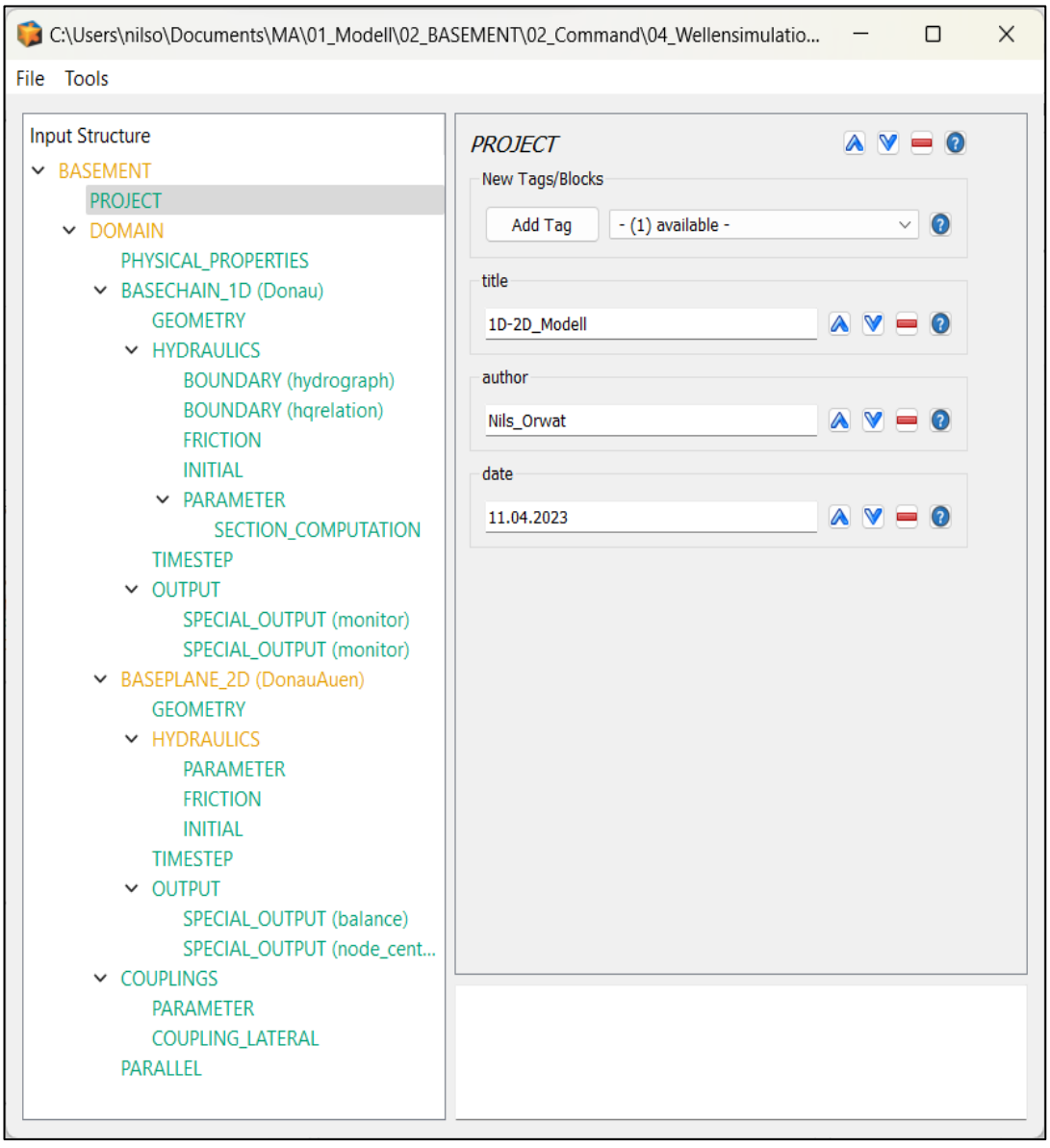


Abb. 54: BASEMENT Modellstruktur (Eigene Darstellung, 2023)

5.3.2 Gleichgewichtssimulationen

Die Modellstruktur und Geometriedateien wurden zunächst mit einer Gleichgewichtssimulation getestet. Bei einer Gleichgewichtssimulation wird ein konstanter Abflusswert für den Modelleingang übergeben und die Simulation so lange durchgeführt, bis ein Gleichgewicht zwischen dem in das Modellgebiet einströmenden und ausströmenden Abflusswerten erreicht wird. Dadurch kann die Massenerhaltung des Modells überprüft und Elemente in den Geometriedateien, die zu Problemen in der numerischen Berechnung führen, detektiert werden (Vetsch et al., 2022d: 124).
Hierfür wird von BASEMENT automatisch eine Textdatei ausgegeben, indem die Elemente, die zu Problemen führen, aufgelistet sind. Durch eine Verbesserung dieser Elemente kann die Stabilität und Performance des Modells verbessert werden. Für die Gleichgewichts-simulationen wurden die Abflusswerte für den MQ und HSQ (2010) aus dem KWD für den Pegel Wildungsmauer genutzt und als Hydrograph in BASEchain integriert (vgl. Kapitel 5.2.3; via donau, 2010; via donau, 2021: 3). Dabei wurde zunächst nur der 1D Modellbereich mit dem mittleren Abflusswert von 1930m³/s als stationärer Abflusswert simuliert, um die Lauffähigkeit der 1D-Geometrie zu gewährleisten. Der Ausfluss am Modellausgang näherte sich dabei in den ersten drei Simulationsstunden bis knapp vor die Zuflusswerte (99,3%) am Modelleingang an und erreichte schließlich nach 10,25h ein Gleichgewicht (100%) in den Abflusswerten (vgl. Abb. 55). Die Rechenzeit für die Gleichgewichtssimulation betrug lediglich drei Sekunden, wobei die Dauer der Rechenzeit und die Simulationszeit bis zum Erreichen eines Gleichgewichts von der Geometrie abhängt.

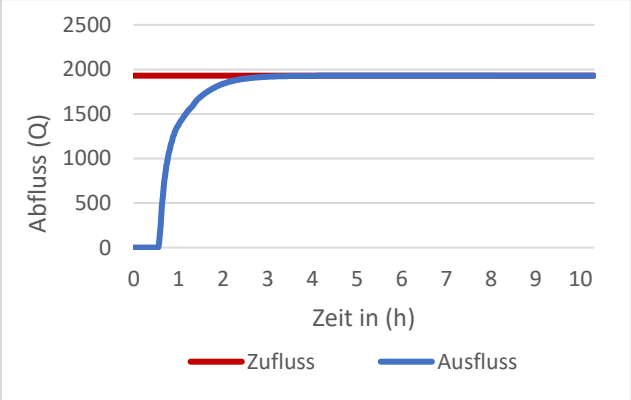


Abb. 55: Abflusswerte der Gleichgewichtssimulation für ein stationären MQ (Eigene Darstellung, 2023)

Anschließend wurde das gekoppelte 1D-2D Modell mit dem HSQ-Wert von 5130m³/s als stationärer Abflusswert simuliert, um wiederum die Lauffähigkeit des gekoppelten Modells zu überprüfen. Dabei stieg der Abflusswert am Modellausgang in den ersten vier Stunden schnell bis knapp unter ein HSQ und näherte sich danach langsam einem Gleichgewichtszustand (Abb.56).

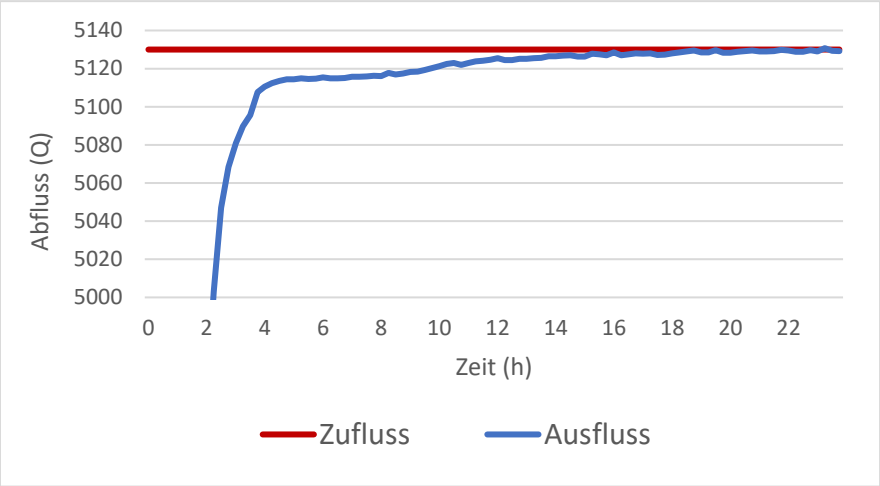


Abb. 56: Abflusswerte der Gleichgewichtssimulation für ein stationären HSQ (Eigene Darstellung, 2023)

5.3.3 Sensitivitätsanalyse und Kalibrierung

Bevor das hydrodynamisch-numerische Modell für die Wellensimulationen benutzt werden kann, muss dieses anhand realer Messwerte kalibriert werden (Vetsch et al., 2022d: 131). Ein HN-Modell korrekt zu kalibrieren, erfordert jedoch aufgrund der vielen Einstellungsmöglichkeiten und Umweltfaktoren viel Erfahrung und Gebietswissen. Deshalb sollen hier nur die Ansätze zur Kalibrierung gezeigt werden.

Vor der Kalibrierung empfiehlt es sich eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen, um die jeweilige Sensitivität der Modellparameter auf die simulierten Wasserstände zu erhalten (Vetsch et al., 2022d: 124). Hierbei wird jeweils ein Parameterwert angepasst und deren Auswirkungen auf den Wasserstandswert beobachtet. In der durchgeführten Sensitivitätsanalyse wurden die Parameter Steigung, Rauhigkeitsbeiwert (kSt), Riemann Löser und die Randbedingung am Modellausgang getestet.

Für die Sensitivitätsanalyse wurde jeweils eine Simulation mit Standardwerten und eine mit veränderten Sensitivitätswerten durchgeführt. Die Standardwerte wurden für den Riemann Löser und die Randbedingung aus den vorgeschlagenen Werten in BASEMENT, welche über den Informationsbutton im Command File Editor eingesehen werden können, übernommen. Für den Parameter Steigung wurde die Steigung der Donau verwendet und für die Rauhigkeitsbeiwerte (kSt) die von Chow et al. (1959: 109ff) empfohlenen mittleren Werte für Fließgewässer und Vegetation (vgl. Stadt Wien, 2023). Anschließend wurden die Zahlenwerte um 10% reduziert und die beiden Simulationsergebnisse auf ihren Wasserstand verglichen.

Zusätzlich wurde der Einfluss der Modellparameter CFL, OutputTimeStep, maxTimeStep, SecCom_Table und Special_Output (BASEviz) auf die Rechenzeit des Modells untersucht. Neben diesen Modellparametern war durch die vorangegangene Erstellung des Rechengitters bereits bekannt, das sich eine höhere Anzahl von Elementen und

Knotenpunkten im Rechennetz in einer längeren Rechenzeit auswirkt (vgl. Kap. 5.2.2).
Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse können der nachfolgenden Tabelle 4 entnommen werden.

Parameter	Standardwert	Sensitivitätswert	Wasserstand	Rechenzeit
Steigung	0,46	-10%	Erhöhung	/
kSt (1D)	35	-10%	Erhöhung	/
kSt (2D)	35	-10%	Erhöhung	/
Riemann Löser	exact	HLLC	/	/
Randbedingung	hq-relation	zero-gradient	Reduzierung	/
Rechennetz (Elemente/Knoten)	61.235 ; 92.124	-10%	Erhöhung / Reduzierung	Reduzierung
CFL	0.95	-10%	/	Erhöhung
maxTimeStep	100s	-10%	/	Reduzierung
OutputTimeStep	900s	-10%	/	Erhöhung
Special Output	/	BASEviz	/	Erhöhung
Rechenkerne	1	4	/	Reduzierung

Tabelle 4: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse (Eigene Darstellung, 2023)

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Sensitivitätsanalysen wurde das HN-Modell für einen stationären HSQ (5130m³/s) kalibriert, indem die Modellparameter schrittweise angepasst wurden, bis die simulierten Wasserstandswerte am Stromkilometer 1901,7 mit den Werten vom Pegel Orth (1901,72) bestmöglich übereinstimmten.
Der Riemann Löser und die Randbedingung des Modellausgangs blieben auf ihren Standardeinstellungen, da diese keine bzw. nur eine einmalige Veränderung bewirkten.

Die Steigung der Donau wurde auch nicht verändert, da diese im Bereich von Wien mit 0,46‰ bekannt ist (Stadt Wien, 2023).
Die Rauhigkeitsbeiwerte für den 2D Modellbereich wurden ihren Landschaftsklassen entsprechend nach den Empfehlungen von Chow et al. (1959: 109ff) angepasst. Hierbei gilt, je niedriger der Strickler-Wert, desto rauer die Oberfläche und umso langsamer kann das Wasser über die Oberfläche fließen, was sich in einem erhöhten Wasserstand bemerkbar macht. Die Rauhigkeitsbeiwerte des 2D Modellbereichs zeigten jedoch nur eine geringfügige Sensitivität gegenüber den Wasserstandsveränderungen am Modellausgang. Allerdings resultierte eine Reduzierung der Rauhigkeitsbeiwerte für den 2D Modellbereich in einem größeren Wasservolumen und mehr Überflutungsflächen im Gebiet. Eine Kalibrierung dieser Parameter war jedoch aufgrund fehlender Referenzwerte im 2D Modellbereich nicht möglich, weshalb diese für die Kalibrierung nicht weiter angepasst wurden. Für die Kalibrierung war vor allem der kSt-Wert für den 1D Modellbereich ausschlaggebend, da er eine hohe Sensitivität auf die Wasserstandswerte zeigte. Dabei konnte mit einem kSt-Wert von 31 ein Wasserstandswert am Pegel 1901,7 von 148,096m erzielt werden. Dieser Wert war dem

Referenzwert von 148,09m am Pegel Orth sehr nahe, womit das Modell als kalibriert betrachtet werden kann. Die beschriebene Modellstruktur wurde daher um die in Tabelle 5 gelisteten Rauhigkeitsbeiwerte für BASEplane aktualisiert.

Landschaftsklasse	kStmin	kStmax	Kalibrierungswert
Nebenarm	25	33	29
Graben	18	25	22
Verlandungszone	9	22	16
Offenland	25	50	38
Auwald	5	12,5	8

Tabelle 5: Rauhigkeitsbeiwerte für die Landschaftsklassen (Eigene Darstellung, 2023; Werte nach Chow et al. (1959: 109ff)

Das visuelle Ergebnis der stationären Simulation des kalibrierten Modells für ein HSQ in BASEviz zeigt dabei deutliche Veränderungen im Überflutungsausmaß im Vergleich zur selben Simulation mit dem unkalibrierten Modell aus der Gleichgewichtssimulation (vgl. Abb. 57). Dies verdeutlicht, wie entscheidend die korrekten Einstellungen der Modellparameter sind und welchen Einfluss sie auf das Simulationsergebnis haben können.

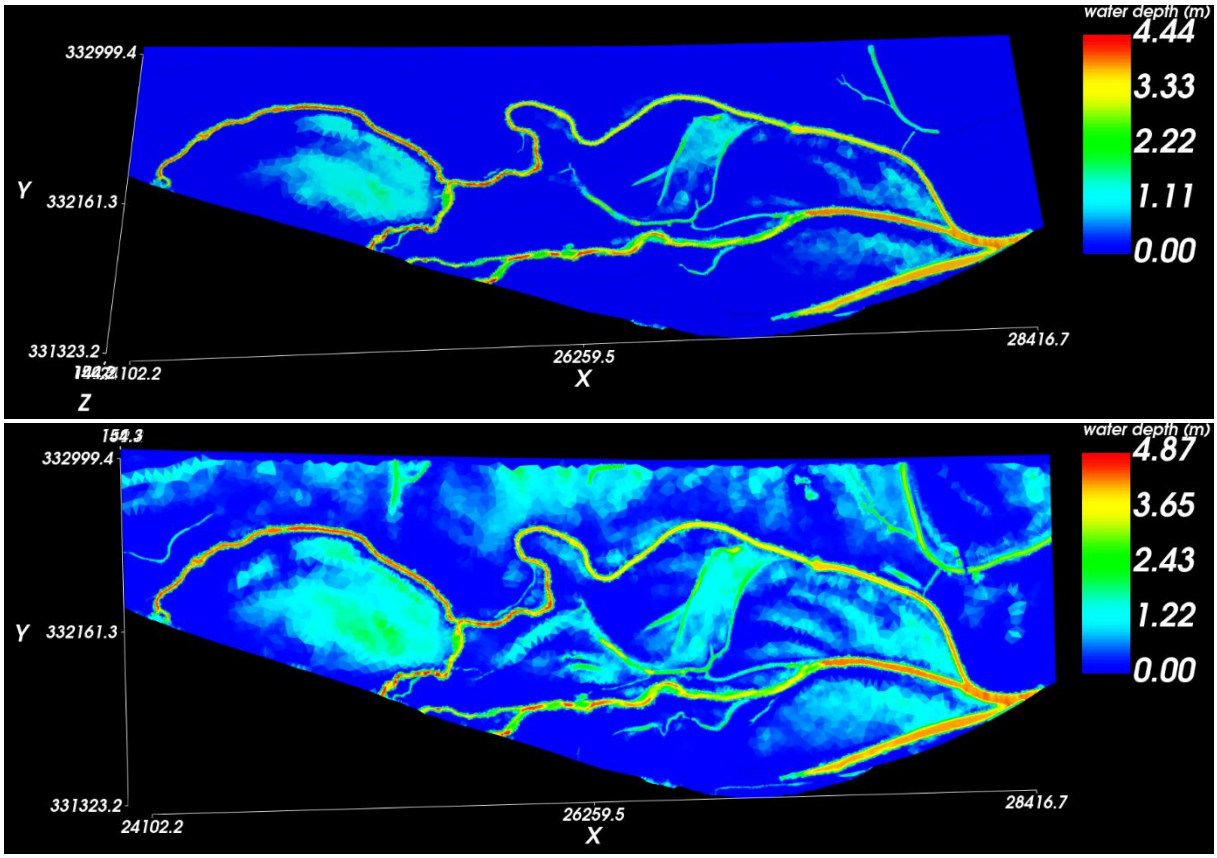


Abb. 57: Unkalibrierter (oben) und kalibrierter (unten) 2D Modellbereich für HSQ in BASEviz Rechenzeiten: 05h18min (oben) & 06h33min (unten) für 24h Simulationszeit (Eigene Darstellung, 2023)

5.3.4 Simulationen

Mit dem kalibrierten 1D-2D hydrodynamisch numerischen Modell konnten schließlich die in Kapitel 5.2.3 ausgewählten Abflussganglinien simuliert werden. Da die Start- und Endzeit der Abflussganglinien bei einem MQ liegt, muss das Modell zunächst bis zu diesen Abflusswerten simuliert werden. Hierfür wurde das Modell, für einen stationären MQ-Hydrographen bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustands simuliert, um sicherzustellen, dass alle von einem MQ beeinflussten Bereiche bereits durchströmt sind und die Abflussganglinien somit nicht ihr Wellenvolumen für die Überflutung dieser Bereiche nutzen muss (vgl. Kapitel 5.3.2). Dieser Modellzustand wurde anschließend als Startzeitpunkt für die beiden Abflussganglinien ausgewählt (vgl. Abb. 58).

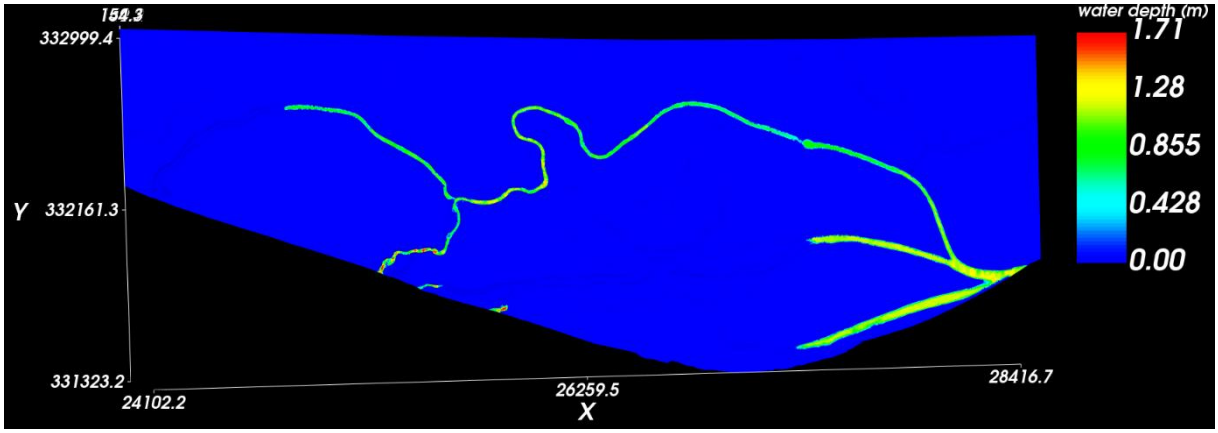


Abb. 58: Kalibrierter 2D Modellbereich im Gleichgewichtszustand für MQ in BASEviz (Eigene Darstellung, 2023)

Bevor die beiden Abflussganglinien simuliert werden konnten, musste die BASEMENT Modellstruktur noch um ihre neuen Anfangsbedingungen angepasst werden. Hierfür wurde die Anfangsbedingungen von „dry“ auf „continue“ geändert und die Restart-Dateien für die 1D und 2D Geometrie ausgewählt. Dazu musste die Simulationslaufzeit für BASEMENT, sowie die Zeiten in den Hydrographen um die bereits durchlaufene Simulationszeit der Gleichgewichtssimulation angepasst werden. Für BASEplane wurde im OUTPUT-Block die Ausgabe von Informationen über den Wasserstand, die Wassertiefe und die Fließgeschwindigkeit im 15-Minutentakt ausgewählt. Als Ausgabeformat wurde „sms“ ausgewählt, womit eine .sol-Datei erzeugt wird (vgl. Kapitel 5.3.1).

Da die beiden Abflussganglinien eine Simulationslaufzeit von 214,75 bzw. 192,25 Stunden aufweisen, wurden für die Simulationen die rechenzeit-sensitiven Parameter angepasst (vgl. Kapitel 5.3.2). Hierfür wurden die Ausgabeintervalle für die BASEchain Querprofile von 15 auf 60 Minuten erhöht, sowie die maximalen Zeitschritte in den TIMESTEP-Blöcken von 100s auf 60s reduziert. Zusätzlich wurde auf die visuelle Beobachtung der Simulation mit BASEviz verzichtet und die für die Simulation zu verwendenden Computerkerne auf vier Kerne erhöht.

Die vollständigen BASEMENT Modellstrukturen mit allen Einstellungen für die beiden Abflussganglinien sind als Anhang beigefügt.

Mit diesen Modelleinstellungen wurde die Abflussganglinie A, welche eine Simulationslaufzeit von 214,75 Stunden aufweist, in einer Rechenzeit von 32h 02min 37s simuliert. Dies entspricht einer Beschleunigung der Simulationslaufzeit um den Faktor 6,7. Die Abflussganglinie B, mit einer Simulationslaufzeit von 192,25 Stunden, konnte in einer Rechenzeit von 29h 37min 55s simuliert werden. Damit wurde die Simulationslaufzeit um den Faktor 6,5 beschleunigt. Die Ergebnisse der Simulationen werden im folgenden Ergebniskapitel beschrieben.

6 Ergebnisse

Dieses Kapitel widmet sich den Simulationsergebnissen der im vorherigen Kapitel 5.3.4 durchgeführten Simulationen der beiden Abflussganglinien. Die Ergebnisse der Simulationen werden dabei für die nachfolgend beschriebenen Bereiche präsentiert:

- Kapitel 6.1: Hydrologische Ergebnisse
  Für die Querprofile in BASEchain werden in der Simulation die Wasserstände und Abflüsse ermittelt. Die Werte können mit den von der viadonau gemessenen Wasserständen am Pegel Orth verglichen werden und eine Tendenz über die Korrektheit der Daten geben. Zusätzlich kann mit einem Vergleich der Abflusswerte am Modellein- und -ausgang, der Einfluss des Projektgebiets auf eine Scheitelabminderung und -verzögerung festgestellt werden. Des Weiteren kann für das Projektgebiet das vorhandene Wasservolumen ausgegeben und somit mögliche Unterschiede im Retentionsvermögen für die Abflussganglinien ermittelt werden.
- Kapitel 6.2: Fließverlauf
  Mit der zeitlichen Entwicklung des Überflutungsgeschehens innerhalb des Projektgebiets können Unterschiede im Fließverhalten zwischen den beiden Abflussganglinien detektiert werden. Hierfür müssen die Simulationsergebnisse in einem GIS visualisiert und analysiert werden. Das Fließverhalten wird jeweils für beide Abflussganglinien beschrieben und Unterschiede hervorgehoben.
- Kapitel 6.3: Fließgeschwindigkeit
  Für die einzelnen Projektbereiche werden die Geschwindigkeitsverläufe an entscheidenden Punkten aufgezeigt und für die beiden Abflussganglinien verglichen. Hierdurch werden die für das Fließverhalten entscheidenden Bereiche aufgedeckt. Zusätzlich wird die Wellenausbreitung im Projektgebiet offensichtlicher.
- Kapitel 6.4: Überflutungsflächen
  Der Verlauf der überfluteten Flächen im Projektgebiet wird für beide Ganglinien dargestellt. Hierbei werden die Überflutungsflächen auch auf ihre Wassertiefe miteinander verglichen.
- Kapitel 6.5: Überflutungsvolumen
  Für beide Abflussganglinien wird der Verlauf des Wasservolumens im Projektgebiet erhoben und verglichen.

6.1 Hydrologische Ergebnisse

Für die Simulationen der beiden Abflussganglinien wurden die Abfluss- und Wasserstandswerte am Modellausgang (Str.km: 1901,7) von BASEMENT in einstündigen Zeitabständen ausgegeben. Ein Vergleich des Ganglinienverlaufs mit den real gemessenen Daten am Pegel Orth (Str.km: 1901,72) zeigt dabei für beide Abflussganglinien einen vergleichbaren Kurvenverlauf. Für die Ganglinie A weichen die Wasserstände im Mittel um 23cm und für die Ganglinie B um 5cm vom Referenzpegel Orth ab. Die Höhe des Scheitelpunkts ist für die Ganglinie A identisch zum Referenzpegel und für die Ganglinie B um 6cm reduziert (vgl. Abb. 59).

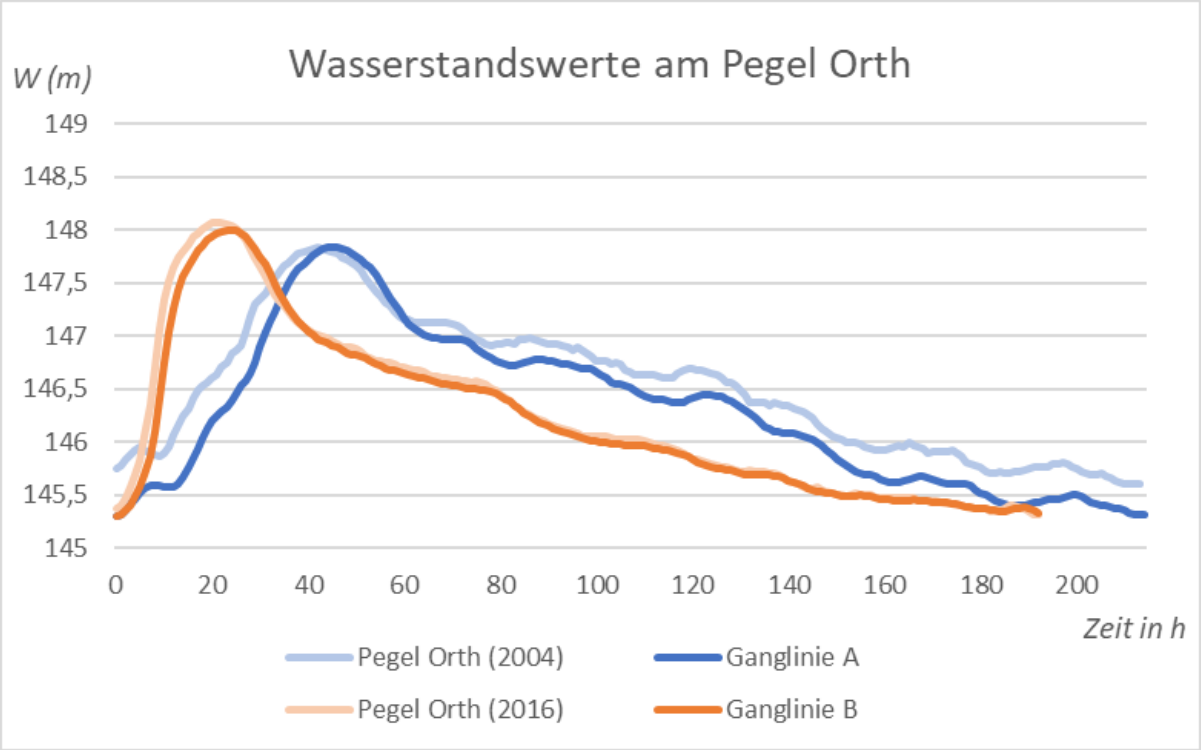


Abb. 59: Vergleich der Wasserstandswerte zwischen den simulierten Abflussganglinien und den Messwerten am Pegel Orth (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK)

Der Vergleich der Abflusswerte am Modellein- und -ausgang zeigt für beide Abflussganglinien eine Verformung der Wellenform. Dabei weisen die Abflussganglinien am Modellausgang eine Reduktion der Abflusswerte in der Anstiegszeit und am Scheitelpunkt auf, sowie eine Erhöhung der Abflusswerte in der Ablaufzeit. Dadurch verschieben sich die Scheitelpunkte zeitlich gesehen, was zu einer Verzögerung der Abflussganglinien führt (vgl. Abb. 60).

Für die Ganglinie A reduzieren sich die Abflusswerte in der Anstiegszeit um bis zu 94m³/s, mit einer durchschnittlichen Reduktion von 46m³/s, der Scheitelpunkt reduziert sich um 20m³/s und verschiebt sich um 17 Minuten. Rund 90 Minuten nachdem der Scheitelpunkt das Projektgebiet passiert hat, beginnen die Abflusswerte am Modellausgang die des Modelleingangs zu übersteigen und bleiben dabei fast über die gesamte Ablaufzeit über

diesen, mit Differenzen von durchschnittlich 37m³/s und einem Spitzenwert von bis zu 63m³/s.

Für die Ganglinie B zeigt sich eine Reduktion der Abflusswerte innerhalb der Anstiegszeit von bis zu 206m³/s, mit einem Durchschnittswert von 78m³/s. Der Scheitelpunkt reduziert sich um 38m³/s und verschiebt sich am Modellausgang um 66 Minuten. Erst nach 137 Minuten übertreffen auch hier die Abflusswerte die des Modelleingangs mit durchschnittlich 43m³/s, bei einem Spitzenwert von 100m³/s (vgl. Abb. 60).

Die Abbildung 60 zeigt den Vergleich der Scheitelpunkte zwischen dem Modellein- und -ausgang für beide Ganglinien, sowie zu ihren Abflussdifferenzen über entsprechende Balken.

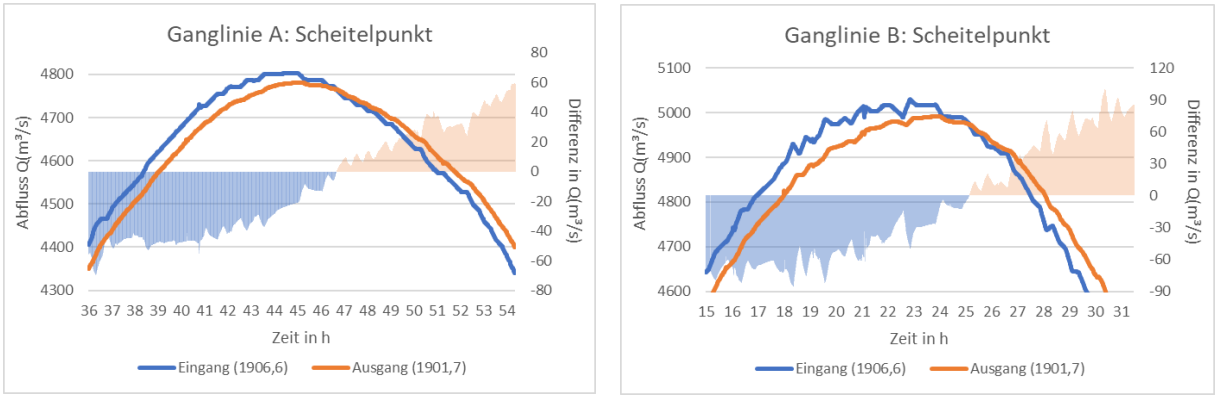


Abb. 60: Vergleich der Scheitelpunkte zwischen den Modellein- und -ausgang für beide Abflussganglinien (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK)

6.2 Fließverlauf

Der Fließverlauf der beiden Abflussganglinien innerhalb des Projektgebiets wurde von BASEMENT in 15-minütigen Abständen in Form von Wassertiefen ausgegeben und kann über QGIS und den integrierten „Temporal Controller“ visualisiert werden. Im Folgenden wird zunächst die Anfangssituation und der allgemeine Fließverlauf im Projektgebiet beschrieben (Kapitel 6.2.1). Anschließend wird die genaue zeitliche Abfolge für beide Ganglinien nacheinander detailliert geschildert und grafisch veranschaulicht (Kapitel 6.2.2 & 6.2.3). Hierfür wurden die Ganglinien in ihre Anstiegszeit, den Scheitelpunkt und die Ablaufzeit untergliedert und für ein besseres Verständnis die terrestrischen Flächen im Projektgebiet in die Augebiete Nord, Süd, West und Zentral aufgeteilt (vgl. Abb. 61). Abschließend wird das Fließverhalten beider Ganglinien miteinander verglichen und die zeitlichen Abfolgen in der Tabelle 6 gegenübergestellt (Kapitel 6.2.4).

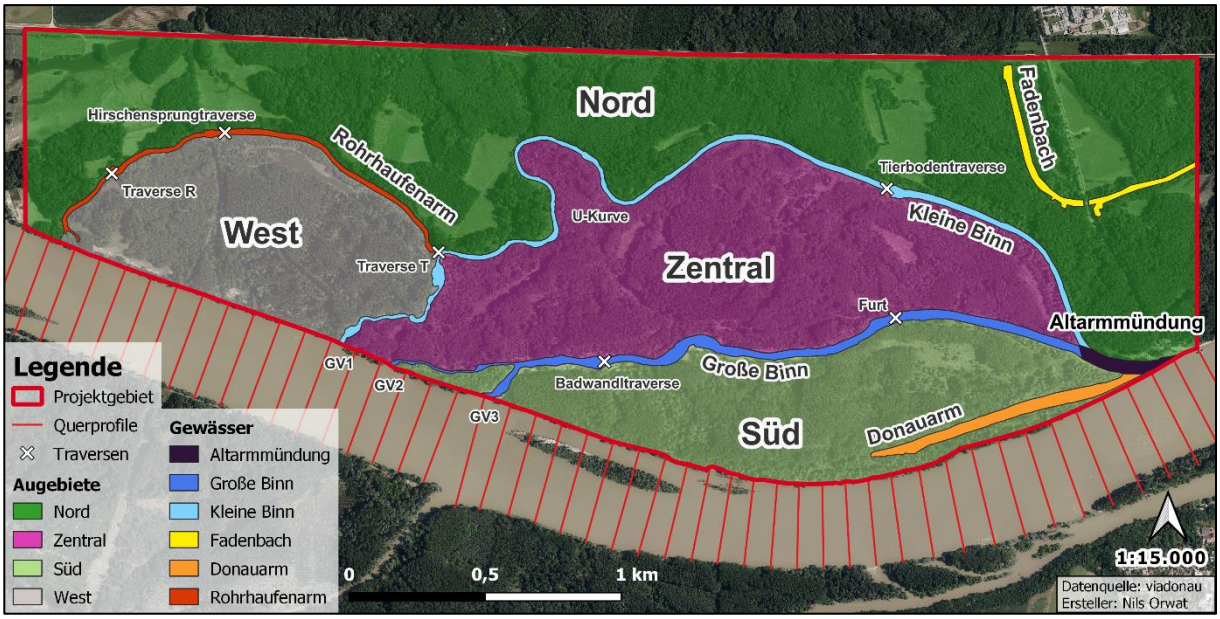


Abb. 61: Karte des Projektgebiet mit seinen Aubereichen und Gewässern (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

6.2.1 Anfangssituation und allgemeiner Fließverlauf

Zum Simulationsstart befindet sich das Projektgebiet in einem Gleichgewichtszustand für einen stationären Mittelabfluss (MQ 2010) der Donau. Die Abflusswerte am 1D-Modellausgang entsprechen mit 1930m³/s denen am 1D-Modelleingang und die lateral in den 2D-Modellbereich ein- und ausströmenden Abflusswerte sind konstant.

Die kleine Binn wird als einziges Gewässer im Projektgebiet von ihrem Zustrom, der Gewässervernetzung „GV1“ von der Donau stromaufwärts durchströmt. Dabei ist der Rohrhaufenarm ab dem Zusammenfluss mit der kleinen Binn bei Traverse T unterstromig bis

zur Hirschensprungtraverse durchströmt. Die große Binn ist auf einer Länge von rund einem Kilometer von der Altarmmündung bis zur Furt durchflutet. Dabei gibt es keine wirkliche Strömungsrichtung, da die kleine Binn die Strömungsrichtung in Fließrichtung vorgibt. Ein Teil strömt von der kleinen Binn in die große Binn, wobei dieser durch Rückströmungen wieder zurück in die kleine Binn fließt, dabei bilden sich Wirbel. Die beiden Gewässervernetzungen GV2 & GV3, als Zuströme der großen Binn, sind auf einer kurzen Distanz von weniger als 100m überflutet. Dabei strömt das Wasser größtenteils in einem Halbkreis aus der Donau ein und wieder aus. Der südlich der großen Binn gelegene Donauarm ist von der Altarmmündung aus vollständig bis zum Stromkilometer 1903 unterstromig durchflutet (vgl. Abb. 62).

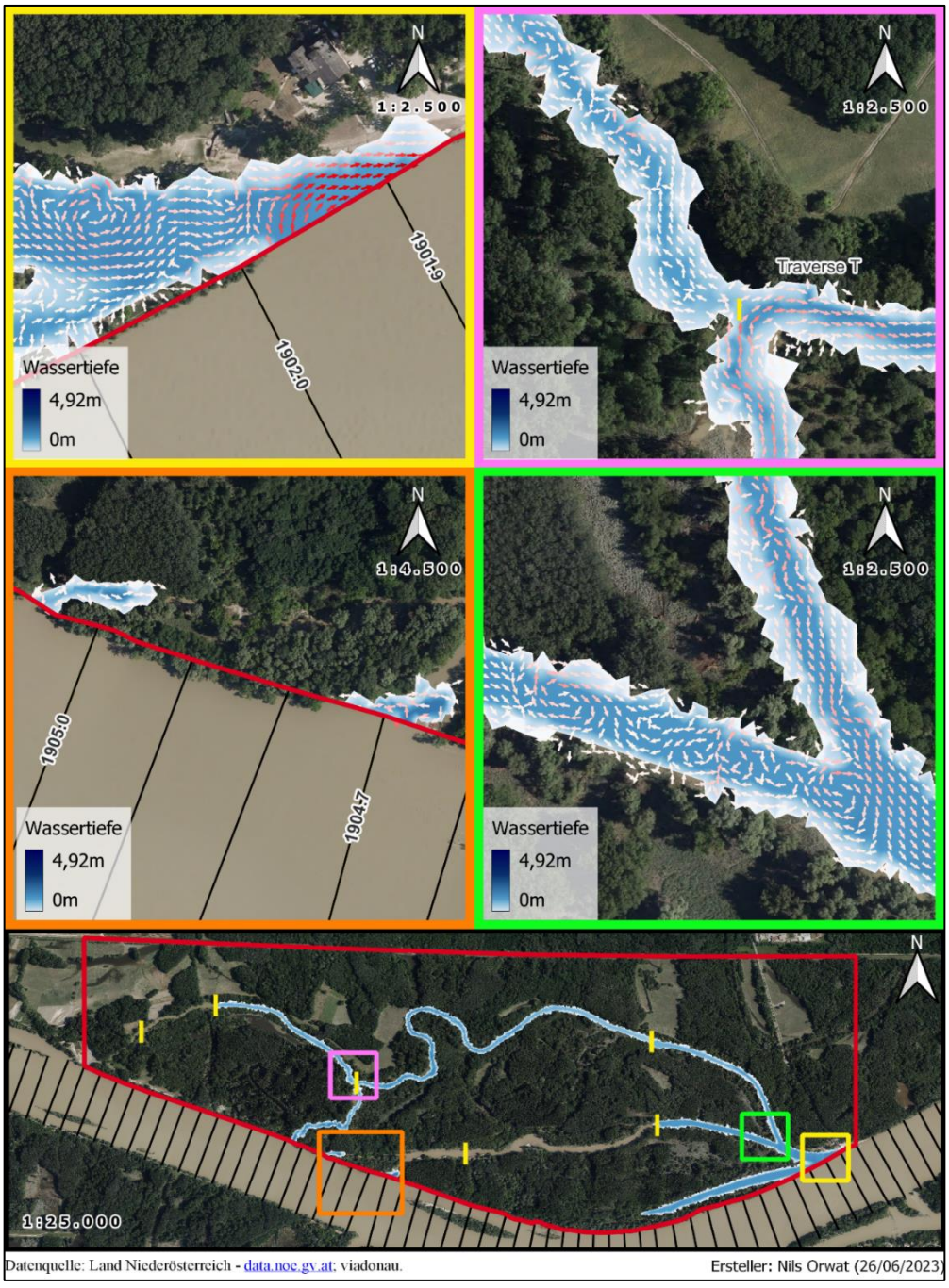


Abb. 62: Anfangssituation im Projektgebiet (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

Das Überflutungsgeschehen der beiden Abflussganglinien folgt allgemein einem ähnlichen Ablauf. Dabei beginnt die Donau zunächst die große Binn oberstromig und den Rohrhaufenarm unterstromig aus der kleinen Binn zu durchfluten. Nachdem sich die durchströmten Gewässer gefüllt haben, beginnen sie an verschiedenen Stellen über ihre Ufer zu treten. Dabei wird als erstes die südliche Au aus dem Donauarm und der Altarmmündung großflächig überflutet. Anschließend wird auch die zentrale Au, zunächst im Bereich des Zusammenflusses aus kleiner und großer Binn und später auch an anderen Stellen stark überflutet. Danach beginnt auch Wasser von der kleinen Binn in das westliche Augebiet zu fließen. Erst zuletzt ist auch das nördliche Augebiet von Überflutungen betroffen, bevor das Wasser wieder abfließt und in unterschiedlichem Ausmaß im Projektgebiet verbleibt.

Aufgrund dieser größtenteils nacheinander ablaufenden Ereignisse kann das Fließverhalten im Projektgebiet für beide Ganglinien in die folgenden sieben Ablaufschritte unterteilt werden:

1. Große Binn wird durchflutet

2. Rohrhaufenarm wird durchflutet

3. Südliche Au & Zentrale Au beginnen zu überfluten

4. Westliche Au & Gräben in der zentralen und südlichen Au & Fadenbach werden überflutet

5. Donau tritt verstärkt über die Ufer & westliche und zentrale Au überfluten großflächig

6. Nördliche Au wird überflutet

7. Wasser läuft ab

Betrachtet man das Überflutungsgeschehen der einzelnen Ganglinien genauer, zeigen sich jedoch auch deutliche Unterschiede im Ablauf des Fließverhaltens. Das Fließverhalten wird deshalb im Folgenden für beide Abflussganglinien im Detail beschrieben und mit der abschließenden Tabelle 6 gegenübergestellt (vgl. Kapitel 6.2.2 - 6.2.4). Bei den nachfolgend angegebenen Abflusswerten handelt es sich jeweils um die am Modelleingang zum Projektgebiet simulierten Werte des Querprofils bei Stromkilometer 1906,5.

6.2.2 Ganglinie A

Anstiegszeit: 0 – 45h

1) 1930 – 2343m³/s (0 – 14h)

Das Überflutungsgeschehen im Projektgebiet beginnt sich für die Ganglinie A nach rund 2h30 und einem Abflusswert von 2048m³/s zu verändern. Dabei strömt Wasser von der Donau in die beiden Zuströme der großen Binn und beginnt diese über GV3 von stromaufwärts zu überfluten, worauf in der Folge die Badwandltraverse überflutet wird (vgl. Abb. 63).
Nach 14h und einem Abflusswert von 2343m³/s kommt es zum Zusammenfluss von GV2 und GV3 und stromabwärts verbindet sich das Wasser aus der oberen großen Binn mit dem bis zur Furt unterstromig überfluteten Bereich der großen Binn, woraufhin sich eine oberstromige Strömung einstellt (vgl. Abb. 63).

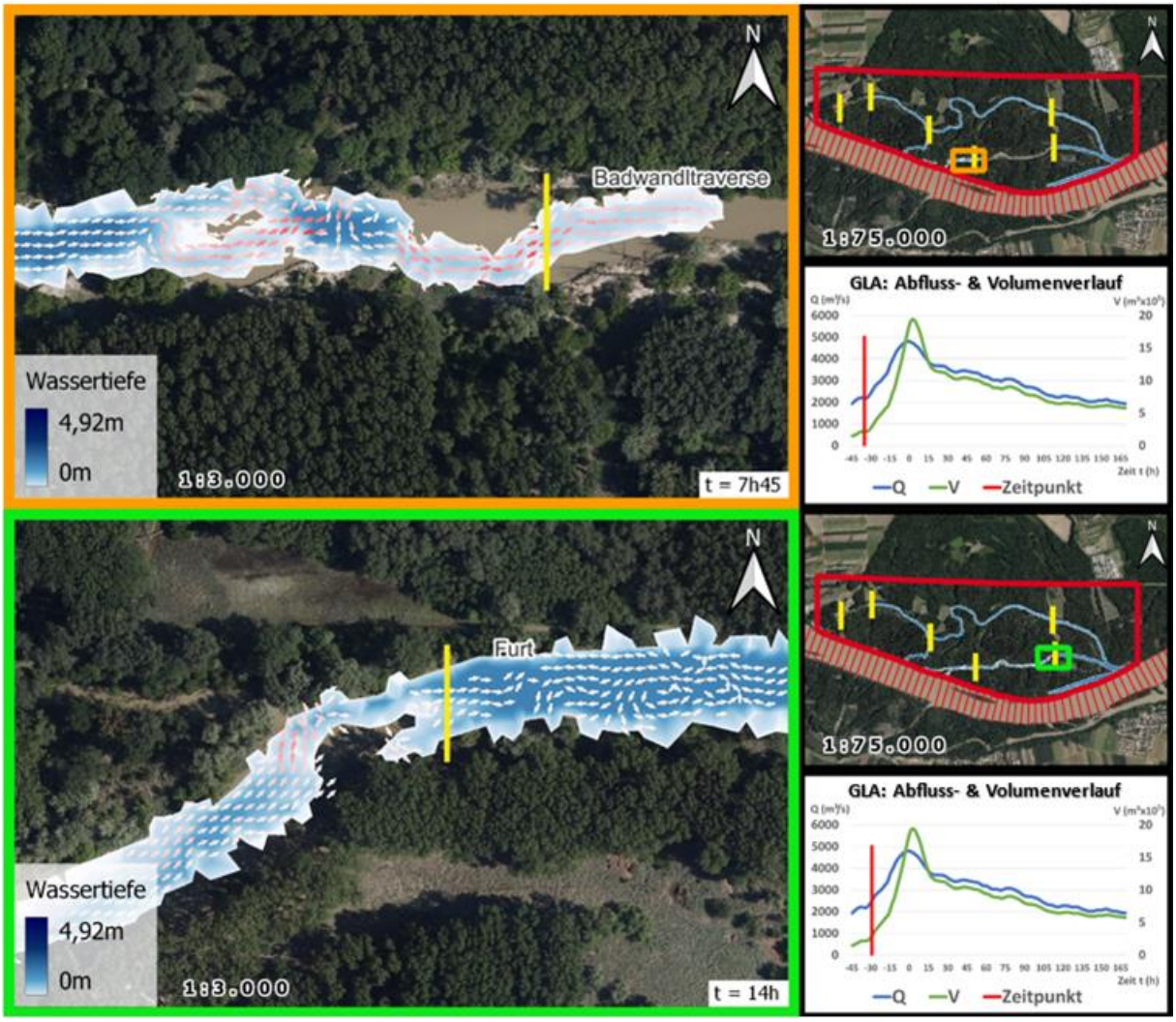


Abb. 63: Ganglinie A, Schritt 1 (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

2) 2343 – 3540m³/s (14 – 30h)

Die kleine Binn hat sich inzwischen gefüllt und tritt vereinzelt über ihre Ufer. Das von ihr unterstromig in den Rohrhaufenarm strömende Wasser führt nach 17h und einem Abfluss von 2612m³/s zum Überfluten der Hirschensprungtraverse und füllt den oberen Bereich des Rohrhaufenarms in den folgenden drei Stunden auf (vgl. Abb. 64).

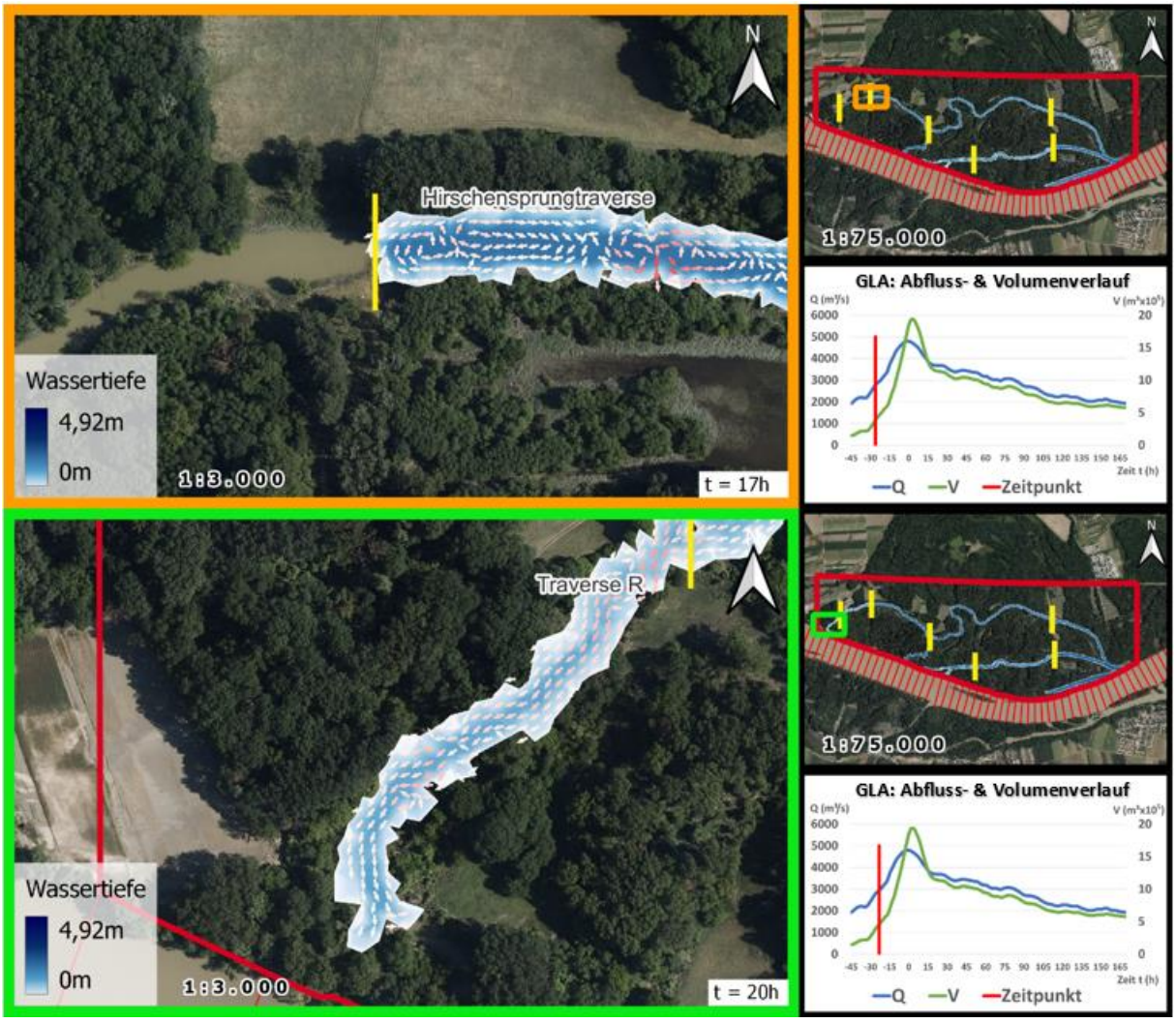


Abb. 64: Ganglinie A, Schritt 2 (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

3) 3540 – 4329m³/s (30 – 35h)

Ab einem Abflusswert von 3540m³/s, den die Ganglinie A nach 30h erreicht, beginnt Wasser vom nördlichen Donauarmufer in die Verwaldungszone der südlichen Au zu strömen und zugleich fließt Wasser von der großen Binn im Bereich der Furt unterstromig in einen Graben der zentralen Au.

Nur eine Stunde später tritt die Donau bei einem Abflusswert von 3851m³/s bei Stromkilometer 1906,4 über ihr Ufer und strömt in den Rohrhaufenarm ein (vgl. Abb. 65). Auch am Zusammenfluss der kleinen und großen Binn beginnt das Wasser über das Ufer zu treten und in die Verwaldungszone der zentralen Au zu fließen (vgl. Abb. 65).

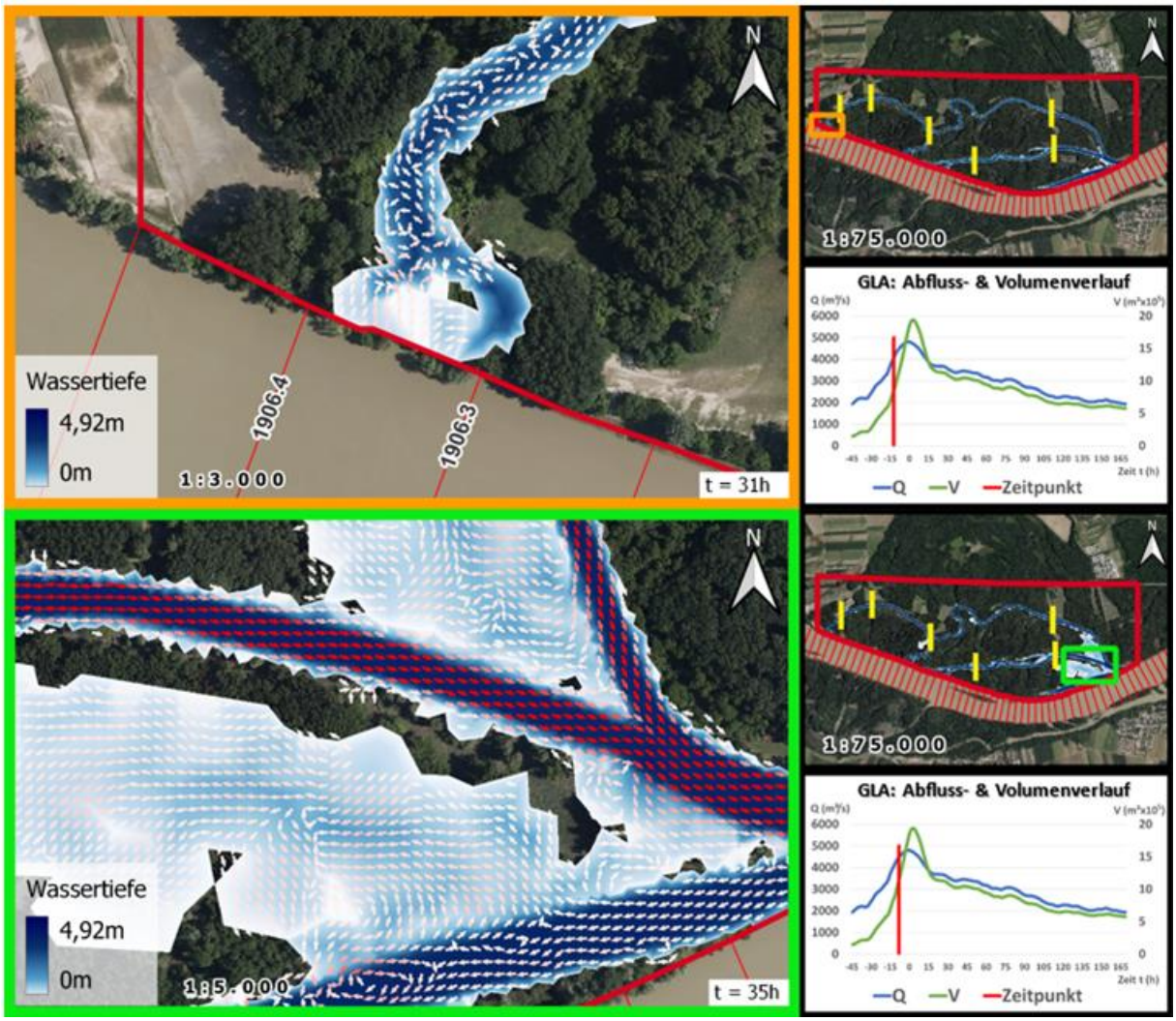


Abb. 65: Ganglinie A, Schritt 3 (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

4) 4329 – 4728 m³/s (35 – 41h)

Nach 35h und einem Abfluss von 4329m³/s tritt Wasser unterhalb der Traverse T vom linken Ufer der kleinen Binn großflächig in den Auwald der westlichen Au (vgl. Abb. 66).

Kurz darauf treten im Projektgebiet viele Überflutungen in verschiedenen Bereichen auf. So tritt Wasser von der kleinen Binn, auf Höhe des U-förmigen Kurvenverlaufs und bei der Tierbodentraverse in den Auwald der zentralen Au und auch in die Gräben der zentralen Au strömt Wasser aus der kleinen Binn nach Süden.

Zusätzlich strömt Wasser stromabwärts der U-Kurve in die nördliche Au und über einen Graben in den Fadenbach (vgl. Abb. 66).

Auch die große Binn tritt nun an vielen Bereichen über ihre Ufer und Wasser strömt in die Gräben der zentralen und südlichen Au. Dazu beginnt die Donau bei Stromkilometer 1902,5 und 1902,8 über ihr Ufer in den Donauarm zu fließen.

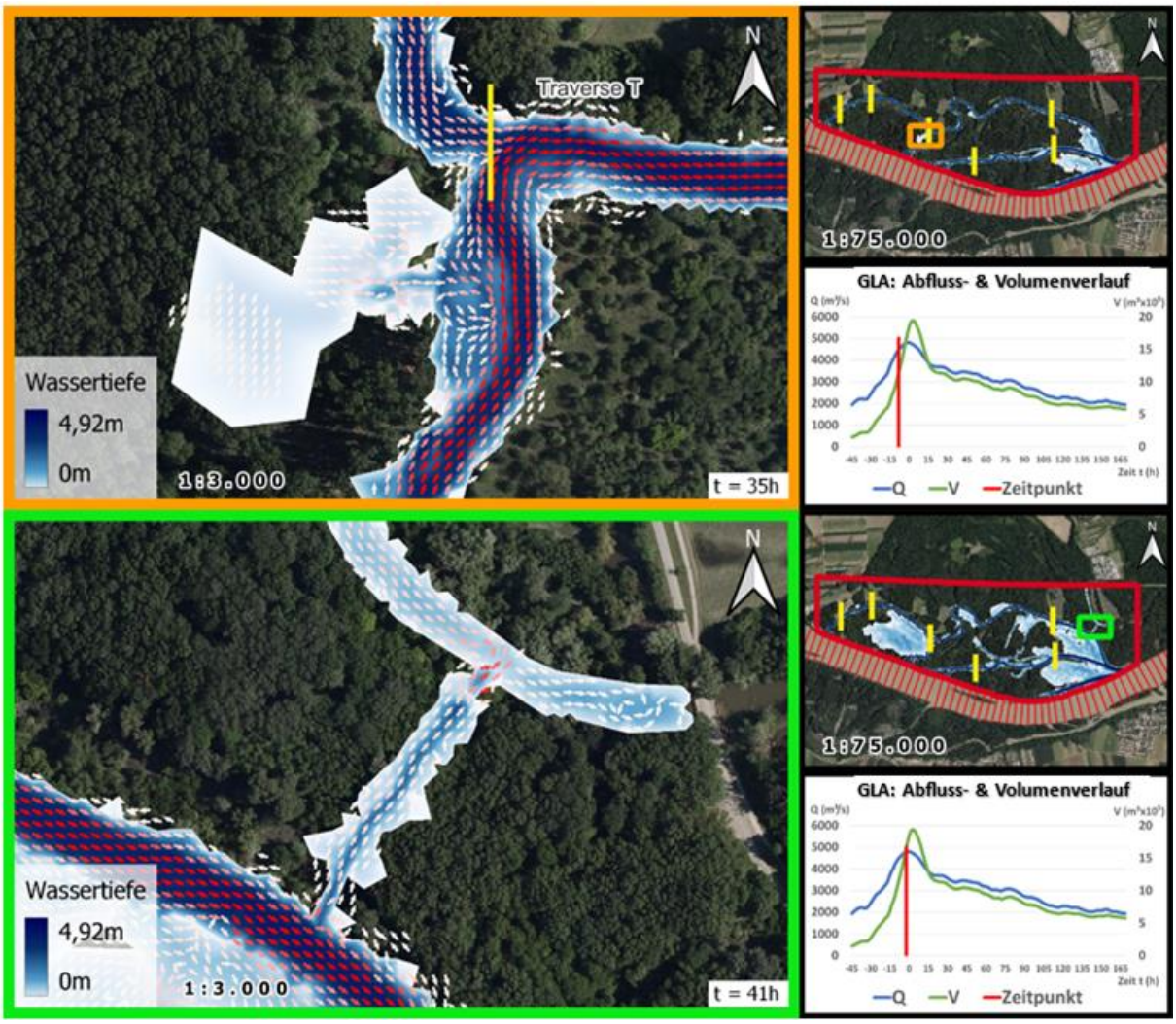


Abb. 66: Ganglinie A, Schritt 4 (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

5) 4728 – 4802 m³/s (41 – 45h)

Bei einem Abfluss von 4728m³/s, nach rund 41h, tritt die Donau auch zwischen den Stromkilometern 1905,7 und 1905,6 über ihr Ufer und strömt in den bereits großflächig überfluteten Auwald der westlichen Au (vgl. Abb. 67).

Auch weiter stromabwärts bei Stromkilometer 1903,6 tritt die Donau über ihr Ufer und fließt in einen Verbindungsgraben in Richtung Donauarm.

In den folgenden vier Stunden bis zum Scheitelpunkt breiten sich die Überschwemmungen vor allem in der westlichen und zentralen Au weiter aus und über das Grabensystem der zentralen Au kommt es zu mehreren Verbindungen zwischen der kleinen und großen Binn (vgl. Abb. 67).

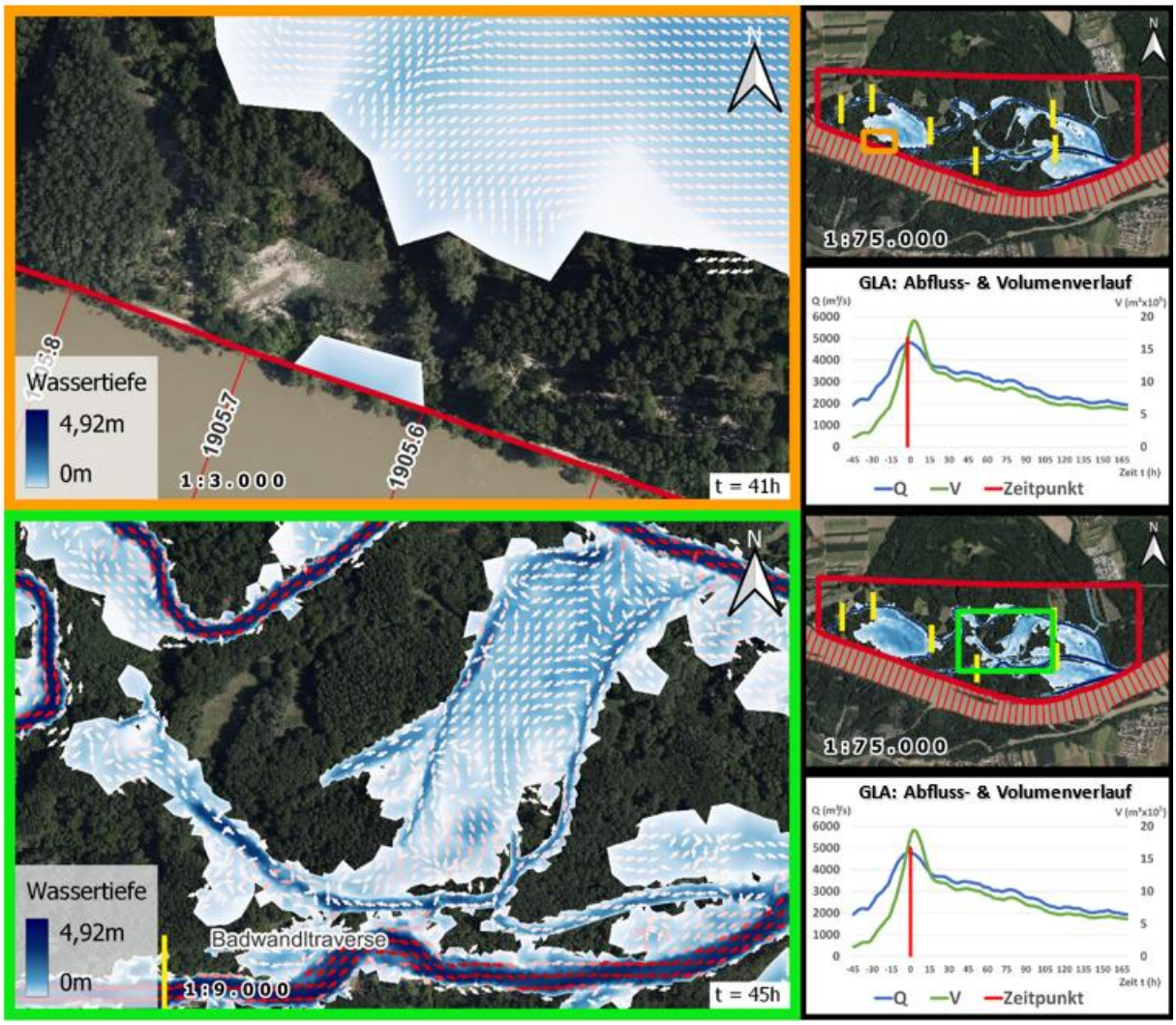


Abb. 67: Ganglinie A, Schritt 5 (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

Scheitelpunkt: 4.802m³/s (43,5 – 45h)

Nach einer Anstiegszeit von 43,5h erreicht der Scheitelpunkt der Ganglinie A das Projektgebiet bei Stromkilometer 1906,5 mit einem maximalen Abfluss von 4.802m³/s, den er für 90 Minuten hält. Zu diesem Zeitpunkt sind alle Gewässer, bis auf den östlichen Teil des Fadenbachs und der Altarm in der südlichen Au durchströmt und treten mehr oder weniger stark über ihre Ufer. Die große Binn wird von der Donau durch ihre beiden Zuströme GV2 & GV3 durchströmt und die kleine Binn aus GV1. Der Donauarm wird von der Donau ausgehend bei Stromkilometer 1902,8 und 1902,6–1902,4 überflutet und das Wasser strömt vom Donauarm weiter in die südliche Au und in die Altarmmündung. Der Fadenbach wird über einen Graben von der kleinen Binn aus mit geringen Fließgeschwindigkeiten durchströmt, dabei beginnt er vereinzelt über seine Ufer zu treten. Der Altarm in der zentralen Au wird über die kleine und große Binn überflutet und stellt eine Verbindung der Gewässer dar, jedoch ohne eine einheitliche Strömungsrichtung. Generell sind weite Teile in der westlichen, zentralen und südlichen Au überflutet (vgl. Abb. 68).

Das westliche Augebiet wird über die kleine Binn, unterhalb der Traverse T und von der Donau aus bei Stromkilometer 1905,7–1905,5 überflutet, wobei der größte Anteil aus der kleinen Binn kommt. Dabei fließt ein Teil des Wassers über den Rohrhaufenarm und die Donau wieder ab (vgl. Abb. 68).

Das nördliche Augebiet ist neben geringen Uferüberflutungen am Rohrhaufenarm und der kleinen Binn kaum von größeren Überflutungen betroffen. Nur stromabwärts des U-Kurvenverlaufs der kleinen Binn strömt Wasser über das linke Ufer bis zu einer Offenfläche und wieder zurück. Daneben beginnt sich der Graben vor der U-Kurve von beiden Seiten zu füllen und die dadurch entstandene Insel wird kurz darauf überflutet (vgl. Abb. 68).

Das zentrale Augebiet ist großflächig, ausgehend vom Zusammenfluss der kleinen und großen Binn und über das Grabensystem, überflutet. Dabei ist keine einheitliche Strömungsrichtung erkennbar und das Wasser strömt von den Ufern in die Au und an anderen Stellen wieder zurück. Nur über die Gräben gibt es eine Strömung aus der kleinen und großen Binn, die sich innerhalb des Auwaldes verliert. Dazwischen liegen noch große Bereiche, die nicht überflutet wurden. Auch der kleine Graben an der östlichen Uferseite der kleinen Binn, stromaufwärts der Traverse T, wurde nicht überflutet, weshalb im westlichen Teil der zentralen Au noch keine Überschwemmungen auftreten (vgl. Abb. 68).

Das südliche Augebiet ist großflächig von der großen Binn, der Altarmmündung, dem Donauarm und der Donau überflutet. Eine einheitliche Strömungsrichtung innerhalb der Au ist nicht erkennbar und das Wasser strömt an wechselnden Stellen wieder zurück in die große Binn und den Donauarm. Die Überflutung des Grabens, ausgehend von der großen Binn, ist nicht weit fortgeschritten und auch an der Grabenmündung an der Donau (1904,3) gibt es keine Überflutung. Auch die Überflutung des zweiten Grabens zwischen der Donau (1903,6) und dem Donauarm ist nicht weit fortgeschritten. Bei Stromkilometer 1904–1903,8 tritt die Donau in geringem Maße über ihr Ufer und strömt in den Auwald (vgl. Abb. 68).

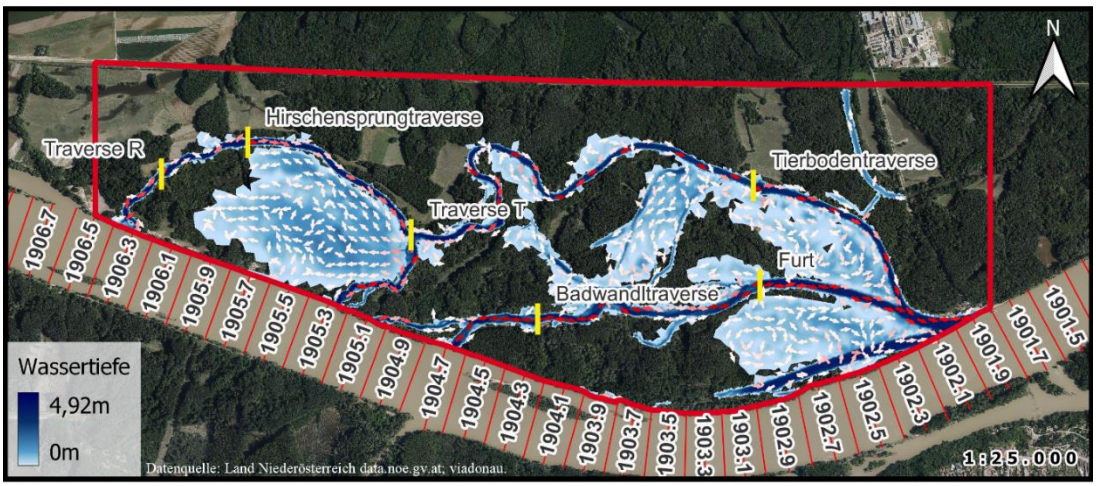


Abb. 68: Ganglinie A, Scheitelpunkt (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

Ablaufzeit: 45 – 214,75h

6b) 4802 – 4626m³/s (45 – 50h)

Nachdem der Scheitelpunkt das Projektgebiet durchflossen hat, beginnt bei Traverse T das Wasser von der kleinen Binn in den Auwald und über die Verwaldungszone zum überfluteten Altarm der zentralen Au zu strömen. In den Gräben zwischen der kleinen und großen Binn reduziert sich die Strömung, woraufhin sich diese langsam wieder zurück in Richtung der kleinen und großen Binn dreht. Zeitgleich beginnt Wasser von der U-Kurve der kleinen Binn über Offenland in den Auwald der nördlichen Au und vom Fadenbach in den westlich gelegenen Graben zu strömen.

Zwei Stunden nach dem Scheitelpunkt (47h) und einem Abflusswert von 4743m³/s beginnt die Strömung innerhalb des westlichen Augebiets sich langsam umzudrehen und sich gegen das noch immer einströmende Wasser aus der kleinen Binn, unterhalb der Traverse T zu stellen. Auf der anderen Uferseite der kleinen Binn gelangt geringfügig Wasser in einen Graben der zentralen Au.

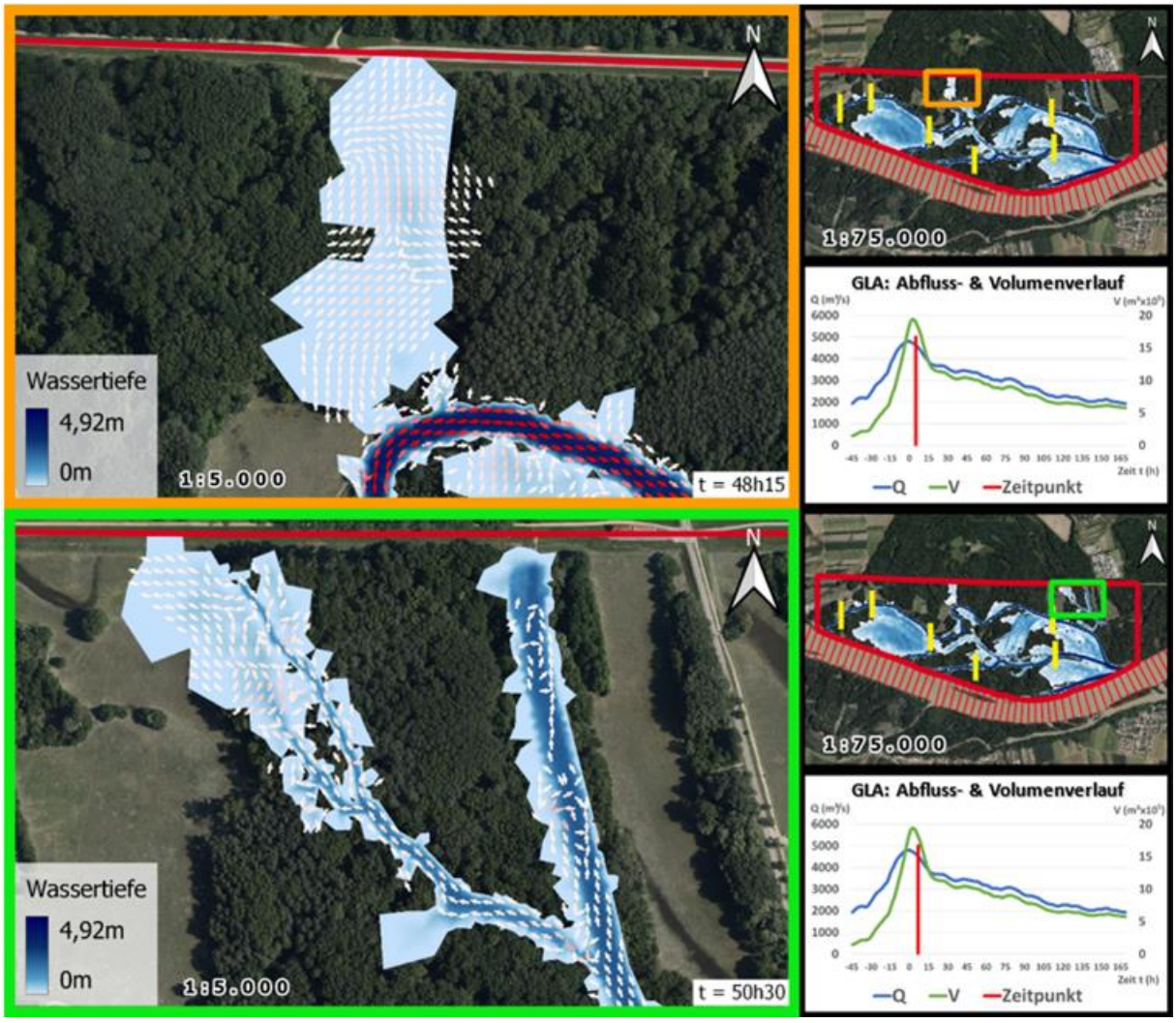


Abb. 69: Ganglinie A, Schritt 6b) (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

Eine weitere Stunde später, nach einer Gesamtlaufzeit von 48h15 und einem inzwischen gesunkenen Abflusswert von 4706m³/s, erreicht das aus der U-Kurve der kleinen Binn ins nördliche Augebiet fließende Wasser über das Offenland, den Marchfeldschutzdamm. Kurz darauf läuft auch der Graben westlich des Fadenbachs über und Wasser strömt in den darauffolgenden zwei Stunden über das daneben liegende Offenland bis zum Marchfeldschutzdamm (vgl. Abb. 69).

7) 4626 – 1930m³/s (50 – 214,75h)

Nach rund 6h dominiert die ablaufende Strömung im westlichen Aubereich über denselben Bereich bei Traverse T, über den zuvor das Wasser größtenteils in die Au geflossen ist (vgl. Abb. 70). Auch in der nördlichen Au fließt das zuvor von der kleinen Binn zum Marchfeldschutzdamm geflossene Wasser wieder zurück, worauf in der Folge jedoch der Strom abreißt und eine kleine Wasserfläche verbleibt.

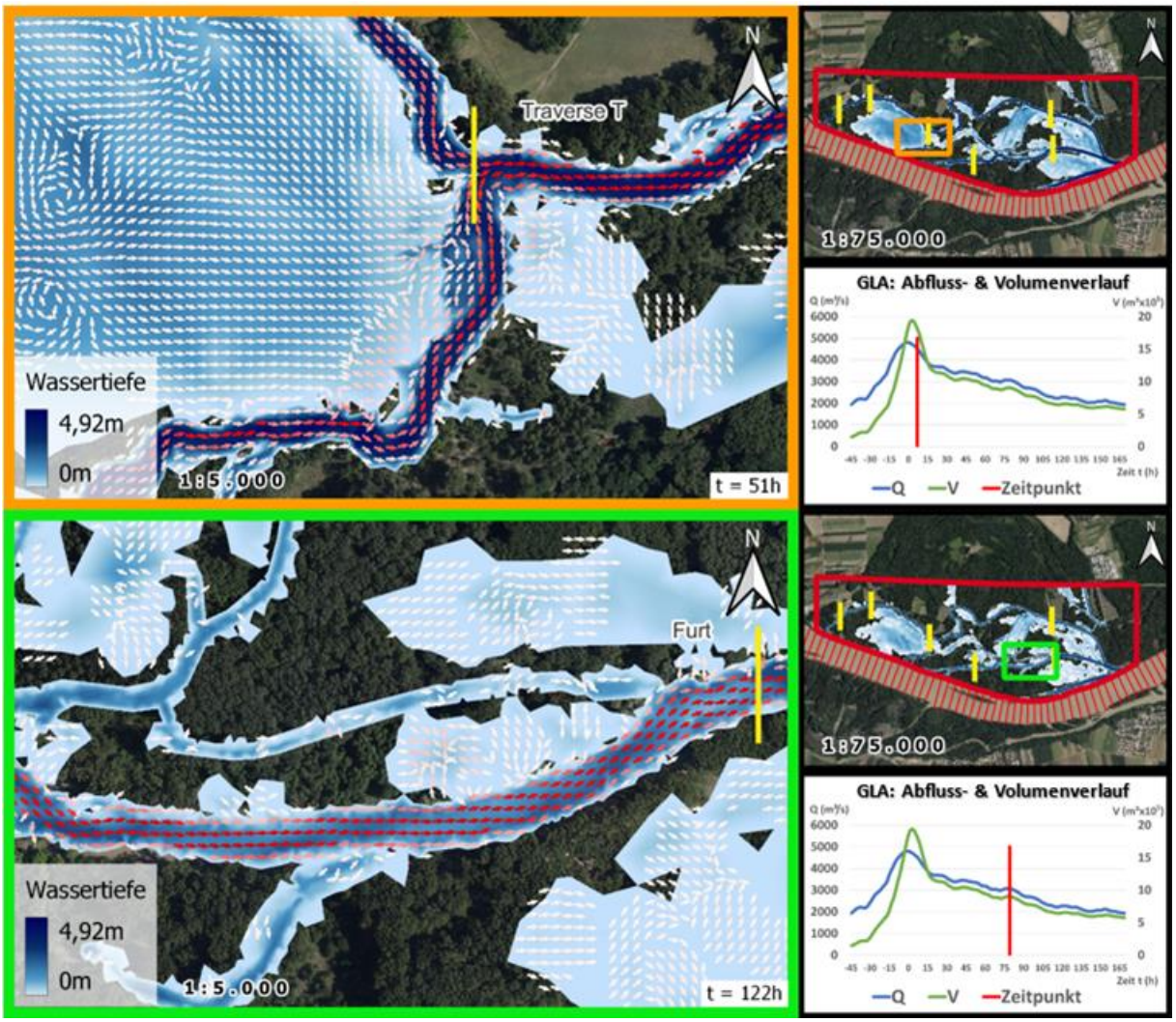
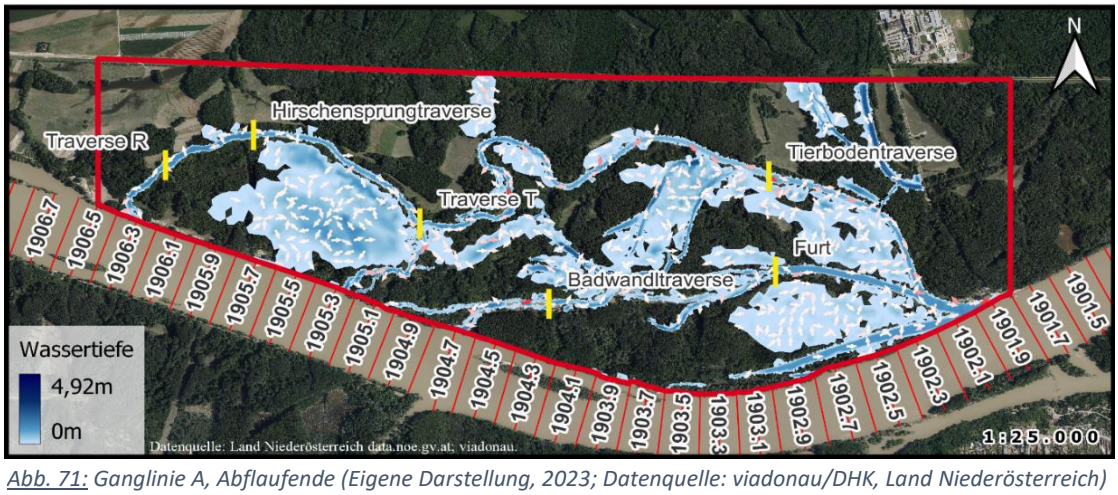


Abb. 70: Ganglinie A, Schritt 7 (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

Die Strömung vom Graben in den Fadenbach nimmt in der Folge weiter ab, woraufhin die kleine Binn wieder vom Fadenbach getrennt wird.
Rund 18h nach dem Scheitelpunkt, bei einem Abfluss von 3725m³/s, reißt auch die von der Donau ausgehende Strömung im Rohrhaufenarm ab, wodurch sich Wirbel bilden und ein Teil des Wassers in die kleine Binn abläuft.
In weiterer Folge fließt das Wasser aus allen Augebieten langsam über die Gewässer ab, bis die Verbindungen zu den Gewässern nach und nach abreißen. In der südlichen Au passiert dies in den 15h nach dem Scheitelpunkt, wobei das Wasser zuvor größtenteils über den Donauarm abgeflossen ist. Auch die Rückströmung vom Graben der zentralen Au in die große Binn, kurz vor der Furt, lösen sich nach 77h Ablaufzeit (122h Gesamtlaufzeit) und einem Abfluss von 3070m³/s auf (vgl. Abb. 70). Auch das ablaufende Wasser in der kleinen und großen Binn nimmt kontinuierlich ab, wobei die Bereiche bis zur Tierbodentraverse und Furt noch am meisten Wasserbewegungen aufzeigen.
Nach 135h Ablaufzeit (180h Gesamtlaufzeit) reißt die von der Donau ausgehende Strömung in GV2 und weitere sechs Stunden später auch in GV3 und dadurch in der gesamten großen Binn bei Abflusswerten von 2022m³/s ab.

<u>Ablaufende:</u> 1930m³/s (214,75h)

Bis zum Ende der Ablaufzeit verbleibt nur in der kleinen Binn eine Strömung in Fließrichtung, allerdings sind alle anderen Gewässer, mit Ausnahme vereinzelter Abschnitte der großen Binn, mit Wasser gefüllt. Dabei zeigen manche Gewässerabschnitte, wie der obere Teil des Rohrhaufenarms bis zur Hirschensprungtraverse, Wassertiefen im Bereich von zwei Metern. In den westlichen, zentralen und südlichen Aubereichen sind nach wie vor größere Flächenanteile von einer Wasserschicht zwischen einem halben bis einem Meter überflutet. Die nördliche Au ist dagegen nur geringfügig, nördlich der U-Kurve der kleinen Binn und westlich des Fadenbachs von zurückgebliebenem Wasser betroffen (vgl. Abb. 71).



<u>Abb. 71:</u> Ganglinie A, Abflaufende (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

6.2.3 Ganglinie B

Anstiegszeit: 0 – 23h

1) 1930 – 2850m³/s (0 – 7h45)

Auch für die Ganglinie B zeigt sich eine erste Veränderung im Projektgebiet nach 2h30, indem die Donau, bei einem ähnlichem Abflusswert von 2050m³/s, die beiden Zuströme der großen Binn überflutet. Dabei verbinden sich die beiden Zuströme nach 6h, noch bevor die Badwandltraverse überflutet wird (vgl. Abb. 72).

In der Folge beginnt die große Binn auch unterstromig über die Furt zu fließen und verbindet sich nach rund 7h und einem Abflusswert von 2697m³/s mit dem von stromaufwärts kommendem Wasser auf Höhe der beiden in die südliche Au verlaufenden Gräben. Daraufhin dreht sich die Strömung in der gesamten großen Binn in Fließrichtung der Donau (vgl. Abb. 72).

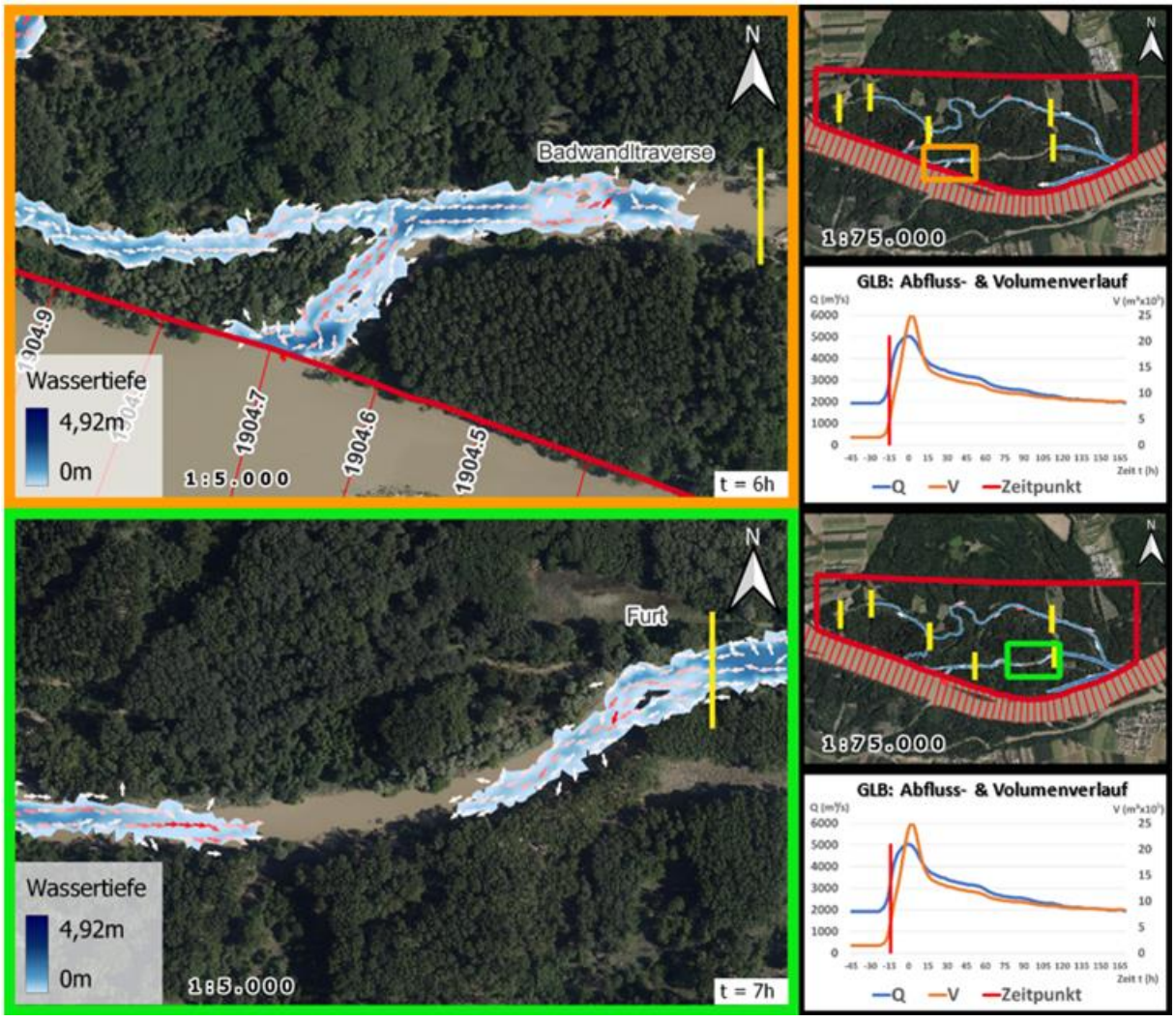


Abb. 72: Ganglinie B, Schritt 1 (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

2) 2850 – 3669m³/s (7h45 – 10h)

Kurze Zeit später beginnt die kleine Binn vereinzelt über ihre Ufer zu treten und das unterstromig in den Rohrhaufenarm fließende Wasser überflutet die Hirschensprungtraverse nach 7h45 bei einem Abfluss von 2850m³/s und somit einem geringfügig höheren Abfluss im Vergleich zur Ganglinie A mit 2612m³/s.

3) 3669 – 4300m³/s (10 – 12h30)

Nach 10h sind bereits alle Gewässer bis auf die Altarme gefüllt und treten vereinzelt über ihre Ufer, dabei beginnt das Wasser von der großen Binn durch einen Graben zum Altarm in der zentralen Au zu fließen (vgl. Abb. 73).

Nur 45 Minuten später, bei einem ähnlichen Abflusswert zur Ganglinie A von 3902m³/s tritt die Donau bei Stromkilometer 1906,4 über ihr Ufer und strömt in den Rohrhaufenarm ein. Gleichzeitig beginnt Wasser vom Donauarm und der Altarmmündung in die Verwaldungszone der südlichen Au einzuströmen.

Eine weitere halbe Stunde später, nach 11h15, beginnt auch vom Zusammenfluss der kleinen und großen Binn Wasser in die Verwaldungszone der zentralen Au zu fließen. Die Abflusswerte sind hierbei etwas höher als bei der Ganglinie A.

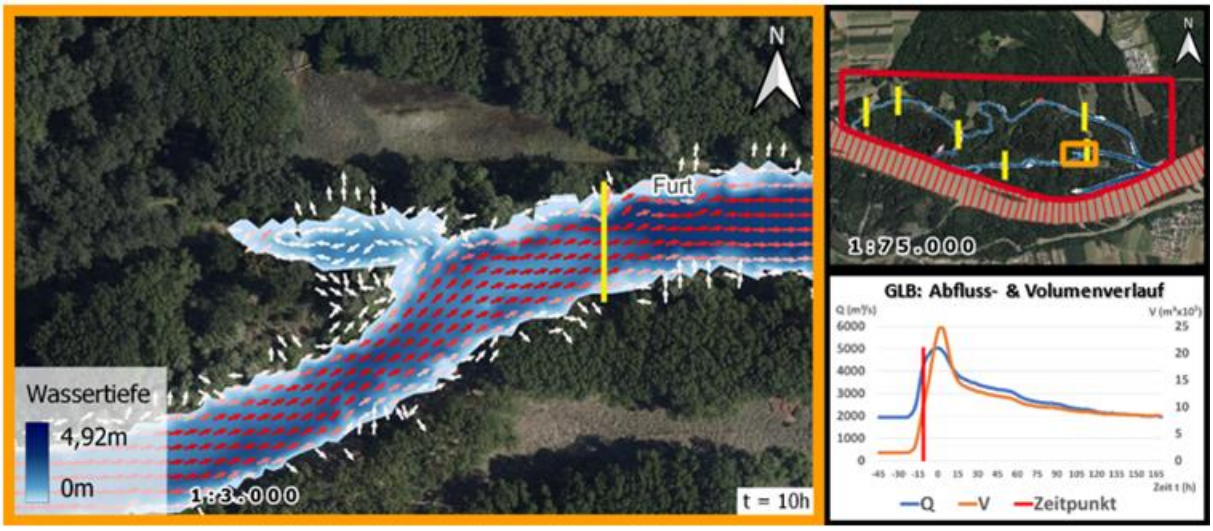


Abb. 73: Ganglinie B, Schritt 3 (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

4) 4300 – 4766m³/s (12h30 – 16h30)

Ab einem Abfluss von 4300m³/s, nach rund 12h30, beginnt Wasser von der kleinen Binn unterhalb der Traverse T in die westliche Au zu strömen und zugleich im Bereich der U-Kurve und der Tierbodentraverse in die zentrale Au zu strömen (vgl. Abb. 74).

Etwas stromab der U-Kurve beginnt Wasser in die nördliche Au zu fließen und auch in den

Fadenbach gelangt nun Wasser über den Graben aus der kleinen Binn (vgl. Abb. 74).
Von der großen Binn ausgehend ist das Wasser mittlerweile unterstromig durch den Graben bis zum Altarm der zentralen Au geströmt und auch der westliche Graben in der südlichen Au wird langsam durchflutet. Zudem hat die Donau ihr Ufer im Bereich von Stromkilometer 1902,5 und 1902,8 überflutet und strömt in den Donauarm (vgl. Abb. 74).
Insgesamt zeigt sich bei diesem Abflusswert somit ein relativ ähnliches Überflutungsgeschehen für beide Ganglinien (vgl. Kapitel 6.2.2).

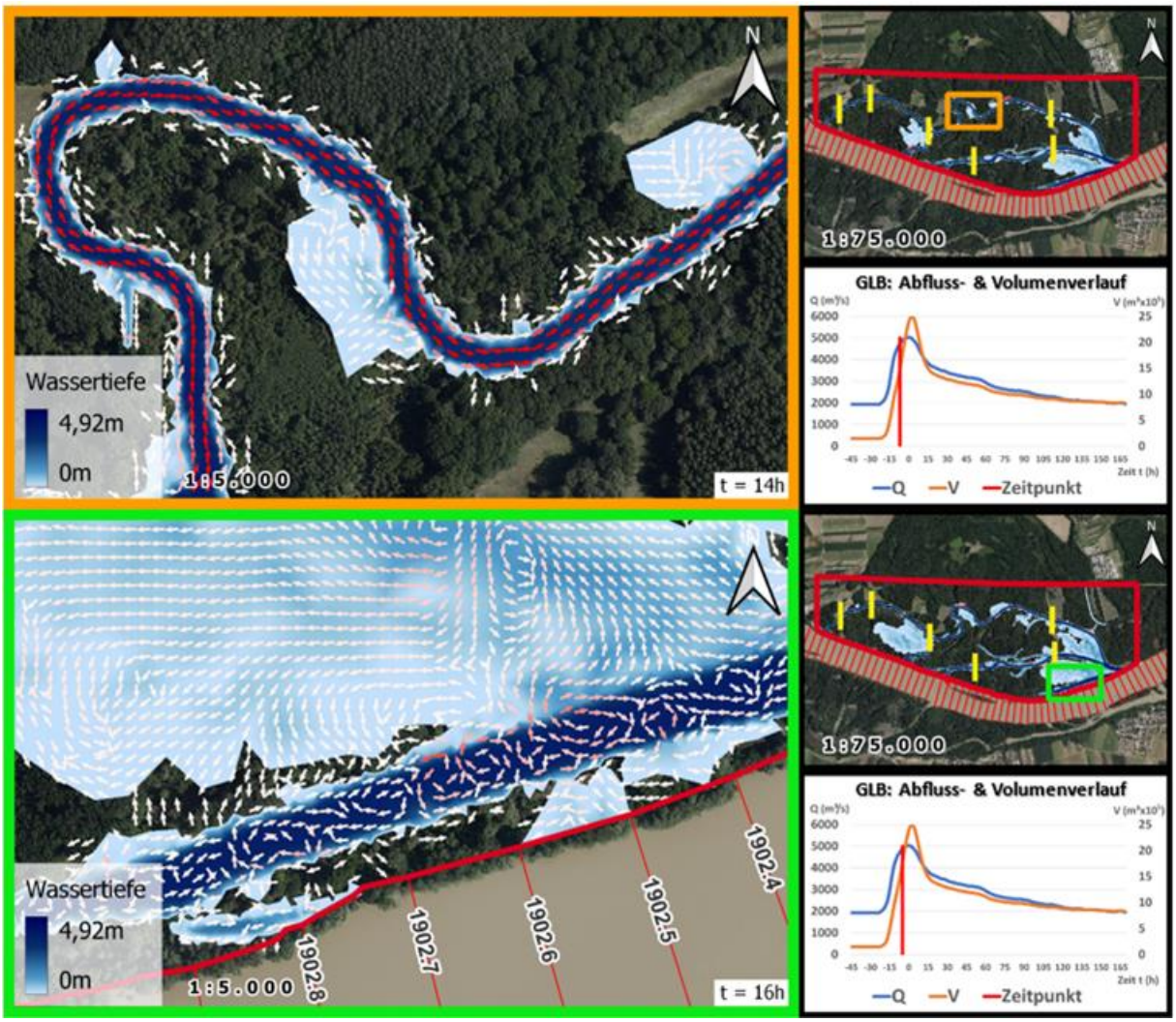


Abb. 74: Ganglinie B, Schritt 4 (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

5) 4766 – 4949m³/s (16h30 – 19h)

Nach 16h30 tritt die Donau bei einem Abfluss von 4766m³/s und damit vergleichbar zur Ganglinie A bei Stromkilometer 1905,7-1905,6 über ihr Ufer und strömt in die noch geringer überflutete westliche Au. Zeitgleich tritt die Donau auch wieder bei Stromkilometer 1903,6 in den Verbindungsgraben zum Donauarm. In den folgenden 150 Minuten zeigen sich auch für

die Ganglinie B die größten Überflutungsereignisse in der westlichen und zentralen Au, jedoch sind diese bei Erreichen des Scheitelabflusses der Ganglinie A, nach 17h, weitaus weniger fortgeschritten.

6a) 4949 – 5032m³/s (19 – 23h)

In den letzten vier Stunden der Anstiegszeit der Ganglinie B kommt es zu stark abweichenden Überflutungen im Vergleich zur Ganglinie A. Dabei tritt nach 19h und einem Abfluss von 4949m³/s das Wasser stromauf- und -abwärts der Hirschensprungtraverse im Rohrhaufenarm und in der U-Kurve der kleinen Binn über das Ufer und strömt in die nördliche Au. Zugleich tritt die kleine Binn bei Traverse T über ihr rechtes Ufer in den Auwald der zentralen Au und kurz danach auch über den etwas stromaufwärts gelegenen Graben (vgl. Abb. 75).

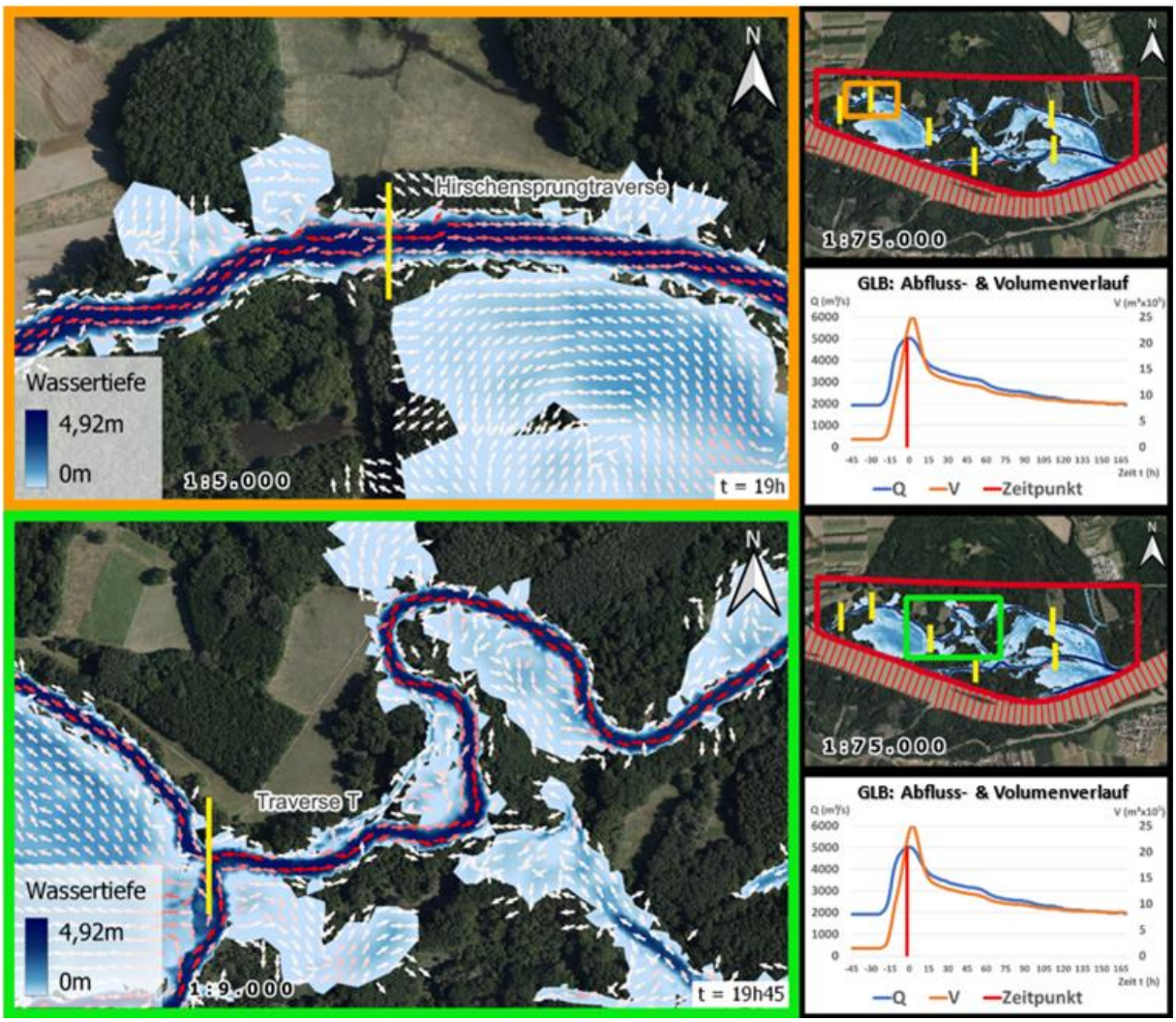


Abb. 75: Ganglinie B, Schritt 6a) (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

Kurz danach tritt die Donau bei Stromkilometer 1904,3 über ihr Ufer in den Verbindungsgraben zur großen Binn und bei einem Abfluss von 4969m³/s fließt sie auch bei Stromkilometer 1905,9 über ihr Ufer in die westliche Au.

Eine Stunde später, nach 20h45, tritt das Wasser an einer weiteren Stelle der kleinen Binn über das Ufer in das nördliche Augebiet. In der Folge erreicht das Wasser von der kleinen Binn ausgehend den Marchfeldschutzdamm, während weiter östlich das Wasser im Fadenbach beginnt in den angrenzenden Graben zu laufen (vgl. Abb. 76).

Eine weitere Stunde später, nach 22h, erreicht auch das Wasser vom Rohrhaufenarm den Marchfeldschutzdamm (vgl. Abb. 76).

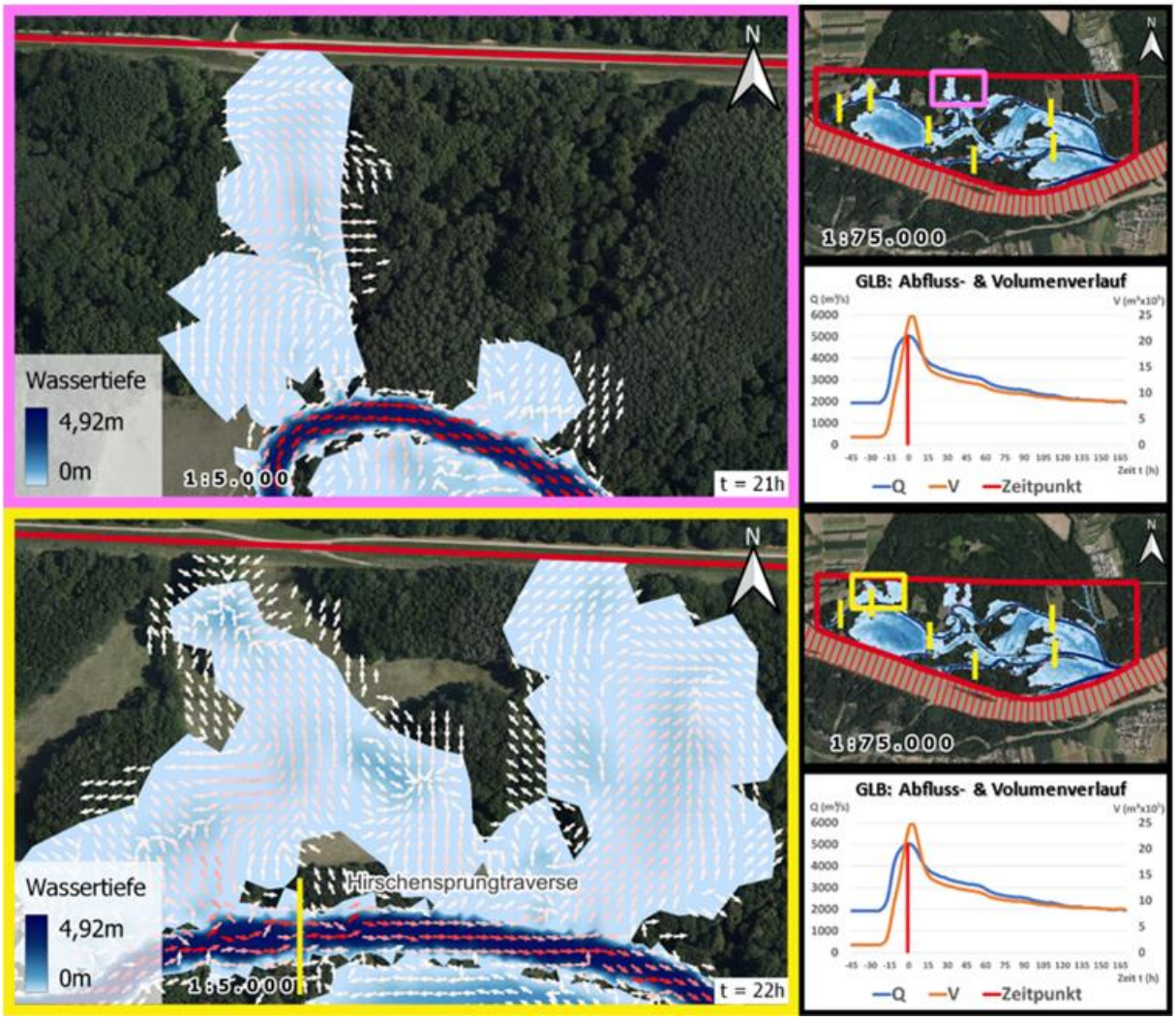


Abb. 76: Ganglinie B, Schritt 6a) (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

Scheitelpunkt: 5032m³/s (23h)

Nach einer Anstiegszeit von 23h erreichen die Abflusswerte der Ganglinie B ihren Scheitelpunkt mit einem Wert von 5032m³/s. Wie für die Ganglinie A sind zu diesem Zeitpunkt

alle Gewässer, bis auf den östlichen Teil des Fadenbachs und dem Altarm in der südlichen Au, durchströmt. Die Zustromquellen sind dabei dieselben, wie für die Ganglinie A. Auch für den Scheitelpunkt der Ganglinie B sind weite Teile in der Orther Au überflutet (vgl. Abb. 77).

Die westliche Au zeigt eine etwas größere Ausdehnung der Überflutung nach Westen hin als für die Ganglinie A und wird dabei neben der kleinen Binn auch ab dem Stromkilometer 1905,9 von der Donau ausgehend überflutet (vgl. Abb. 77).

Die nördliche Au zeigt sehr viel stärkere Überflutungen als für die Ganglinie A. Ausgehend vom Rohrhaufenarm und der kleinen Binn zeigen sich Überschwemmungen bis zum Marchfeldschutzdamm. Auch der Graben westlich des Fadenbachs ist bereits zu einem Teil durchflutet (vgl. Abb. 77).

Die zentrale Au zeigt in ihrem östlichen Teil ein nur geringfügig größeres Überflutungsausmaß. In ihrem westlichen Teil ist die zentrale Au jedoch großflächig von der kleinen Binn aus überflutet, mit einer eindeutigen Strömungsrichtung zur großen Binn (vgl. Abb. 77).

Das südliche Augebiet zeigt wiederum eine vergleichbare Überflutung. Nur der Verbindungsgraben zwischen der Donau (Str.km 1903,6) und dem Donauarm ist zusätzlich durchflutet (vgl. Abb. 77).

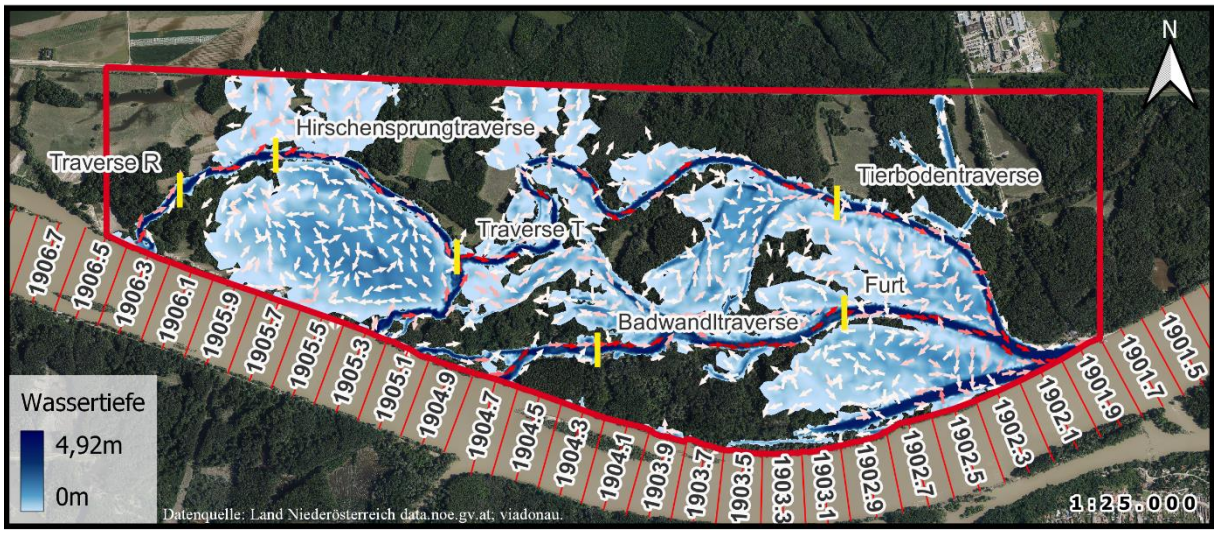


Abb. 77: Ganglinie B, Scheitelpunkt (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

Ablaufzeit: 23 – 192,25h

6b) 5032 – 4398m³/s (23 – 32h30)

Mit dem Scheitelpunkt der Abflussganglinie B breitet sich das Wasser hauptsächlich in der nördlichen Au weiter aus. Dabei kommt es im östlichen Teil der nördlichen Au zwischen dem Fadenbach und dem angrenzenden Graben zu großflächigen Überschwemmungen, wodurch

das Wasser bis zum Marchfeldschutzdamm gelangt (vgl. Abb. 78). Die Abflüsse sind hierbei mit 5004m³/s noch rund 400m³/s höher, als dies für die Ganglinie A der Fall war.

Zugleich dehnt sich der Überflutungsbereich nördlich des Rohrhaufenarms entlang des Marchfeldschutzdamms nach Westen und Osten hin aus und erreicht nach 6h Ablaufzeit und Abflusswerten von 4692m³/s die westliche Projektgrenze und nach einer weiteren Stunde das östlich gelegene Überschwemmungsgebiet, welches sich von der U-Kurve der kleinen Binn auch nach Osten und Westen ausgebreitet hat (vgl. Abb. 78).

Der östliche Teil des Fadenbachs bleibt auch für die Ganglinie B unberührt. In der zentralen Au kommt es dagegen nur noch zu geringfügigen Überflutungsveränderungen und in der westlichen Au dreht sich die Strömung bereits eine Stunde nach dem Scheitelpunkt um, wobei das Wasser nun verstärkt über die Donau einströmt und bei Traverse T in die kleine Binn ausströmt.

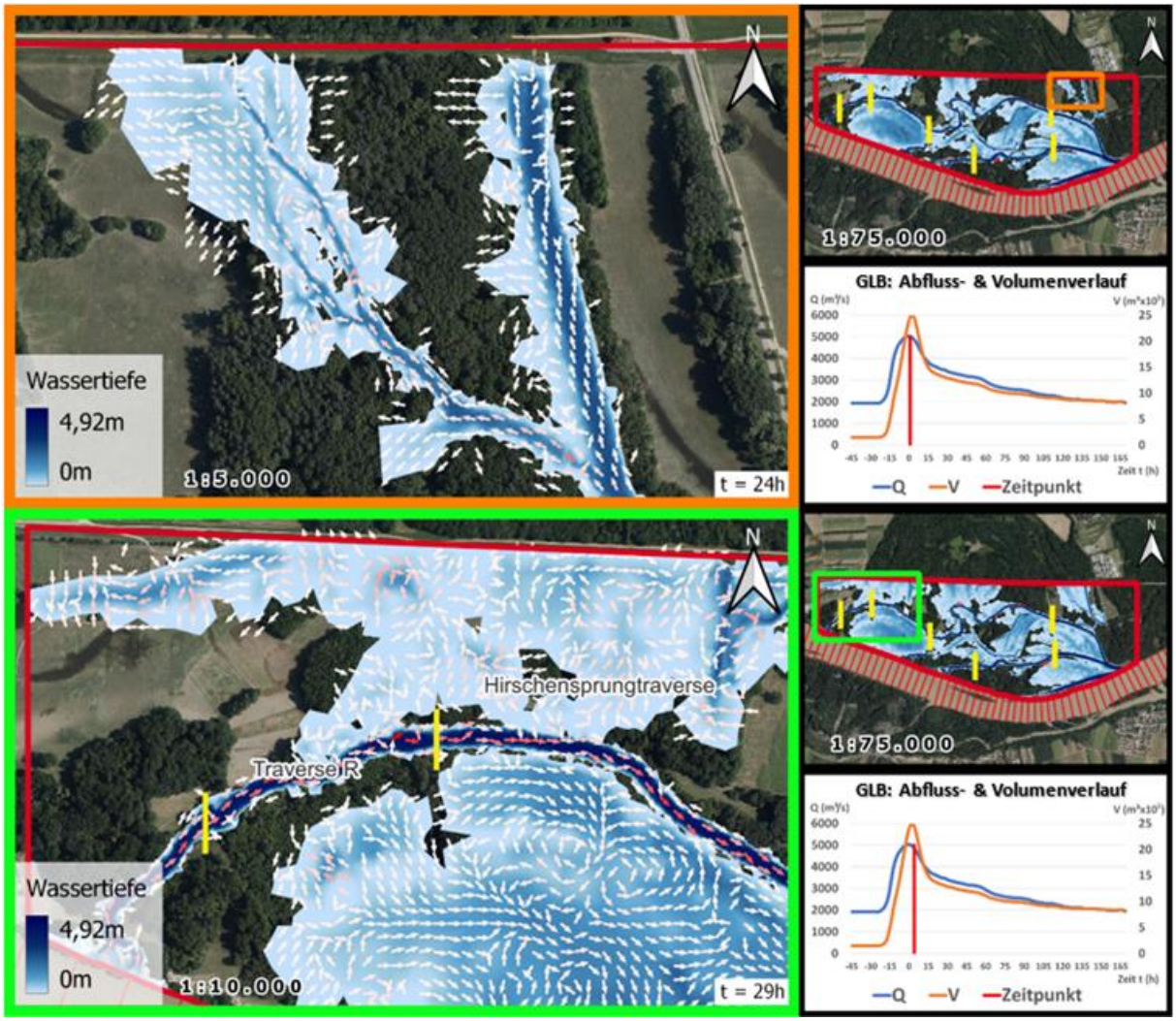


Abb. 78: Ganglinie B, Schritt 6b) (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

7) 4398 – 1930m³/s (31h30 – 192h15)

Nach rund 8h Ablaufzeit dominiert auch für die Ganglinie B die ablaufende Strömung für alle überfluteten Aubereiche. Aus der nördlichen Au läuft das Wasser über dieselben Wege wieder zurück. Dabei dreht sich die Strömung vom Rohrhaufenarm und weiter östlich von der kleinen Binn in die nördliche Au um.

Am Verbindungsgraben der kleinen Binn zum Fadenbach passiert dasselbe nach rund 10h.

Die Überflutungen im westlichen Aubereich fließen größtenteils über die kleine Binn und zum Teil über den Rohrhaufenarm und die Donau wieder ab.

Das Wasser in der zentralen Au läuft über das Grabensystem von West nach Ost über die kleine und große Binn ab. Dabei reißt die Verbindung im westlichen Teil nach einer Ablaufzeit von 8h30 ab und in der Folge geht die einheitliche Strömungsrichtung zu weiten Teilen verloren. Daraufhin läuft das Wasser in unregelmäßigen Richtungen ab.

In der südlichen Au läuft der Großteil des Wassers über die große Binn und den Donauarm, bis rund 15h nach dem Scheitelpunkt in Fließrichtung ab. Anschließend verringern sich die Verbindungen zu den angrenzenden Gewässern.

Die Gewässer verhalten sich in weiterer Folge ähnlich wie bereits für die Ganglinie A. Dabei nimmt die Strömung sowohl in der kleinen und großen Binn ab, bis auch hier die Strömung in der GV2 nach einer Gesamtlaufzeit von knapp 147h45 abreißt und weitere 27h später, bei einem Abflusswert von 2041m³/s, auch in GV3 (vgl. Abb. 79). Daraufhin stoppt auch die Durchströmung der großen Binn in Fließrichtung, woraufhin nur noch die kleine Binn bis zum Ende der Ablaufzeit durchströmt wird.



Abb. 79: Ganglinie B, Schritt 7 (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

Ablaufende: 192,15h

Nach dem Ende der Ablaufzeit verbleibt auch für die Ganglinie B nur in der kleinen Binn eine Strömung in Fließrichtung. Jedoch sind alle Gewässer, einschließlich aller Gräben in der zentralen Au mit Wasser gefüllt. Nur die Gräben westlich der Traverse 1, sowie der östliche Teil des Fadenbachs im nördlichen Augebiet und die Gräben in der südlichen Au sind weitestgehend unberührt. Auch für die Ganglinie B zeigen sich nach der Ablaufzeit in manchen Gewässerabschnitten Wassertiefen von rund zwei Metern. Im Vergleich zur Ganglinie A zeigen sich noch größere Auflächen von Überflutungen betroffen (vgl. Abb. 80).

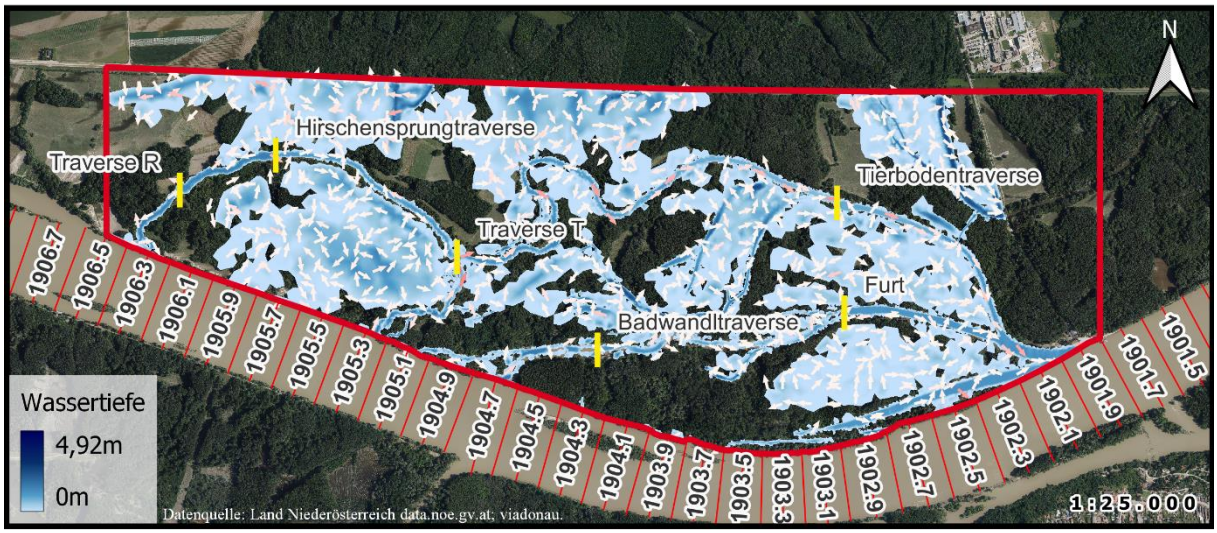


Abb. 80: Ganglinie B, Ablaufende (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

6.2.4 Ganglinienvergleich

Insgesamt betrachtet, zeigen die beiden Abflussganglinien einen ähnlichen Ablauf des Fließverhaltens im Projektgebiet (vgl. Kapitel 6.2.1). Nur im Detail lassen sich Unterschiede beim Fließverhalten feststellen. Diese werden nachfolgend für die einzelnen Ablaufschritte aufgezeigt und können den jeweiligen Beschreibungen des Ganglinienverlaufs oder der nachfolgenden Tabelle 6 entnommen werden (vgl. Kapitel 6.2.2 & 6.2.3; Tabelle 6):

Für die Ganglinie B kommt es im ersten Schritt zunächst zu einem Zusammenfluss der beiden Zuströme GV2 und GV3, bevor die Badwandltraverse überflutet wird. Dagegen wird bei der Ganglinie A zuerst die Badwandltraverse überflutet, bevor sich der Zustrom GV2 mit der zu diesem Zeitpunkt bereits durchströmten großen Binn verbindet. Dabei weist die Ganglinie A trotz längerer Anstiegszeit noch einen niedrigeren Abfluss auf.

Ähnlich verhält es sich im zweiten Schritt, bei dem die Hirschensprungtraverse im Rohrhaufenarm für die Ganglinie B erst bei höheren Abflüssen überflutet wird, jedoch dann schneller vollläuft.

Der weitere Ablauf im Fließverhalten für den dritten und vierten Schritt läuft für beide Abflussganglinien sehr ähnlich ab. Sowohl die Reihenfolge der Ereignisse, die Abflusswerte und die zwischen den einzelnen Ereignissen ablaufende Zeit, ist vergleichbar. Nur das Überflutungsausmaß ist für die Ganglinie B etwas größer.
Erst ab dem fünften Schritt, der für die Ganglinie A bereits kurz vor dem Scheitelpunkt liegt, weist die Ganglinie B wiederum etwas höhere Abflusswerte für dieselben Ereignisse auf. Trotzdem weicht zu diesem Zeitpunkt das Ausmaß der Überflutungen zwischen den Ganglinien nur noch geringfügig voneinander ab.

Anschließend übersteigen im sechsten Schritt die Abflusswerte der Ganglinie B den Scheitelpunkt der Ganglinie A, woraufhin sich das Fließverhalten stark unterscheidet. So kommt es für die Ganglinie B bereits vor ihrem Scheitelpunkt zu Überflutungen in der nördlichen Au, die für die Ganglinie A erst nach dem Durchlauf des Scheitelpunkts auftreten. Zusätzlich treten für die Ganglinie B zwei weitere Uferüberflutungen in die nördliche Au, sowie von der Donau in die westliche und südliche Au auf. Des Weiteren zeigt sich für die Ganglinie B bereits eine klare Strömungsrichtung in der zentralen Au von West nach Ost über das Grabensystem.
Der Scheitelpunkt der Ganglinie B zeigt daher ein sehr viel größeres Überflutungsausmaß in der zentralen und nördlichen Au. Erst nach dem Passieren des Scheitelpunktes kommt es auch für die Ganglinie A zu einer Strömung innerhalb der zentralen Au von West nach Ost. Auch die Überflutungen der nördlichen Au erreichen im Gegensatz zur Ganglinie B erst nach dem Scheitelpunkt den Marchfeldschutzdamm. Die Überflutungen haben dabei jedoch ein sehr viel geringeres Ausmaß als für die Ganglinie B. Eine Ausnahme stellt die Überflutung beim Fadenbach dar, die für Ganglinie A mit einen sehr viel niedrigeren Abflusswert den Marchfeldschutzdamm erreicht.
Für den letzten Schritt ist die Reihenfolge der Ereignisse, sowie die Abflusswerte und Zeiten zwischen den Ereignissen vergleichbar. Im Gegenteil zur Ganglinie B ist für die Ganglinie A aber kein ablaufendes Wasser aus dem Fadenbach in die kleine Binn zu sehen. Dieses hat für die Ganglinie B jedoch die Folge, dass die Strömung zwischen Fadenbach und kleiner Binn erst sehr viel später abreißt. Vereinzelt sind für die Ganglinie B sogar niedrigere Abflusswerte für dieselben Ereignisse zu vermelden.
Nach dem Ende der Ablaufzeit und dem Absinken der Abflusswerte auf ein MQ zeigt sich im Projektgebiet ein sehr unterschiedliches Überflutungsausmaß. Dabei sind für die Ganglinie B noch große Augebiete von Überschwemmungen betroffen. Vor allem im nördlichen Aubereich zeigen sich deutlich sichtbare Unterschiede im Überflutungsausmaß zur Ganglinie A. Auch in der westlichen, zentralen und südlichen Au sind für die Ganglinie B noch mehr Gebiete vom Wasser betroffen, allerdings nicht in dieser Deutlichkeit.

Ablaufschritte	**Ganglinie A** ($Q_{m^3/s}$ / t_h)	**Ganglinie B** ($Q_{m^3/s}$ / t_h)
ANFANGSBEDINGUNG	1930 / 0h	1930 / 0h
1) -Große Binn wird aus GV2 & GV3 überflutet	2048 / 2h30	2050 / 2h30
-Bandwandltraverse wird überflutet	2206 / 7h45	2471 / 6h15
-GV2 & GV3 verbinden sich	2343 / 14h	2421 / 6h
-Große Binn wird komplett durchströmt	2343 / 14h	2697 / 7h15
2) -Hirschensprungtraverse im Rohrhaufenarm wird überflutet	2612 / 17h	2850 / 7h45
-Rohrhaufenarm läuft voll	2846 / 20h	3669 / 10h
3) -Südliche Au wird vom Donauarm & Altarmmündung überflutet	3540 / 30h	3669/ 10h
-Graben der zentralen Au (bei der Furt) wird geflutet	3540 /30h	3669 / 10h
-Donau strömt in den Rohrhaufenarm (Str.km 1906,4)	3851 / 31h	3902 / 10h45
-Zentrale Au wird am Zusammenfluss der kleinen & großen Binn überflutet	3877 / 31h15	4038 / 11h15
4) -Westliche Au wird von der kleinen Binn aus überflutet	ab	ab
-Kleine Binn überflutet die zentrale Au auf Höhe der U-Kurve und Tierbodentraverse	4329 / 35h	4300 / 12h30
-Kleine Binn überflutet die nördliche Au stromabwärts der U-Kurve		
-Kleine Binn strömt über den Graben in den Fadenbach		
-Große Binn überflutet die zentrale und südliche Au über die Gräben		
-Donau strömt in den Donauarm(Str.km 1902,5 & 1902,8)		
5) -Donau strömt in die westliche Au (Str.km 1905,7-1905,6)	ab	4766 / 16h30
-Donau strömt in Graben (Str.km 1903,6)	4739 / 41h15	bis
-Grabensystem der zentralen Au verbindet sich		4949 / 19h
6a) -Nördliche Au wird vom Rohrhaufenarm überflutet	/	ab
-Nördliche Au wird von kleiner Binn aus überflutet (1)	*erst bei* 6b)	4949 / 19h
-Zentrale Au wird von kleiner Binn auf Höhe der Traverse T und kurz darauf über den stromauf liegenden Graben überflutet	*erst bei* 6b)	
-Donau strömt in Verbindungsgraben zur großen Binn (Str.km 1904,3)	/	
-Donau strömt in die westliche Au (Str.km 1905,9)	/	4969 / 19h45
-Nördliche Au wird von kleiner Binn aus überflutet (2)	/	4997 / 20h45
-Wasser der kleinen Binn (1+2) erreicht den Marchfeldschutzdamm	*erst bei* 6b)	5004 / 21h
-Fadenbach überflutet westlich angrenzenden Graben	*erst bei* 6b)	5004 / 21h
-Wasser in der zentralen Au beginnt über die Gräben abzulaufen	/	5004 / 21h
-Wasser des Rohrhaufenarms erreicht den Marchfeldschutzdamm	/	5018 / 22h
SCHEITELPUNKT	4802 / 45h	5032 / 23h
6b) -Zentrale Au wird von kleiner Binn auf Höhe der Traverse T überflutet	ab 4802 / 45h	*siehe* 6a)
-Wasser in der zentralen Au beginnt über die Gräben abzulaufen		*siehe* 6a)
-Nördliche Au wird von kleiner Binn aus überflutet (1)		*siehe* 6a)

	-Fadenbach überflutet westlich angrenzenden Graben	*siehe* 6a)
	-Strömung in der westlichen Au beginnt sich umzudrehen	ab 4743 / 47h	ab 5018 / 24h
	-Wasser gelangt von kleiner Binn kurzfristig in Graben der zentralen Au stromauf Traverse T		*siehe* 6a)
	-Wasser der kleinen Binn (1) erreicht den Marchfeldschutzdamm	4706 / 48h15	*siehe* 6a)
	-Wasser vom Fadenbach erreicht den Marchfeldschutzdamm	4596 / 50h30	5004 / 24h30
	-Wasser erreicht westliche Projektgrenze in der nördlichen Au	/	4692 / 29h
	-Überflutungen in der nördlichen und zentralen Au breiten sich aus	/	bis 4348 / 32h
7)	-Durchströmung der zentralen Au von kleiner Binn im Westen reißt ab	ab 4626 / 50h	ab 4398 / 31h30
	-Wasser läuft im westlichen Aubereich ab		
	-Wasser läuft im nördlichen Aubereich über kleine Binn ab (1)		ab 33h15
	-Wasser vom Fadenbach läuft über Graben ab	/	
	-Strömung im Graben zwischen kleiner Binn und Fadenbach reißt ab	3877 / 59h45	2898 / 83h45
	-Südliche Au fließt größtenteils über den Donauarm ab		bis 38h
	-Strömung von der Donau in den Rohrhaufenarm reißt ab	3725 / 63h	3772 / 40h
	-Strömungen zwischen Gräben und großer Binn reißen ab	ab 3070 / 122h	ab 2610 / 99h45
	-Strömung in GV2 reißt ab	2117 / 180h	2135 / 147h45
	-Strömung in GV3 und dadurch in gesamter großer Binn reißt ab	2022 / 186h	2041 / 175h
	ABLAUFENDE	1930 / 214h45	1930 / 192h15

Tabelle 6: Fließvergleich der beiden Abflussganglinien nach Abflusswert (Q) und Zeit (t) (Eigene Darstellung, 2023)

6.3 Fließgeschwindigkeit

Die Fließ- bzw. Strömungsgeschwindigkeiten wurden von BASEMENT für jeden Knotenpunkt des Rechennetzes in 15-minütigen Abständen ausgegeben. Mithilfe des QGIS PlugIn Crayfish kann der Verlauf der Fließgeschwindigkeit für punktuelle Standorte visualisiert werden. Dazu wurden für die Gewässer der Orther Au verschiedene virtuelle Messstandorte ausgewählt, mit denen der Verlauf der Fließgeschwindigkeiten innerhalb des Gewässers aufgezeigt werden konnte. Die Messstandorte können der nachfolgenden Karte entnommen werden (vgl. Abb. 81). Aufgrund der weniger deutlichen Fließgeschwindigkeitsveränderungen innerhalb der Augebiete ist die visuelle Darstellung der Strömungsverteilungen auf die Gewässer beschränkt.

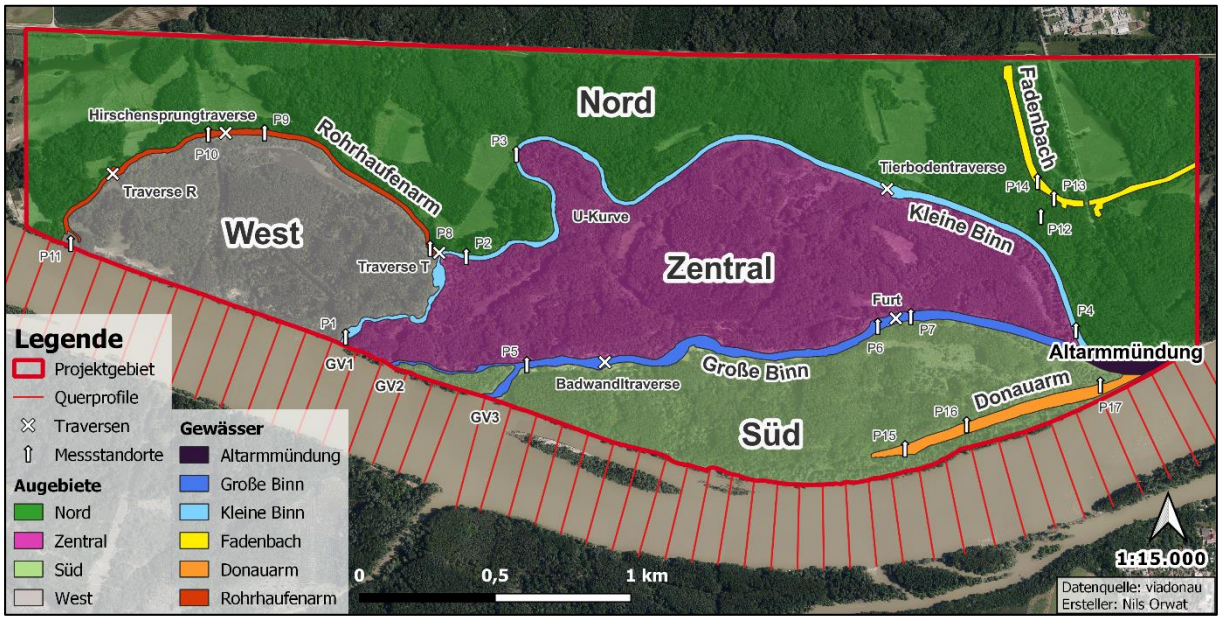


Abb. 81: Karte des Projektgebiets mit den Messstandorten der Fließgeschwindigkeitsverläufe (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK, Land Niederösterreich)

Der Verlauf der Fließgeschwindigkeiten der Abflussganglinien zeigt in den Gewässern der Orther Au teils höhere Geschwindigkeiten für die Ganglinie B. Dabei werden in der kleinen Binn, die durchgängig durchströmt wird, Geschwindigkeiten von bis zu 1m/s erreicht. Bei beiden Ganglinien steigt die Strömungsgeschwindigkeit bis zu diesem Maximum und reduziert sich daraufhin langsam wieder bis zur Anfangsgeschwindigkeit von ca. 0,1m/s, wobei die Ganglinie B einen steileren Kurvenverlauf aufweist. Der Zeitpunkt der maximalen Strömungsgeschwindigkeit ist dabei abhängig vom Standort innerhalb der kleinen Binn.

Im Bereich zwischen Zustrom GV1 und Traverse T ist der Strömungsverlauf zweigipflig, mit den stärksten Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich des Scheitelpunktes und einem weiteren jeweils ca. 20h nach den Scheitelpunkten. Ab der Traverse T bis zum Zusammenfluss mit der großen Binn in der Altarmmündung ist der Strömungsverlauf eingipflig. Insgesamt

verschiebt sich der Zeitpunkt des Strömungsmaximums in der kleinen Binn zwischen den Messstandorten P1 und P4 für beide Ganglinien um rund 18h (vgl. Abb. 82).

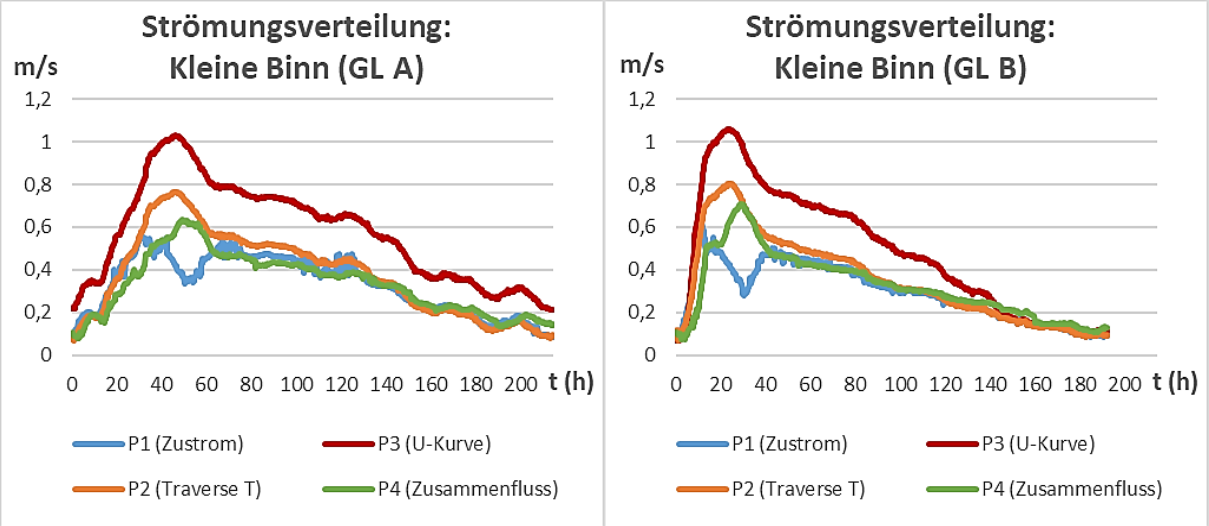


Abb. 82: Vergleich der Fließgeschwindigkeitsverläufe zwischen den Ganglinien an verschiedenen Messstandorten in der kleinen Binn (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK)

In der großen Binn zeigen sich für beide Ganglinien Geschwindigkeiten bis zu 1,4m/s. Die Strömung beginnt dabei zunächst über die beiden Zuströme GV2 und GV3 in die große Binn zu fließen und zeigt für beide Ganglinien eine vergleichbare eingipflige Geschwindigkeitsverteilung, die sich durch die gesamte große Binn fortsetzt. Hierbei zeigt die Ganglinie B jedoch eine deutlich steilere Anstiegskurve. Der zunächst von stromabwärts durchströmte Bereich bis zur Furt (P7) zeigt ab dem Zusammenfluss mit dem Wasser von stromaufwärts eine Zunahme in der Strömungsgeschwindigkeit, wobei der Kurvenverlauf flacher ausfällt, als im Bereich vor der Furt (P6) (vgl. Abb. 83).

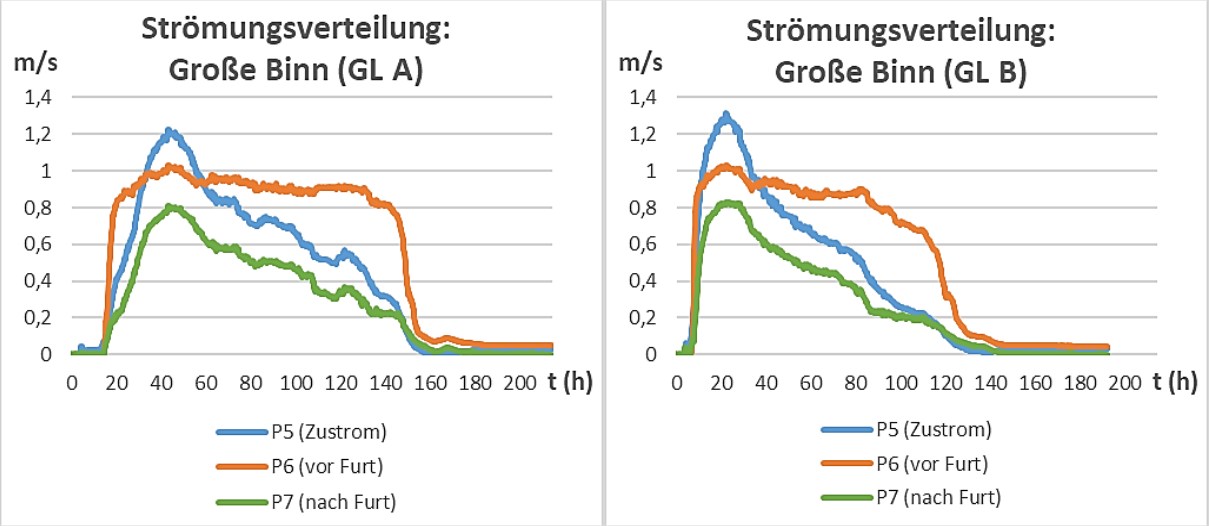


Abb. 83: Vergleich der Fließgeschwindigkeitsverläufe zwischen den Ganglinien an verschiedenen Messstandorten in der großen Binn (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK)

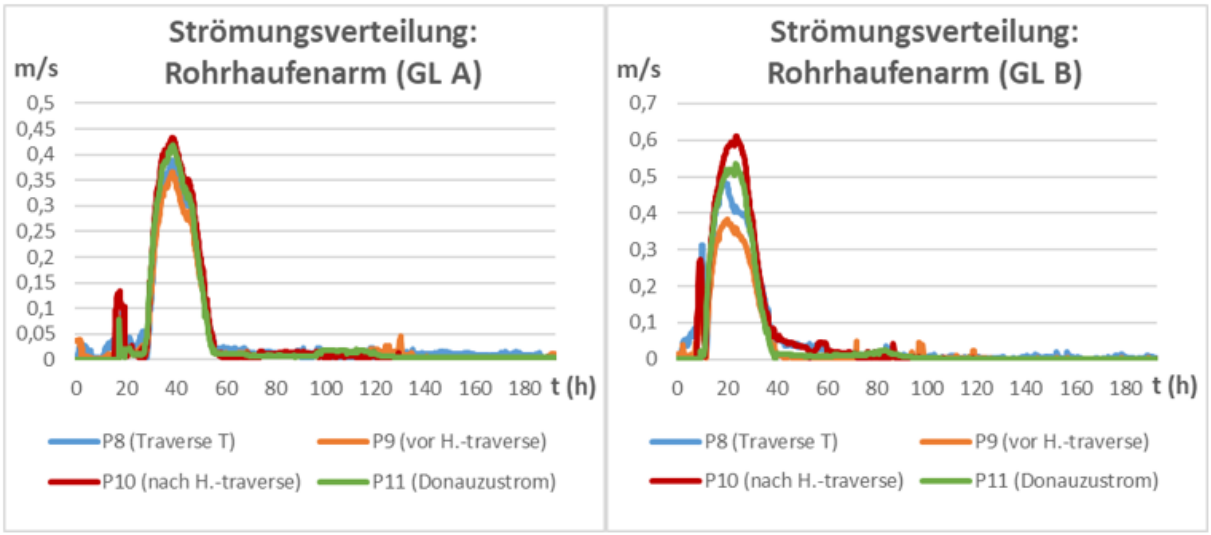


Abb. 84: Vergleich der Fließgeschwindigkeitsverläufe zwischen den Ganglinien an verschiedenen Messstandorten im Rohrhaufenarm (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK)

Der Rohrhaufenarm zeigt von seinem Zustrom bei Traverse T (P8) bis zum Zustrom der Donau (P11) für beide Abflussganglinien einen vergleichbaren zweigipfligen Strömungsverlauf, mit einem deutlich höheren zweiten Maximum. Für die Ganglinie A sind die Fließgeschwindigkeiten im gesamten Rohrhaufenarm ähnlich. Die Ganglinie B zeigt unterschiedliche Geschwindigkeitsverteilungen mit höheren Werten im Bereich des Donauzustroms (P11) und nach der Hirschensprungtraverse (P10). Insgesamt werden im Rohrhaufenarm durch die Abflussganglinien Fließgeschwindigkeiten von bis zu 0,45m/s für die Ganglinie A bzw. 0,6m/s für die Ganglinie B erreicht (vgl. Abb. 84).

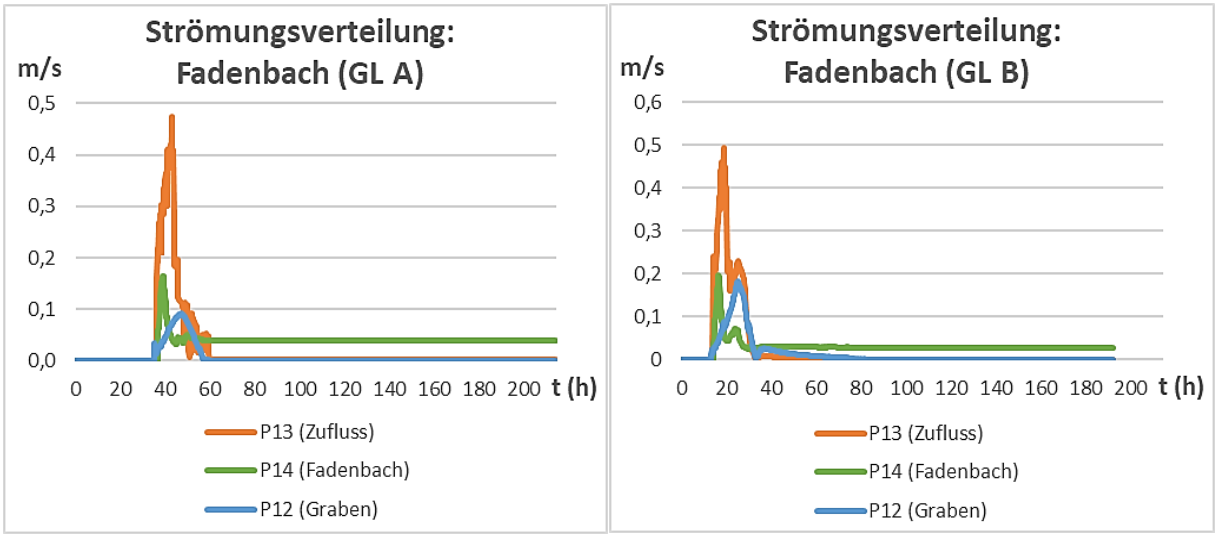


Abb. 85: Vergleich der Fließgeschwindigkeitsverläufe zwischen den Ganglinien an verschiedenen Messstandorten beim Fadenbach (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK)

Der Fadenbach wird bei beiden Ganglinien über einen kleinen Graben von der kleinen Binn aus überflutet. Dabei zeigt sich innerhalb des Grabens und Fadenbachs für die Ganglinie A ein eingipfliger Strömungsverlauf. Für die Ganglinie B gibt es ein zweites sehr viel niedrigeres

Strömungsmaximum kurz nach dem Scheitelpunkt. Vor allem in der Engstelle am Zufluss (P13) des Grabens in den Fadenbach ergeben sich für beide Ganglinien die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten mit um die 0,4m/s, bei sonst eher niedrigen Geschwindigkeiten von bis zu 0,2m/s im Graben und Fadenbach (P12 & P14) (vgl. Abb. 85).

Im Donauarm herrschen sehr unterschiedliche Strömungsverteilungen mit eingipfligen, zweigipfligen oder mehrgipfligen Verläufen. Dabei bleiben die Fließgeschwindigkeiten für die Abflussganglinien für den Großteil des Donauarms unterhalb von 0,1m/s für die Ganglinie A und 0,14m/s für die Ganglinie B (vgl. Abb. 86).
Nur sehr temporär und lokal bilden sich im Überflutungsverlauf beider Ganglinien Wirbel mit höheren Geschwindigkeiten von bis zu 0,4m/s. Im Einflussbereich der Altarmmündung erreichen beide Ganglinien Fließgeschwindigkeiten von bis zu 0,2m/s.

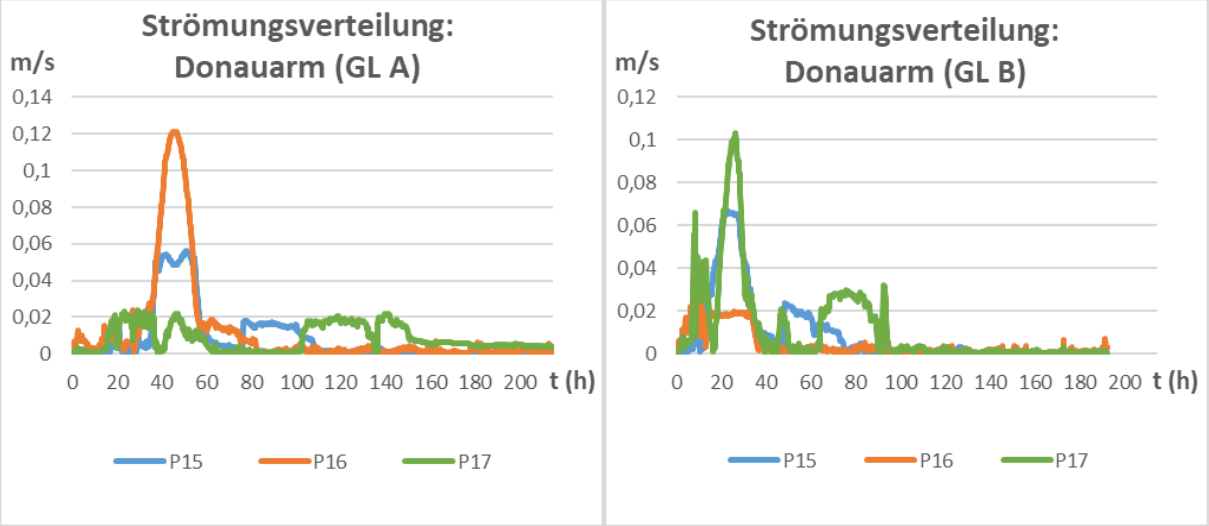


Abb. 86: Vergleich der Fließgeschwindigkeitsverläufe zwischen den Ganglinien an verschiedenen Messstandorten im Donauarm (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK)

Anhand der Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen lassen sich visuell auch die entscheidenden Einström- und Ausströmbereiche, sowie Überflutungsrichtungen für die verschiedenen Aubereiche identifizieren:

Der südliche Aubereich wird im Ablauf des Fließverhaltens beider Ganglinien als erstes überflutet. Dabei strömt Wasser vom Donauarm und der Altarmmündung mit bis zu 0,2m/s über die sich im Uferbereich befindende Verwaldungszone ein und verteilt sich in der Folge mit geringen Geschwindigkeiten großflächig nach Westen hin, bis es auf höhere Bereiche trifft. In der Folge schafft das Wasser es nicht, sich weiter in die südliche Au auszubreiten. Nur über kleine Gräben gelangt im weiteren Fließverlauf noch geringfügig Wasser in die weiter westlich gelegenen Bereiche, jedoch ohne diese großflächig zu überfluten. Der dünne Streifen zwischen der Donau und dem Donauarm wird für beide Ganglinien an zwei Stellen mit Fließgeschwindigkeiten von bis zu 0,2m/s von der Donau aus überflutet und das Wasser

strömt weiter in den Donauarm. Dies führt im Donauarm zu Verwirbelungen, ein Teil des Wassers wird dadurch in die südliche Au weitergegeben. Nach dem Scheitelpunkt dreht sich die Strömungsrichtung in der südlichen Au wieder in Fließrichtung um und das Wasser läuft mit weniger als 0,1m/s ab.

Die zentrale Au wird für beide Ganglinien kurz nach der südlichen Au mit Fließgeschwindigkeiten von 0,2m/s am Zusammenfluss der kleinen und großen Binn gegen die Strömungsrichtung überflutet. Hierbei ist die am Ufer gelegene Verwaldungszone zuerst betroffen, wobei das Wasser direkt in den Auwald weiter fließt. Der Strömungsverlauf in diesem Bereich der zentralen Au ist dabei zweigipflig, mit einem längeren abfließenden Strömungsdauer. Die zentrale Au ist von der kleinen und großen Binn umschlossen und wird im weiteren Fließverlauf an vielen Uferbereichen überflutet. Das innerhalb der zentralen Au zwischen kleiner und großen Binn verlaufende Grabensystem spielt dabei eine entscheidende Rolle, da sich hierüber eindeutige Strömungsrichtungen einstellen. So zeigt beispielsweise ein zunächst aus der großen Binn unterstromig durchströmter Graben einen eindeutigen zweigipfligen Strömungsverlauf für die Ganglinie B mit bis zu 0,12m/s für das in Richtung Westen einströmende Wasser und 0,2m/s für das im Fließverlauf wieder nach Osten ausströmende Wasser. Auch für die Ganglinie A ist ein zweigipfliger Strömungsverlauf erkennbar, jedoch mit einer höheren unterstromigen Fließgeschwindigkeit von 0,12m/s gegenüber dem anschließend oberstromig abfließenden Geschwindigkeiten von 0,08m/s. Für das aus Westen kommende Wasser werden am einströmenden Bereich am rechten Ufer der kleinen Binn, auf Höhe der Traverse T, Fließgeschwindigkeiten von bis zu 0,2m/s für die Ganglinie B erreicht. Für die Ganglinie A ist dieser Strömungsverlauf weniger stark ausgeprägt, weshalb sich hier nur geringe Fließgeschwindigkeiten von bis zu 0,1m/s über eine kurze Zeit einstellen. Ein weiterer bedeutsamer Graben für das Fließverhalten der zentralen Au befindet sich kurz vor der Tierbodentraverse mit einer Nord-Süd Ausrichtung. In diesem zeigen sich um den Scheitelpunkt herum für die Ganglinien Fließgeschwindigkeiten von rund 0,2m/s (GL A) bzw. 0,4m/s (GL B) in Richtung der kleinen Binn, wobei nur für die Ganglinie B, die von der kleinen Binn nach Süden gerichtete Strömung komplett in Richtung Norden umgedreht wird. Mit ablaufendem Wasser dreht sich die Strömung für beide Ganglinien wieder nach Süden um und das Wasser läuft mit sehr geringen Fließgeschwindigkeiten ab. Das durch diesen Graben strömende Wasser hat für die Ganglinie B zur Folge, dass sich eine eindeutige Strömung im östlichen Teil der zentralen Au in Richtung des Zusammenflusses der kleinen und großen Binn einstellt. Für die Ganglinie A fehlt diese Strömungsrichtung in dem großflächig überfluteten Auwald, weshalb das Wasser in diesem Gebiet keine eindeutige Strömungsrichtung und nur niedrige Fließgeschwindigkeiten aufweist. Insgesamt zeigt sich auch für die zentrale Au, dass die höher gelegenen Aubereiche nicht überflutet werden und das Wasser durch die vorhandenen Gräben und tiefer gelegenen Bereiche fließt.

Für die westliche Au ist der Hauptein- und ausströmbereich für beide Ganglinien an einem an die kleine Binn angrenzenden Graben unterhalb der Traverse T. Dabei strömt das Wasser in einem zweigipfligen Verlauf aus der kleinen Binn mit bis zu 0,5m/s in den Auwald der westlichen Au bzw. wieder zurück. Mit steigenden Abflüssen kommt es auch stromaufwärts des Grabens zu einströmenden Fließgeschwindigkeiten von bis zu 0,1m/s und entlang des Donauufers bei Stromkilometer 1905,6 mit bis zu 0,2m/s für GL A bzw. 0,3m/s für GL B. Für die Ganglinie B kommt zusätzlich noch ein weiterer Einströmbereich am Donauufer bei Stromkilometer 1905,8 hinzu, mit geringen Fließgeschwindigkeiten von 0,08m/s.

Für die nördliche Au unterscheiden sich die Bereiche, über die Wasser in das Gebiet ein- oder ausströmt. Für die Ganglinie A gelangt nur über die U-Kurve der kleinen Binn Wasser mit Fließgeschwindigkeiten unterhalb von 0,1m/s und einem eingipfligen Verlauf, sowie durch Uferübertretungen am Fadenbach und dem angrenzenden Graben in die nördliche Au. Das Wasser aus den Uferüberflutungen des Fadenbachs und des Grabens zeigt dabei noch geringere Fließgeschwindigkeiten, als das aus der kleinen Binn kommende Wasser. Auch für die Ganglinie B strömt das Wasser über die U-Kurve der kleinen Binn und über den Fadenbach und den Graben in die nördliche Au. Jedoch zeigt das von der kleinen Binn ausgehende Wasser höhere Fließgeschwindigkeiten von bis zu 0,4m/s. Außerdem kommt es ein Stück weiter östlich zu einem zusätzlichen Einströmbereich, der jedoch nur geringe Fließgeschwindigkeiten unterhalb 0,1m/s aufweist. Ein entscheidender Unterschied liegt in der vom Rohrhaufenarm ausgehenden Überflutung. Hier läuft das Wasser mit einem eingipfligen Verlauf mit bis zu 0,2m/s in den Auwald und führt mit einer zu Beginn nach Norden gerichteten Strömung für eine breitflächige Überflutung bis zum Marchfeldschutzdamm.

6.4 Überflutungsflächen

Die Überflutungsflächen konnten von BASEMENT nicht direkt ausgegeben werden. Daher wurde alternativ die Ausgabe der simulierten Wassertiefen der Dreieckselemente des Rechennetzes als Shapefile eingestellt, womit die Wassertiefen für das ausgewählte Ausgabeintervall als Attribut angehängt werden konnten. Die Fläche der Dreieckselemente musste anschließend für die jeweiligen Zeiten und Wassertiefen zusammengerechnet werden.

Der resultierende Verlauf der Überflutungsflächen im Projektgebiet zeigt für die Simulation der Ganglinie B einen vergleichbaren Kurvenverlauf zu ihrem Abflussverlauf. Dabei nimmt die Überflutungsfläche kontinuierlich bis über den Zeitpunkt des Scheitelpunkts hinaus zu. Für die Ganglinie A verläuft die Zunahme der Überflutungsflächen zunächst ähnlich zu ihren Abflussverlauf. Jedoch gibt es 15h vor ihrem Scheitelpunkt einen starken Anstieg in den Überflutungsflächen, wodurch sie eine ähnliche Anstiegsrate in den Überflutungsflächen

erreicht, wie für die Ganglinie B. Die größte Überflutungsausdehnung erreicht die Ganglinie A rund 15h nach ihrem Scheitelpunkt mit einer Überschwemmungsfläche von 1,8km². Auch die Ganglinie B erreicht ihre flächenmäßig größte Überflutungsausdehnung ca. 15h nach dem Scheitelpunkt, mit einer Fläche von 2,80km², wobei sich die Fläche noch bis zu einer Gesamtlaufzeit von 80h geringfügig auf 2,81km² vergrößert. Damit sind von dem 5,42km² großen Projektgebiet für die Ganglinie A rund 33% und für die Ganglinie B knapp 52% der Fläche von Überflutung betroffen. Die überfluteten Flächen bleiben bis nach Ende der Laufzeit in einem feuchten Zustand, wodurch die Kurven nicht wieder absinken (vgl. Abb. 87).

Betrachtet man die Kurvenverläufe jedoch nach Wassertiefen, zeigt sich ein anderes Abbild. So nehmen die Überflutungsflächen mit höheren Wassertiefen nach ihrem Maximum am Scheitelpunkt wieder ab, wobei die Überflutungskurven für die höheren Wassertiefen weniger stark ansteigen. Hierbei ergeben sich weniger Überflutungsflächen für die größeren Wassertiefen, wodurch flachere Kurvenverläufe resultieren. Für Wassertiefen ab 0,1m beträgt das Überflutungsmaximum 1,61km² (GL A) bzw. 2,32km² (GL B) und reduziert sich bis zum Ende der Laufzeit um 44% auf 0,91km² für die Ganglinie A und um 37% auf 1,46km² für die Ganglinie B. Bei 0,5m Wassertiefe beträgt das maximale Überflutungsausmaß 1,09km² (GL A) bzw. 1,48km² (Gl B) mit einer Reduzierung um 60% auf 0,44km² (GL A) bzw. 59% auf 0,60km² (GL B). Nur rund 0,63km² der Flächen erreichen eine Wassertiefe von 1m für die Ganglinie A, welche sich bis Laufzeitende um 76% auf 0,15km² verringert. Für die Ganglinie B sind es 0,83km² mit einer Reduktion von 77% auf 0,19km². Eine Wassertiefe von 2m erreichen nur 0,30km² (GL A) bzw. 0,33km² (GL B), welche sich bis zum Laufzeitende für die Ganglinie A um 96% und für die Ganglinie B um 95% auf nur noch 12.743m² bzw. 17.341m² reduzieren. Damit zeigen die höher überfluteten Flächen für beide Abflussganglinien eine stärkere Reduktion als die mit geringeren Wassertiefen (vgl. Abb. 87).

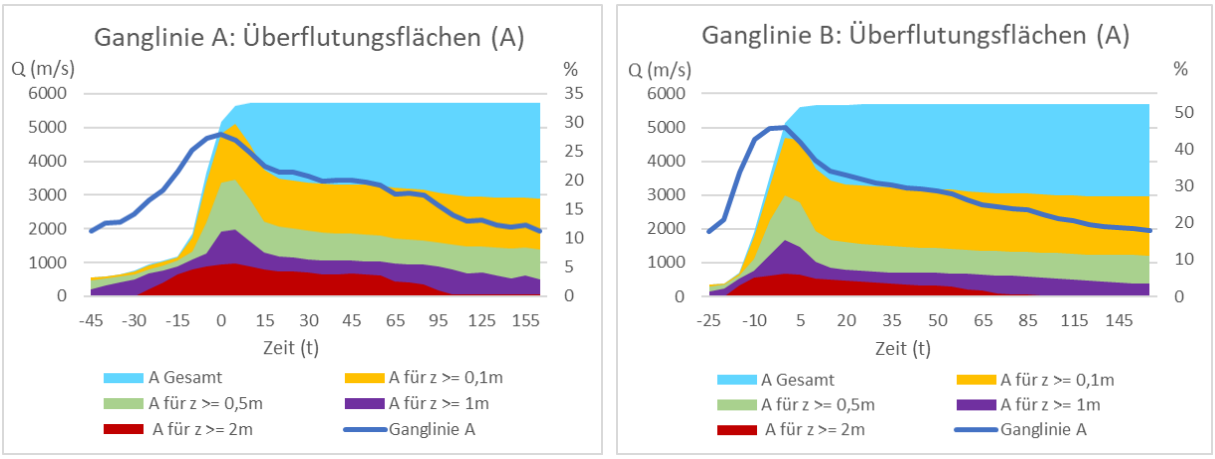


Abb. 87: Überflutungsflächen im Projektgebiet für die beiden Ganglinien für unterschiedliche Wassertiefen (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK)

Das gesamte Überflutungsausmaß in den einzelnen Projektgebietszonen zeigt vor allem in der nördlichen Au für die Ganglinie B eine größere Überflutung. In diesem Gebiet sind für die Ganglinie A nur rund 0,19km² (8%) der Flächen von Überschwemmungen betroffen, wohingegen für die Ganglinie B eine Fläche von 0,83km² (35%) überflutet wurde. Die Westliche Au zeigt eine Überflutungsfläche von 0,45km² (67%) für die Ganglinie A und mit 0,52km² (79%) eine etwas größere Fläche für die Ganglinie B. In der zentralen Au sind 0,66km² (51%) für die Ganglinie A und eine um 17% größere Fläche von 0,88km² (69%) für die Ganglinie B betroffen. Die südliche Au zeigt nur eine geringfügig größere Überflutung der Ganglinie B mit 0,38km² (47%) gegenüber der Ganglinie A mit 0,35km² (43%) (vgl. Abb. 88).

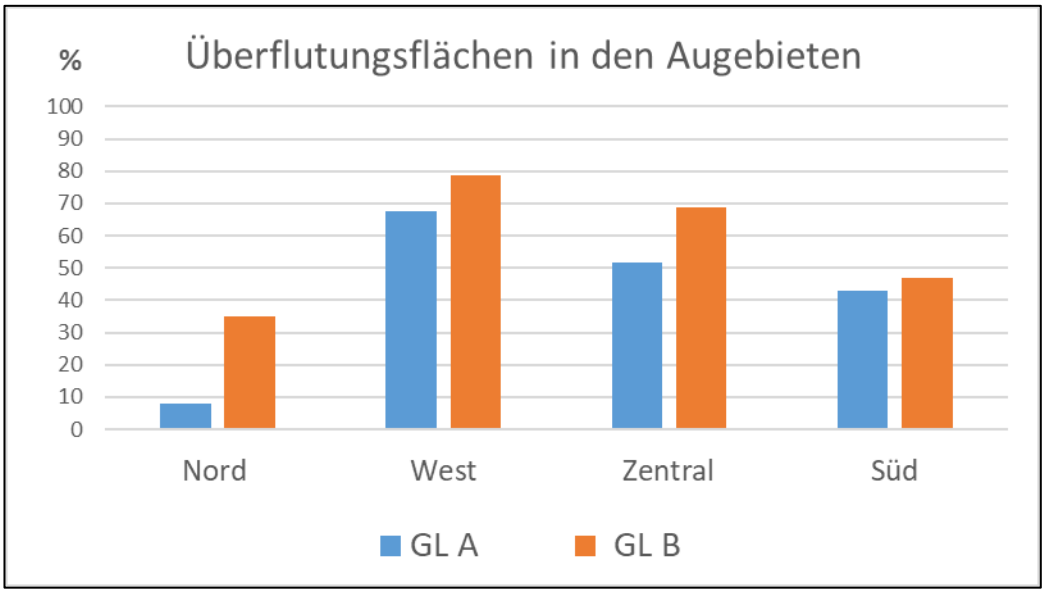


Abb. 88: Vergleich der Überflutungsflächen für die beiden Ganglinien nach Augebieten (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK)

6.5 Überflutungsvolumen

Das Überflutungsvolumen im Projektgebiet konnte von BASEMENT direkt für das ausgewählte Stundenintervall ausgegeben werden. Dieses zeigt für beide Abflussganglinien einen ähnlichen Kurvenverlauf. Dabei steigt das Volumen mit zunehmenden Abflüssen bis zu einem maximalen Volumenwert und fällt anschließend wieder. Hierbei ähnelt der Kurvenverlauf den dazugehörigen Abflussganglinienverlauf, wobei die Anstiegs- und Abfallraten etwas steiler ausfallen. Zudem ist der Scheitelpunkt des Wasservolumens im Vergleich zur Abflussganglinie zeitlich nach hinten versetzt. Für die Ganglinie A befindet sich das meiste Wasservolumen im Projektgebiet nach 48h Simulationszeit mit rund 1940 Mio. Liter und damit knapp drei Stunden nach dem Scheitelpunkt. Für die Ganglinie B verhält es sich ähnlich mit rund 2490 Mio. Liter nach zwei Stunden Ablaufzeit. Betrachtet man beide Kurvenverläufe des Wasservolumens miteinander fällt auf, dass das Wasservolumen der Abflussganglinie B nach dem ersten

Überschreiten der Werte der Abflussganglinie A stets über dieser bleibt. Dies verhält sich gegenteilig zu den Kurvenverläufen der Abflusswerte, bei denen die Ganglinie B nach ihrem höheren Scheitelpunkt wieder unter die Werte der Ganglinie A fällt (vgl. Abb. 89).

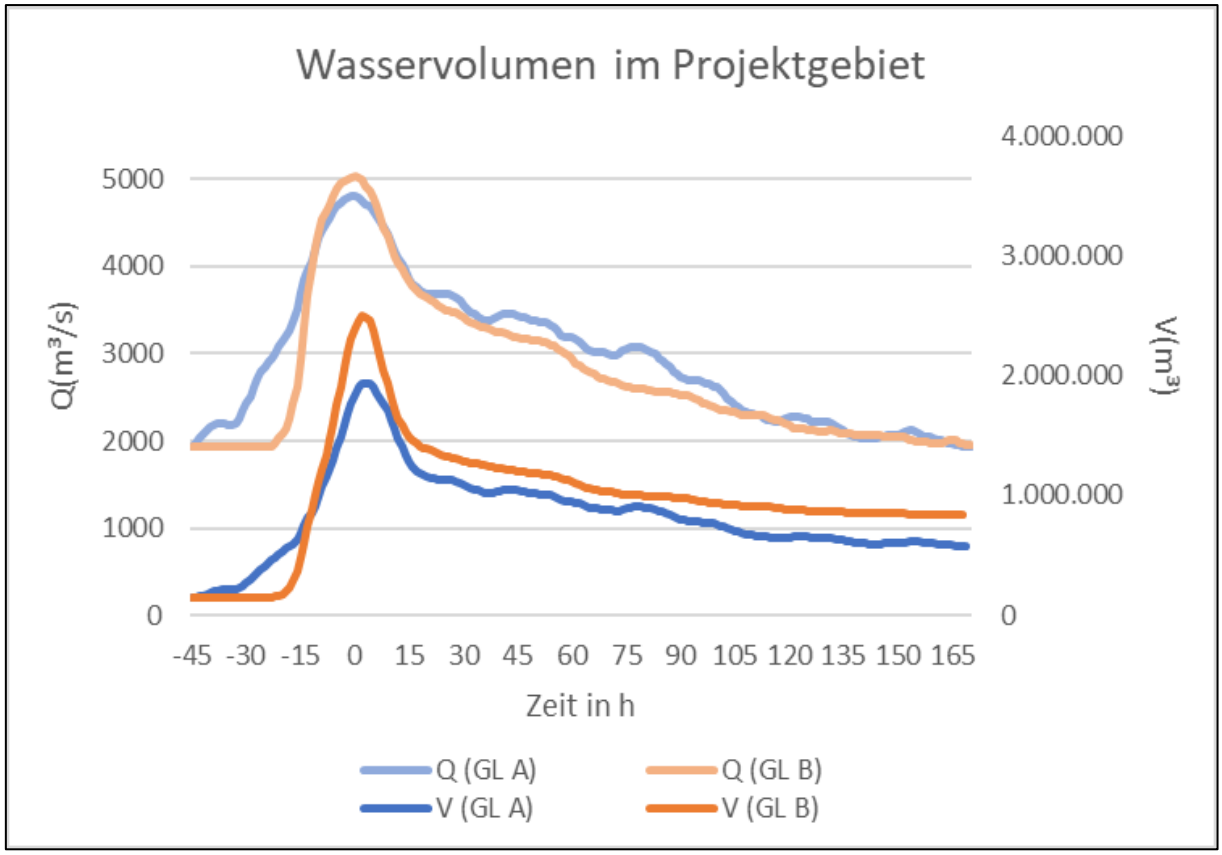


Abb. 89: Vergleich der Wasservolumenverläufe im Projektgebiet zur jeweiligen Abflussganglinie (Eigene Darstellung, 2023; Datenquelle: viadonau/DHK)

7 Diskussion

Die Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten unter verschiedenen Aspekten diskutiert. Zunächst wird die verwendete Datenbasis und Methodik auf Probleme und Verbesserungsmöglichkeiten für die Simulation erörtert. Anschließend werden die Ergebnisse, aufgrund fehlender Referenzwerte für eine Kalibrierung, auf deren Plausibilität überprüft. Daraufhin werden die in den Kapiteln 6.1 bis 6.5 präsentierten Ergebnisse auf deren Unterschiede im Überflutungsgeschehen analysiert und die möglichen Ursachen begründet. Hierbei werden auch die in Kapitel 1.3 gestellten Arbeitsfragen beantwortet.

Diskussion der Datenbasis & Methodik

Die Erstellung eines hydrodynamisch-numerischen Modells zum Überflutungsgeschehen in den Donau-Auen, erforderte einige topographische und hydrologische Daten (vgl. Kapitel 2.8).

Von der Nationalparkverwaltung bestand eine gute Datenbasis über den Nationalpark, in Form eines digitalen Geländemodells mit einer Rasterauflösung von einem Meter, einer punktuellen Naturrauminventur und diversen Vektordaten zur räumlichen Abgrenzung des Nationalparks, sowie der Seiten- und Altarme der Donau. Vom wasserstraßenbeauftragten Unternehmen viadonau wurden auf Anfrage sehr gute hydrologische und topographische Datensätze über die Donau und das Nationalparkgebiet übermittelt. Darunter Pegelmessdaten, mit Fächerecholot aufgenommene Querprofile der Donau, sowie weitere Vektordaten, die zur exakten Abgrenzung der Donau notwendig waren.

Für die Erstellung der Geometriedateien für den 1D und 2D Modellbereich mussten die Daten mit einem GIS aufbereitet werden (vgl. Kapitel 5.2). Eine direkte Benützung der Daten in der HN-Modellierungssoftware BASEMENT war nicht möglich, da zum einen die Querprofile für die 1D-Geometrie nicht den gesamten Bereich bis zu den Ufern abdeckten und es zum anderen für die Erstellung der 2D-Geometrie keine direkt verwendbaren Bruchkanten und Regionsabgrenzungen gab. Innerhalb von BASEMENT konnten nur 1D-Geometrien bearbeitet werden, die bereits das richtige Format und die erforderliche Struktur aufwiesen. Bei der Erstellung der 1D- und 2D-Geometrien galt es topologisch sauber zu arbeiten, um Fehler zu vermeiden (vgl. Kapitel 5.2). Vor allem für das Rechennetz des 2D-Modellbereichs musste das richtige Maß zwischen Detailliertheit und Generalisierung gefunden werden, wodurch das Rechennetz mehrmalig verbessert werden musste. Hierbei gilt allgemein, dass ein qualitativ hochwertiges Rechennetz auch einen guten visuellen Eindruck hinterlassen sollte (Vetsch et al., 2022e: 52).

Für die Vorverarbeitung war neben einem GIS auch eine weitere HN-Modellsoftware notwendig, um die Geometrien in die von BASEMENT geforderte Form zu bringen (vgl. Kapitel

5.2). Dies erforderte neben Kenntnissen für BASEMENT, auch mit vorhandenen Tutorials, die grundlegende Erlernung zweier weiterer Softwares. Dies schränkte die Benutzerfreundlichkeit stark ein. Hinzu kam, dass die Tutorials von BASEMENT nicht auf Updates der externen Softwares aktualisiert und zugleich keine Softwareversionen genannt wurden. Dadurch waren die Tutorials zum Teil nicht anwendbar und es musste ein eigener Workflow erarbeitet werden. Des Weiteren war der AnwenderIn, durch das QGIS PlugIn BASEmesh, welches für die Datenkonvertierung notwendig war, bei der Auswahl des Geoinformationssystems eingeschränkt. Bei dem Integrationsansatz zwischen HN-Modellsoftware und GIS handelt es sich bei BASEMENT daher um eine lose Kopplung. (vgl. Kapitel 2.7).

Neben den genannten Problemen in der Datenvorverarbeitung und der Methodik zeigten die Simulationsergebnisse mögliche qualitative Verbesserungsmöglichkeiten am Rechennetz, die auf Abweichungen des Projektgebiets zur Realität zurückzuführen sind.
Dies wurde vor allem für Durchlässe bei Traversen festgestellt, die mit der ALS Methode nicht erfasst werden konnten (vgl. Kapitel 2.6). Im Rechennetz wurde somit die Oberfläche der Traverse dargestellt, wodurch das Wasser diese erst bei Überschreiten der Geländehöhe passieren konnte. In der Realität kann das Wasser jedoch bereits bei niedrigeren Wasserständen durch die entsprechenden Durchlässe strömen. Dies ist beispielsweise der Fall für den Verbindungsgraben zwischen der kleinen Binn und dem Fadenbach, sowie für die Tierbodentraverse. Auch die Lücke im Fadenbach, die durch eine höher gelegene Straße resultiert, hat einen Durchlass (vgl. Kapitel 3.3: Abb. 28 & 31). Um dies bei der Rechennetzerstellung zu berücksichtigen, müsste ein entsprechender Brückendurchlass integriert werden. Bei BASEMENT v.2.8.2 ist dies bisher nicht möglich. Alternativ könnte man jedoch die Höhenangabe des Rechennetzes manipulieren, indem man die Höhenwerte der Knotenpunkte anpasst.
Eine weiteres mögliches Verbesserungspotenzial stellt die Auflösung des Rechennetzes dar. In den Ergebnissen wurden, entgegen den Erwartungen, drei unmittelbar an den Seitenarmen befindliche Gräben nicht durchströmt, was auf eine zu geringe Rechennetzauflösung zurückzuführen sein könnte. Durch die niedrigere Auflösung wurde das Relief durch größere Dreiecke dargestellt, die im Modell ein Hindernis für das Wasser darstellen könnten (vgl. Kapitel 5.2.2). Bei den Gräben handelt es sich um den westlich des Rohrhaufenarms gelegenen Graben in der nördlichen Au, den Verbindungsgraben zwischen der Donau (Str.km. 1904,3) und der großen Binn, sowie dem vom westlichen Ende des Donauarms in die südliche Au verlaufenden Graben. Eine höhere Auflösung des Rechennetzes in diesen Bereichen könnte das Überflutungsgeschehen im westlichen Nord-Augebiet und der südlichen Au nochmals verändern. Die Auflösung des Reliefs spielt eine wichtige Rolle für die Modellierung des Fließverlaufs. Die genauere Darstellung der räumlich kleineren Geländestrukturen durch ein feineres Rechennetz ist von entscheidender Bedeutung, um die Strömungen durch das

Grabensystem zu berücksichtigen. Zugleich muss die Auflösung des Rechennetzes in einem Rahmen gehalten werden, um die Rechenzeit auf einem vom AnwenderIn selbst bestimmten akzeptablen Niveau zu halten. Für die Auflösung des Rechennetzes ist schlussendlich die räumliche Auflösung des DGM und die hardware-bedingte Rechenleistung der begrenzende Faktor (vgl. Vetsch et al., 2022e: 48).

Abschließend sei noch erwähnt, dass auch der Einfluss des Grundwassers in den Simulationsergebnissen unberücksichtigt blieb. Für die Auen konnte eine hohe Konnektivität zwischen dem Wasserstand im Fluss, sowie seinen Seitenarmen und dem Grundwasser festgestellt werden. Hierbei gibt es zudem eine Korrelation zwischen den Austauschbedingungen und der Entfernung zur Donau (Heiler et al., 1995: 359).
Da es innerhalb von BASEMENT keine Möglichkeit gibt, die Austauschprozesse zwischen dem Oberflächen- und Grundwasser zu berücksichtigen, wurde der Einfluss des Grundwassers vernachlässigt. Allerdings verweisen Vetsch et al. (2023b: 78) auf die Option hin, die Ergebnisse von BASEMENT, wie beispielsweise die simulierten Wasserstandswerte, mit externen Grundwassermodellen zu verknüpfen.

Die Ergebnisse einer hydrodynamisch-numerischen Simulation können immer nur so gut sein, wie die Datenbasis für das Projektgebiet ist und wie realitätstreu dieses wiedergegeben wird. Für die korrekte technische Verarbeitung und Interpretation der Daten ist der AnwenderIn zuständig. Dieser entscheidet durch die Softwareauswahl auch über die Art der Integration zwischen GIS und HN-Modellsoftware (vgl. Kapitel 2.7). Hierbei sind Kenntnisse zu den Softwares und über das Projektgebiet empfehlenswert.
Trotz der aufgetretenen Probleme in der Methodik sind hydrodynamisch-numerische Modelle eine kostengünstige Möglichkeit für die Flussmodellierung und stellen den heutigen Stand der Technik dar. Mit den steigenden Rechnerkapazitäten kann davon ausgegangen werden, dass die HN-Modelle sich stark weiterentwickeln werden, wodurch auch komplexere und größere Modelle, vor allem im dreidimensionalen Raum, möglich werden (Oertel & Bung, 2014: 29).

Diskussion der Plausibilität

Die hydrologischen Ergebnisse der beiden Simulationen zeigen für beide Abflussganglinien eine gute Übereinstimmung der Wasserstandswerte mit denen des Referenzpegels Orth (vgl. Kapitel 6.1). So werden trotz der fehlenden Kalibrierung für instationäre Abflüsse für den Modellausgang sehr ähnliche Wasserstände simuliert. Zwar unterschätzt das Modell die Wasserstandswerte für die Ganglinie A im Durchschnitt um 23cm, jedoch befindet sich der simulierte Scheitelpunkt wieder auf demselben Niveau. Zugleich zeigt das Modell bereits für

die schnellere und etwas abflussstärkere Ganglinie B eine sehr gute Übereinstimmung der Wasserstandswerte mit einer mittleren Abweichung von nur 5cm. Eine Ursache für das bessere Abschneiden der Ganglinie B könnte darin liegen, dass das HN-Modell mit den stationären Abflusswerten eines HSW kalibriert wurde (vgl. Kapitel 5.3.3). Da sich der Scheitelpunkt der Ganglinie B näher an diesen Abflusswerten befindet, könnten die Modellparameter besser auf dieses Abflussniveau angepasst sein. Daher müssten mit einer zusätzlichen Kalibrierung für instationäre Abflusswerte, die Modellparameter so angepasst werden, dass die simulierten Wasserstandswerte für die Ganglinie A sich weiter an die Referenzdaten anpassen und zugleich die bereits guten Ergebnisse für die Ganglinie B erhalten bleiben. Eine solche Kalibrierung erfordert jedoch weitere Referenzdaten in Form von Wasserstandsdaten aus dem Projektgebiet. Für den Vergleich des Überflutungsgeschehen der beiden Ganglinien zeigen die simulierten Ergebnisse eine ausreichend gute Übereinstimmung mit den Referenzdaten.

Dies zeigt sich auch in den simulierten Fließgeschwindigkeiten innerhalb der Seitenarme im Projektgebiet (vgl. Kapitel 6.3). Die Strömungsgeschwindigkeiten in der kleinen und großen Binn wurden im Zuge der Gewässervernetzung Orth durch ein ökologisches Monitoring über die hydrologische Situation und Morphometrie der Orther Auen erhoben (vgl. Reckendorfer, 2000). Die in der Studie für ein HSW gemessenen Fließgeschwindigkeiten können, unter Berücksichtigung der geringfügig höheren Abflusswerte der Studie und der inzwischen vorhandenen Gewässervernetzung, mit den durch das HN-Modell simulierten Werten verglichen werden. Hierbei zeigen sich in den meisten Gewässerabschnitten vergleichbare Fließgeschwindigkeiten. Da die Messungen noch vor der Gewässervernetzung gemacht wurden, zeigen sich auch Unterschiede in den Fließgeschwindigkeiten. So sind die simulierten Höchstgeschwindigkeiten im Einströmbereich GV3 der großen Binn teilweise höher als die Messungen und auch in der Altarmmündung wurden höhere Fließgeschwindigkeiten simuliert (vgl. Reckendorfer, 2000: 10). Diese Unterschiede sind sehr wahrscheinlich auf den Uferrückbau durch die Gewässervernetzung zurückzuführen, da hierdurch mehr Wasser von der Donau in die Seitengewässer strömen kann, was wiederum zu höheren Fließgeschwindigkeiten führt. Dies wird auch durch die in der Studie höheren gemessenen Wasserstände für die Einströmbereiche der kleinen und großen Binn, im Vergleich zu den simulierten Werten, bekräftigt (Reckendorfer, 2000: 12).

Neben dem Vergleich der Wasserstandswerte und der Fließgeschwindigkeiten mit vorhandenen Referenzdaten, zeigen die Ergebnisse auch die in diversen Studien festgestellten typischen Veränderungen in der Ganglinienform, durch die Überflutung von Retentionsflächen, auf (vgl. Asenkerschbaumer et al., 2012; Rak et al., 2016; Schober et al., 2020). So zeigt sich für beide Ganglinien eine Verzögerung und Reduzierung des Scheitelpunkts, was auf eine Retention durch das Projektgebiet hinweist. Hierbei nimmt das

zu Beginn der Simulationen noch trockene Projektgebiet Wasser aus der Donau auf, wodurch es zunächst zu einer Reduktion der Abflusswerte am Modellausgang kommt. In der weiteren Folge reduziert sich dieses Aufnahmevermögen zunehmend und damit auch die Abflussreduktion. Nachdem die Abflusswerte den Scheitelpunkt erreicht haben und sich wieder verringern, beginnt das Wasser verstärkt aus den Retentionsflächen abzulaufen und führt in der Donau zu einer Abflusserhöhung am Modellausgang. Da das Wasser eine gewisse Zeit benötigt, um durch das Projektgebiet zu fließen, geschieht dies mit einer Verzögerung (vgl. Kapitel 6.3). Dies wird auch durch die Volumen- und Flächenveränderungen innerhalb des Projektgebiets bekräftigt, die beide kontinuierlich steigen und ihren Maximalwert erst mit einer Verzögerung nach dem Scheitelpunkt erreichen (vgl. Kapitel 6.4 & 6.5). Die Verzögerung des Scheitelpunkts ist dabei auch gut durch die erhöhte Fließgeschwindigkeit in der kleinen Binn zu sehen, deren Geschwindigkeitsverlauf mit zunehmender Entfernung vom Einströmbereich später ausschlägt (vgl. Kap. 6.3: Abb. 82).

Der Fließverlauf im Projektgebiet kann aufgrund der fehlenden Referenzdaten nur visuell überprüft werden. Grundsätzlich bestimmen das vorhandene Relief und die im Rechennetz integrierten Rauhigkeitsbeiwerte der Landschaftsklassen den Weg des Wassers. Dabei fließt das Wasser generell über die Seitenarme, vor allem über die kleine und große Binn, in die angrenzenden Gräben und in die flachen Augebiete. Dabei verteilt es sich in den Augebieten auch entgegengesetzt der Fließrichtungen der Seitenarme und Donau (vgl. Kapitel 6.2). Das Grabensystem spielt dabei eine wichtige Rolle, um das Wasser schneller in die verschiedenen Gebiete zu transportieren und Bereiche wie den Fadenbach und den Marchfeldschutzdamm zu erreichen (vgl. Kapitel 6.2; Hohensinner et al., 2004: 38). Die höheren Augebiete werden dagegen erst ab bestimmten Abflusswerten überflutet und sind von den Überflutungen weitestgehend unbetroffen. Erstaunlicherweise liegen die höheren Augebiete größtenteils näher an der Donau, entlang der befestigten Uferkante. Da die Donau die Uferkante erst bei höheren Abflüssen überflutet, sind diese Gebiete vom Überflutungsgeschehen stärker entkoppelt als die flacheren Augebiete entlang der Seitengewässer und Gräben, die bereits bei sehr viel niedrigeren Abflüssen überflutet werden (vgl. Kapitel 6.2). Die durch die befestigte Uferkante ausgelöste Entkoppelung könnte die Verlandung in diesen Aubereichen verstärkt haben, weshalb die höheren Augebiete hauptsächlich nahe der Donauuferkante liegen.

Innerhalb der überfluteten flachen Augebiete zeigt sich für manche Bereiche, dass die Offenflächen schneller als der Auwald überflutet werden (vgl. Kapitel 6.2). Dies deckt sich mit den Ergebnissen einer Studie von Wolski et al. (2018), in der Wiesen und landwirtschaftliche Flächen, aufgrund des geringeren Widerstands gegenüber Waldflächen, eine erhöhte Fließgeschwindigkeit aufweisen. Allerdings ist dies für manche Offenflächen nicht ersichtlich, weshalb hierzu keine eindeutigen Ergebnisse vorliegen. Die Rauhigkeitsbeiwerte der

Landschaftsklassen konnten aufgrund der fehlenden Referenzwerte nicht kalibriert werden und stellen die in der Literatur empfohlenen Werte von Chow et al. (1959: 109ff) dar.

Die Ergebnisse der Simulationen zeigten insgesamt ein plausibles Überflutungsgeschehen, dass sich für die Wasserstandswerte, Fließgeschwindigkeiten und Ganglinienform mit vorhandenen Messdaten vergleichen lässt. Für den Fließverlauf fehlen Referenzwerte, um die Ergebnisse validieren zu können. Mit der Sensitivitätsanalyse konnte jedoch ein Einfluss der Reliefauflösung und Rauhigkeitsbeiwerte auf das Wasservolumen im Projektgebiet festgestellt werden, der auch von wissenschaftlichen Studien nachgewiesen wurde (vgl. Kapitel 5.3.4; Rak et al., 2016; Wolski et al., 2018). In einem nächsten Schritt müssten die Ergebnisse mit Referenzmessungen im Projektgebiet verifiziert und das Rechennetz, sowie die Kalibrierungswerte ggf. angepasst werden.

Diskussion des Überflutungsgeschehen

Das Überflutungsgeschehen der beiden Abflussganglinien wurde im Ergebniskapitel 6.2.4 auf deren Fließverlauf und -geschwindigkeit, sowie deren Überflutungsflächen und -volumen im Projektgebiet verglichen. Die Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert und die Arbeitsfragen beantwortet (vgl. Kapitel 1.3).

Der Fließverlauf zeigte für die ersten beiden Schritte ein rascheres Vordringen des Wassers für die Ganglinie B, wodurch es in der Folge zu einer anderen Reihenfolge in der Überflutung kam als für die Ganglinie A. Aufgrund der höheren Abflüsse gelang somit mehr Wasser in die Seitenarme, wodurch der Wasserstand in diesen schneller ansteigen konnte und zugleich die Strömung erhöhte. Dies ist gut in der großen Binn und dem Rohrhaufenarm zu beobachten, in denen das Wasser für die Ganglinie B die noch trockenen Abschnitte schneller überflutete, wohingegen die Ganglinie A fast doppelt so lange benötigte. Dabei spielt auch die Abflusshöhe eine entscheidende Rolle, um gewisse Geländestrukturen, wie die Furt oder die Hirschensprungtraverse überfluten zu können. Allerdings zeigt sich durch den langsameren Anstieg der Abflusswerte bei der Ganglinie A, dass die Bereiche auch für niedrigere Abflusswerte überflutet werden (vgl. Kapitel 6.2.4).
Die nachfolgenden Schritte drei bis fünf zeigten einen ähnlichen Fließverlauf der Ganglinien, was daran liegt, dass sich die Abflusswerte und deren Anstiegsrate angleichen. Dies ist gut durch die Schnittstelle der beiden Ganglinien gekennzeichnet (vgl. Kapitel 6.5: Abb. 89).

Die Ergebnisse der Scheitelpunkte weisen für die Ganglinie B wiederum ein verändertes Fließverhalten gegenüber der Ganglinie A auf, das sich durch stärkere Überflutungen vor allem in der nördlichen Au bemerkbar machte. Dies resultiert natürlicherweise durch die höheren Abflusswerte der Ganglinie B, wodurch die nördlichen Ufer

des Rohrhaufenarms und der kleinen Binn stärker überflutet werden. Auch an anderen Stellen, wie dem Donauufer und in der zentralen Au, sieht man Überflutungsunterschiede durch die höheren Abflüsse. Trotzdem zeigte sich auch hier, dass einige Bereiche auch für geringere Abflüsse überflutet werden. So reicht der niedrigere Scheitelpunkt der Ganglinie A aus, um die nördliche Au von der kleinen Binn aus zu überfluten. Dabei erreicht das Wasser den Marchfeldschutzdamm über den Fadenbach und angrenzenden Graben bei einem um rund 500m³/s geringeren Abflusswert. Am nördlichen Ufer des Rohrhaufenarms und dem Donauufer sieht man jedoch, dass gewisse Mindestabflusshöhen zum Überfluten notwendig sind (vgl. Kapitel 6.2.4: Tabelle 6).
Direkt nach den Scheitelpunkten breitet sich das Wasser für beide Ganglinien weiter innerhalb des Projektgebiets aus, was darauf zurückzuführen ist, dass die Abflusswerte des Scheitelpunkts eine gewisse Zeit benötigen, um durch die Seitenarme in das Gebiet transportiert zu werden. Dies ist gut an der zeitlichen Strömungsverteilung in der kleinen Binn zu sehen, in der sich die Höchstgeschwindigkeiten des Scheitelpunkts zwischen Zu- und Ausströmbereich um 18h verschieben (vgl. Kapitel 6.3). Erst einmal ins Augebiet geströmt, fließt das Wasser dem Gefälle und niedrigsten Widerstand entgegen, weshalb sich das Wasser, auch nach dem Absinken der Abflusswerte in der Donau, durch die noch ausreichend hohen Wasserstände in den Seitengewässern weitere 15h im Projektgebiet ausbreiten kann. Für die Ganglinie B ist dabei das Wasservolumen und die Überflutungsfläche aufgrund des höheren Scheitelpunkts entsprechend höher als für die Ganglinie A (vgl. Kapitel 6.4 & 6.5).

Die restliche Ablaufzeit ist für beide Abflussganglinien vom ablaufenden Wasser geprägt und durch die sich annähernden Abflusswerte wieder ähnlicher. Allerdings führt das größere Wasservolumen im Projektgebiet dazu, dass für die GL B, dass für die GL A beobachtete Fließverhalten, auch bei bereits geringeren Abflusswerten in der Donau stattfindet (vgl. Kapitel 6.2.4).

Die Ganglinienform hat somit einen wesentlichen Einfluss auf den Fließverlauf im Projektgebiet. Hierbei kann für die erste Arbeitsfrage festgehalten werden, dass die Unterschiede vor allem im Überflutungsausmaß und der Reihenfolge der Überflutungsereignisse liegen.

Die Fließgeschwindigkeiten im Projektgebiet resultieren aus den Abflusswerten der Donau, die für die beiden Ganglinien in unterschiedlicher Zeit ansteigen.

In den Gewässern zeigt die Ganglinie B, aufgrund der kürzeren Laufzeit und den schneller ansteigenden Abflüssen, zum Teil höhere Fließgeschwindigkeiten. Dies ist deutlich für den Donauzustrom in den Rohrhaufenarm am Messstandort P11 zu sehen, bei dem die höheren Donauabflüsse auch eine höhere Fließgeschwindigkeit erzeugen (vgl. Kapitel 6.3). Auch für

die kleine und große Binn zeigen die Messstandorte an den Zuströmen der Donau geringfügig höhere Fließgeschwindigkeiten für die Ganglinie B. Mit zunehmender Entfernung zur Donau verringert sich jedoch der Unterschied zwischen den Fließgeschwindigkeiten in den Seitengewässern, weshalb sich auch die Weitergabedauer des Strömungsmaximums in der kleinen Binn zwischen den Messstandorten P1 und P4 der beiden Ganglinien nur um 30 Minuten voneinander unterscheidet (vgl. Kapitel 6.3).
Insgesamt sind die Kurvenverläufe der Fließgeschwindigkeit mit ihren jeweiligen Abflussganglinien vergleichbar. Vereinzelt sind auch zweigipflige Kurvenverläufe sichtbar. So zeigt sich beispielsweise in der Strömungsverteilung des Messstandorts P1 für beide Ganglinien ein zweites Maximum in der Fließgeschwindigkeit, welches wahrscheinlich den flacher werdenden Ganglinienverläufen zugesprochen werden kann (vgl. Kapitel 6.3). Im Rohrhaufenarm gibt es einen zweigipfligen Verlauf, aufgrund des zunächst unterstromig aus der kleinen Binn und anschließend oberstromig aus der Donau kommenden Wassers. Hierbei liegen die beiden Scheitel für die Ganglinie B durch den schnelleren Fließverlauf enger beieinander (vgl. Kapitel 6.3). Auch im Graben der zentralen Au, der bei der Furt in die große Binn mündet, ist ein zweigipfliger Fließgeschwindigkeitsverlauf zu sehen. Dabei wird der Graben zunächst unterstromig von der großen Binn aus durchflutet und anschließend durch das aus der kleinen Binn kommende Wasser oberstromig, wodurch es zu einer zweiten Fließgeschwindigkeitszunahme kommt. Für die Ganglinie B ist diese dabei höher, da sich im westlichen Bereich eine deutlichere Strömung von der kleinen Binn in die zentrale Au einstellt (vgl. Kapitel 6.2).

Die Augebiete zeigen generell für beide Abflussganglinien nur geringe Fließ-geschwindigkeiten, welche durch die niedrigen Wassertiefen und Rauhigkeitsbeiwerte der Vegetation, im Vergleich zu den Gewässern, begründet werden kann (vgl. Kapitel 5.3.3: Tabelle 5). Aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeiten sind Unterschiede nur schwer auszumachen. Generell zeigen beide Abflussganglinien in den Augebieten einen zweigipfligen Verlauf, der sich jedoch nur an ihren Ein- und Ausströmbereichen, in unterschiedlicher Ausprägung belegen lässt (vgl. Kapitel 6.3). In den Gräben können die höchsten Fließgeschwindigkeiten festgestellt werden, mit geringfügig höheren Geschwindigkeiten für die Ganglinie B. Dies unterstreicht nochmals ihre Bedeutung für die Konnektivität innerhalb der Au (vgl. Hohensinner et al., 2004: 38). Nach dem Ablauf der Abflussganglinien sind nur noch sehr geringe Wasserbewegungen zu sehen. Nur in der kleinen Binn verbleibt, durch die Donauanbindung auch bei MW, eine oberstromige Fließgeschwindigkeit für beide Ganglinien (vgl. Reckendorfer, 2004b: 2).

Für die Ganglinienform kann daher vor allem in den Gewässern und Gräben ein Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit nachgewiesen werden. Der Einfluss nimmt dabei mit zunehmender Entfernung von der Donau ab. In den Augebieten können keine

eindeutigen Unterschiede in den Fließgeschwindigkeiten detektiert werden, da die Wassertiefen im Allgemeinen sehr gering sind. Die zweite Arbeitsfrage lässt sich somit für die Gewässer und Augebiete unterschiedlich beantworten.

Die Überflutungsflächen der Abflussganglinien zeigen eine unterschiedliche maximale Ausdehnung und sind nur für die Ganglinie B mit ihrer Ganglinienform vergleichbar. Dabei bestätigen die Daten die bereits visuell beobachtete größere Überflutungsfläche für die Ganglinie B, durch große Bereiche in der nördlichen Au, die aufgrund des höheren Abflusses gleichzeitig an mehreren Stellen überflutet wurde (vgl. Kapitel 6.2 & 6.4: Abb. 88). In der westlichen und südlichen Au führten die Uferüberflutungen der Donau zu einem zusätzlichen Wassereintrag, der nur geringfügig größere Überflutungsflächen verursachte (vgl. Kapitel 6.4: Abb. 88). Die Überflutungsfläche der zentralen Au wurde für die Ganglinie B, durch das über die kleine Binn ablaufende Wasser aus der westlichen Au, stärker beeinflusst (vgl. Kapitel 6.2.4).
Die höheren Abflüsse der Ganglinie B führten somit in der Gesamtheit zu einer größeren Überflutungsfläche (vgl. Kapitel 6.4). Für die Ganglinie A stiegen die Überflutungsflächen ab einem Abflusswert von rund 3500m³/s stark an, wodurch es zu den Abweichungen zu ihrer Ganglinienform kam (vgl. Kapitel 6.2.4 & Kapitel 6.4: Abb. 87). Die Abflusswerte befinden sich hierbei im dritten Schritt des Fließverlaufs, bei dem die Nebengewässer beginnen, in die Augebiete zu fließen (vgl. Kapitel 6.2.1). Aufgrund der in diesem Schritt vergleichbaren Abflusswerte zur Ganglinie B, sind auch die Anstiegsraten der Überflutungsflächen vergleichbar. Trotzdem erreichen die Überflutungsflächen der Ganglinie A, aufgrund der niedrigeren Scheitelhöhe, nicht dasselbe Überflutungsausmaß wie für die Ganglinie B (vgl. Kapitel 6.4).

Der Vergleich der Überflutungsflächen nach Wassertiefen zeigt jedoch, dass sich die Flächen für die größeren Wassertiefen, ab 0,5m annähern. Dadurch gibt es den größten Unterschied in den Überflutungsflächen für die Wassertiefen, die niedriger als einen halben Meter sind. So beginnt das Wasser für beide Ganglinien mit den abnehmenden Wasserständen abzufließen, wodurch sich die Überflutungsflächen wieder reduzieren. Da sich die Abflusswerte der Ganglinien in der Ablaufzeit annähern, ist dies auch in den Überflutungsflächen zu beobachten (vgl. Kapitel 6.4: Abb. 87). Die Flächen, die einmal überflutet wurden, bleiben jedoch in einem feuchten Zustand mit sehr geringen Wassertiefen unterhalb von zehn Zentimetern, weshalb sich die Überflutungsfläche für die Gesamtheit der Flächen nach dem Scheitelpunkt nicht wieder reduziert (vgl. Kapitel 6.4: Abb. 87).

Die Ganglinienform beeinflusst somit die Überflutungsflächen hauptsächlich für die Aubereiche, die nach Ablauf der Ganglinie mit einer niedrigen Wassertiefe verbleiben.

Die Veränderung in den Überflutungsflächen ist daher von der betrachteten Wassertiefe abhängig. Generell vergrößern sich die Überflutungsflächen jedoch durch den höheren Scheitelpunkt, wodurch sich die dritte Arbeitsfrage beantworten lässt.

Das Überflutungsvolumen der Abflussganglinien im Projektgebiet ist für die Ganglinie B höher als für die Ganglinie A (vgl. Kapitel 6.5). Der vergleichbare Kurvenverlauf zur jeweiligen Ganglinie lässt einen Zusammenhang vermuten. Die erst nach ihren Scheitelpunkten wieder absinkenden Kurvenverläufe können auf das sich in den Nebenarmen befindende Wasser und eine Retention des Projektgebiets zurückgeführt werden. Die Behauptungen decken sich mit den beobachteten Fließverläufen und dem Verlauf der Überflutungsflächen. So benötigt das Wasser des Scheitelpunkts eine gewisse Zeit, um sich im Projektgebiet auszubreiten und fließt daher erst mit einer Verzögerung wieder ab (vgl. Kapitel 6.3 & 6.4). Hierbei bleibt der Kurvenverlauf des Überflutungsvolumens der Ganglinie B oberhalb der Ganglinie A. Damit unterscheiden sich die Kurvenverläufe des Volumens zu denen der Abflussganglinien, bei denen die Abflusswerte der Ganglinie B nach dem höheren Scheitelpunkt wieder unter die Werte der Ganglinie A fallen (vgl. Kapitel 6.5: Abb. 89). Dies resultiert aus der größeren Überflutungsfläche der Ganglinie B, die dadurch auch zu einem größeren Wasservolumen im Projektgebiet führt. Das eingetragene Wasser fließt somit nicht in seiner Gesamtheit wieder ab, weshalb trotz der niedrigeren Abflusswerte in der Ablaufzeit der Ganglinie B ein größeres Wasservolumen im Gebiet verbleibt.

Die Ganglinienform bestimmt somit das Wasservolumen im Projektgebiet, auch über die Ablaufzeit hinweg. Damit lässt sich für die letzte Arbeitsfrage festhalten, dass die Ganglinienform B, trotz der zum Teil niedrigeren Abflusswerte zu einem größeren Überflutungsvolumen im Projektgebiet führt.

Auswirkungen auf den Nationalpark Donau-Auen

Die simulierten Veränderungen im Überflutungsgeschehen der Orther Auen können vielfältige Auswirkungen für den Nationalpark Donau-Auen mit sich bringen und dabei verschiedene Ökosystemleistungen beeinflussen (vgl. Kapitel 2.4).
Die unterschiedlichen Habitate sind durch die höheren Scheitelabflüsse direkt von den Veränderungen betroffen. Hierbei könnten sich durch das häufigere Überfluten der Augebiete die Standortbedingungen verändern, wodurch sich verschiedene Tier- und Pflanzengesellschaften zurückziehen und neue ökologische Nischen frei werden würden.

Durch die erhöhten Fließgeschwindigkeiten könnten zusätzlich neue Pionierflächen an den Nebenarmen entstehen. Dazu führt das nach dem Ablaufen in Senken und Gräben

verbliebene Wasser zur Entstehung neuer aquatischer Lebensräume. Auch für die Vegetationsarten der Au ist eine regelmäßige Überflutung ihrer Standorte wichtig, um in der Sukzession nicht von anderen Arten verdrängt zu werden. Somit könnten die neuen Überflutungsstandorte der derzeitigen Sukzession hin zu Standorten der Harten Au entgegenwirken (vgl. Kapitel 2.4; Eckmüllner, 2012).
In den Gewässern dürfte sich der in verschiedenen Studien beobachtete Trend hin zu rheophilen Arten fortsetzen. Hierbei wurden die Gewässer der Orther Auen nach ihrer Gewässervernetzung von Schabuss & Reckendorfer (2002) auf die Fischarten-zusammensetzung untersucht. Dabei konnte zwar keine signifikante Zunahme bei den Adultfischen festgestellt werden, jedoch bei den Jungfischen im Bereich der oberen großen Binn, bei einem gleichzeitigen Rückgang der stagnophilen (stillwasserliebenden) Arten Rotfeder und Bitterling. Auch für die Artengemeinschaften der Detritivoren und Weichtiere konnte Reckendorfer (2004a) keinen signifikanten Einfluss der Gewässervernetzung auf die Artengemeinschaft finden. Allerdings verwies er auf eine tendenzielle Änderung hin zu einer rheophilen Artengemeinschaft. Ähnliches könnte für die rheophile Libellenfauna zutreffen, die vor der Gewässervernetzung in den Orther Auen kartiert wurde und eine unterdurchschnittliche Artenzahl im Vergleich zu anderen Augebieten entlang der niederösterreichischen Donau hatte (Raab, 2000: 66). Dagegen wird sich für Wasserpflanzen wie Makrophyten zeigen, ob sie von neuen Wasserflächen mit geringer Wassertiefe profitieren können oder sich durch die erhöhten Fließgeschwindigkeiten in ihrer Häufigkeit und Artzusammensetzung innerhalb der aquatischen Habitate verändern werden (Baart et al., 2010: 159f).

Die vorhandene hydrologische Konnektivität der Donau mit den Orther Auen dürfte eine hohe Gesamtproduktivität der Au aufrechterhalten, da sie ein Gleichgewicht zwischen der Speicherung und dem Export von Nährstoffen und organischer Substanz gewährleistet (Tockner et al., 1999b: 533).
Eine Steigerung der Vernetzung führt zu einer Zunahme von anorganischen Nährstoffen in den Nebenarmen und Überflutungsflächen. Hierbei wurde in einer Studie von Hein et al. (1999: 266f) eine Erhöhung der Nitrat- und Phosphor-konzentrationen für die Donau-Auen bei Regelsbrunn nachgewiesen. Die erhöhte Vernetzung für die Abflussimpulse wirkt sich dabei, durch die größeren Überflutungsflächen, erhöhend auf die Denitrifikationsprozesse in den Orther Auen aus und fördert zugleich die vollständige Denitrifikation. Damit leistet sie einen wichtigen Beitrag zur Senkung von treibhausfördernden N_2O, im Vergleich zu weniger überfluteten Augebieten wie der Lobau, bei denen ein größeres N_2O:N_2 – Verhältnis nachgewiesen wurde (Welti et al., 2012). Die Konzentration von gelösten Nährstoffen steigt mit zunehmender Durchströmungsdauer, weshalb durch die zeitlich kürzeren Abflussimpulse keine Konzentrationszunahmen in den Nebenarmen zu erwarten sind (Hein et al., 2002: 10).

Generell zeigen die Nebenarme durch eine hohe Versorgung aus dem Sickerwasser nur geringe Konzentrationsunterschiede zur Donau (Hein et al., 1999: 266f; 2004: 212ff).
Auch für organische Partikel wirkt sich eine verbesserte Vernetzung erhöhend auf die Konzentration in den Nebengewässern aus. Von den hohen Konzentrationen an Nährstoffen und organischen Partikeln profitiert Phytoplankton, dass wiederum die Nahrungsgrundlage von Zooplankton darstellt und dieses begrenzt. Dabei zeigten Hein et al. (2004: 212), dass nach einem Abflussimpuls die Phytoplankton- und daraufhin die Zooplanktonkonzentration stark anstieg, wodurch das Phytoplankton sich wieder reduzierte. Eine hohe Konnektivität fördert somit durch den regelmäßigen Eintrag von Nährstoffen und organischen Substanzen die Biomasseproduktivität und verhindert zugleich, durch das regelmäßige Ausspülen eine Eutrophierung der Gewässer (Hein et al., 1999: 268; Keckeis et al., 2003: 249).

Für die Verwaltung des Nationalparks Donau-Auen liefern die Ergebnisse der hydrodynamisch-numerischen Modellierung wichtige Informationen über die Dynamik in den Orther Auen und zur Erreichung der strategischen Ziele (vgl. Kapitel 3.2). Die häufiger und höher auftretenden Abflussimpulse erhöhen die Vernetzung in der Au und führen zu einem größeren Überflutungsausmaß, wodurch für wieder mehr Gebiete auentypische Zustände ermöglicht werden. Demgegenüber stehen die ungeklärten Auswirkungen der höheren Fließgeschwindigkeiten, aufgrund kürzerer Laufzeiten der Abflussganglinien bzw. schneller ansteigenden Abflusswerten, wodurch das Überflutungsgeschehen teilweise verändert wird. Hierfür muss in weiterführenden Analysen geklärt werden, ob es durch die kürzeren Überflutungszeiten, trotz der häufigeren Abflussimpulse, zu einer insgesamten Reduktion in den jährlichen Durchflusstagen der Nebenarme kommt.

Besonders in Hinblick auf die Renaturierungsmaßnahmen sind Veränderungen der Abflussimpulse von hoher Bedeutung für die Wirkung derzeitiger und zukünftiger flussbaulicher Maßnahmen.
Für die Gewässervernetzung Orth zeigt das hydrodynamisch-numerische Modell, dass für Abflussimpulse unterhalb des HSW bereits eine sehr gute Vernetzung zwischen der Donau und der Au vorhanden ist. Das Gewässersystem konnte dadurch für Wasserstände knapp über MW weitestgehend in den Zustand von 1958 zurückgeführt werden (vgl. Reckendorfer, 2000: 9, 2004b: 2). Die drei getätigten Donauuferrückverbauungen zeigen sich als sehr wirksam und führen für die kleine Binn zu einer Durchflutung bei MW und für die große Binn ab Wasserständen geringfügig über diesen (vgl. Kapitel 6.2.4: Tabelle 6). Gleichwohl zeigten sich in einer Nachuntersuchung der Gewässervernetzung keine Auswirkungen auf die Feinsedimentablagerungen in den Nebengewässern. Besonders für die mit der Donau unterstromig angebundenen Abschnitte der kleinen und großen Binn bis zur Tierbodentraverse

bzw. Furt wurden nach wie vor hohe Feinsedimentauflagen nachgewiesen (Reckendorfer, 2004b: 12). Das häufigere Auftreten dieser höheren Abflussimpulse wird daher vor allem für die große Binn die Vernetzung erhöhen und könnte durch die gesteigerte Fließgeschwindigkeit zu verstärkten Erosionsprozessen führen und den Feinsedimentablagerungen entgegenwirken. Neben den Gewässern wiesen auch die Augebiete eine gute Vernetzung bei Wasserständen deutlich unter HSW auf, was durch die großflächigen Überflutungen für die westliche, zentrale und Teile der südlichen Au erkennbar war (vgl. Kapitel 6.2). Auch hier zeigt sich durch die veränderte Abflussganglinienform eine Steigerung der Vernetzung vor allem für das nördliche Augebiet.

Trotzdem wurde mit den durchgeführten Gewässervernetzungen nicht die erhoffte Durchströmung der Nebenarme bei Werten von RNW +0,5m erreicht, was mitunter auf die zu hohe ehemalige Flusssohle zurückzuführen ist (Reckendorfer, 2004b: 2). Daher ist zu evaluieren, ob es für die Orther Au weitere mögliche Renaturierungspotenziale gibt. Mit der HN-Modellierung konnte so ein Potenzial für den Rohrhaufenarm detektiert werden. Dieser wird derzeit unterstromig von der kleinen Binn aus durchströmt und wird erst ab einen Abflusswert von ca. 3850m³/s über das Donauufer überflutet (vgl. Kapitel 6.2.4: Tabelle 6). Mit einem Uferrückbau im Bereich des Stromkilometers 1906,4 könnte der Rohrhaufenarm dauerhaft ab einem MW durchströmt werden und wieder zu einem dynamischen Seitenarm der Donau werden. Zusätzlich spielt der Rohrhaufenarm eine wichtige Rolle für die Überflutung des westlichen Teils des nördlichen Augebiets. Daher würde ein Uferrückbau im Bereich der Hirschensprungtraverse eine Vernetzung mit der nördlichen Au bei deutlich geringeren Abflusswerten ermöglichen. Da der westliche Teil der nördlichen Au jedoch landwirtschaftlich genutzt wird und kein Teil des Nationalparks ist, würde dies wahrscheinlich auch einen Interessenskonflikt bedeuten (vgl. Kapitel 3.3: Abb. 29).

Zusätzlich muss immer auch das Ziel der Erhaltung einer möglichst diversen Artenvielfalt berücksichtigt werden. Daher ist genau zu evaluieren, welche Auswirkungen eine Veränderung in den Abflussimpulsen oder neue Renaturierungsmaßnahmen auf die Habitate und die damit verbundene Artzusammensetzung haben. So könnte eine Gewässervernetzung des Rohrhaufenarms zu rheophilen Bedingungen führen, wodurch die derzeitigen stagnophilen Arten verdrängt werden könnten (vgl. Raab, 2000; Schabuss & Reckendorfer, 2002). Aufgrund der noch immer zu geringen rheophilen Artzusammensetzung in der Orther Au besteht jedoch Handlungsbedarf (vgl. Raab, 2000; Reckendorfer, 2004a; Schabuss & Reckendorfer, 2002).

Bei der Entscheidungsfindung können hydrodynamisch-numerische Modelle ein wichtiger Bestandteil für die Evaluierung von Renaturierungspotenzialen sein. Mit ihnen können die Auswirkungen möglicher Abflussveränderungen und flussbaulicher Maßnahmen vorzeitig simuliert werden, indem Abflussganglinien oder das Rechennetz entsprechend manipuliert

werden. Dabei stellen sie jedoch nur Modelle der Realität dar, die stark auf eine gute Datengrundlage, Fachexpertise und Standortwissen angewiesen sind. Daher sind ihre Ergebnisse für eine Einschätzung stets mit Referenzwerten zu vergleichen und die Modelle gegebenenfalls anzupassen (Oertel & Bung, 2014: 29).

8 Fazit

Durch den Einsatz der Demonstranten im Winter 1984 gegen den Wasserkraftwerksbau in der österreichischen Donau bei Hainburg, konnten die Donau-Auen, als einer der letzten frei fließenden Donauabschnitte in Österreich, neben der Wachau, erhalten bleiben. Heute sieht sich dieser besondere Lebensraum neuen Gefahren ausgesetzt.
Einerseits würde die Sohleintiefung der Donau, ohne das derzeitige Geschiebemanagement, zu einer zunehmenden Entkoppelung der Auen vom Fluss führen. Andererseits zeigen wissenschaftliche Erkenntnisse eine durch den Klimawandel verursachte Veränderung in den Niederschlägen und dadurch in den Abflussganglinien in der österreichischen Donau, insbesondere im Bereich der Abflussimpulse. Die Auswirkungen dieser veränderten Abflussganglinienform auf die Donau-Auen sind jedoch noch ungeklärt.

Mit der vorliegenden Masterarbeit wurden die Auswirkungen einer veränderten Abflussganglinienform auf das Überflutungsgeschehen in den Donau-Auen bei Wien analysiert. Hierfür wurde ein hydrodynamisch-numerisches Modell erstellt und mit diesem der Fließverlauf des Wassers in der Donau und den angrenzenden Orther-Auen für zwei ausgewählte Abflussganglinien modelliert.
Die Ergebnisse unterstrichen für beide Abflussganglinienformen die besondere Bedeutung der Gewässer und Gräben für die Vernetzung der Donau mit der Au. Dabei fand das Überflutungsgeschehen im Projektgebiet fast ausschließlich über die Nebenarme statt, welche durch eine Gewässervernetzung wieder an die Donau angebunden wurden. Die Uferüberflutungen der Donau traten erst für höhere Abflüsse ein und hatten einen geringen Einfluss auf das Überflutungsgeschehen. Dazu stellten die in den Augebieten verlaufenden Gräben einen wichtigen Faktor dar, um das Wasser von den Nebenarmen tiefer in die Au zu transportieren. Dabei konnten sowohl für die Uferüberflutungen der Nebenarme in die Au, als auch für die Durchflutung der Gräben bestimmte Abflussschwellenwerte detektiert werden. Dies deckt sich mit wissenschaftlichen Erkenntnissen von Tockner et al. (2000) zu Untersuchungen des „Flood Pulse Concept“ in den Donau-Auen, bei denen bestimmte Schwellenwerte die Konnektivität in den Auen stark erhöhte.
Der Vergleich der Ergebnisse zeigte, dass sich für die zeitlich jüngere Ganglinienform, mit kürzerer Laufzeit und höheren Abflusswerten (GL B), ein generell schnellerer Fließverlauf mit höheren Fließgeschwindigkeiten in den Nebenarmen und Gräben einstellte. Dadurch veränderte sich im Vergleich zur zeitlich älteren Ganglinienform, mit etwas längerer Laufzeit und niedrigeren Abflusswerten (GL A), zum Teil die Reihenfolge der Überflutungen. Dazu kam es durch die generell höheren Abflusswerte am Scheitelpunkt zu größeren Überflutungsflächen und einem größeren Wasservolumen im Projektgebiet.
Mit dem Überflutungsgeschehen der Ganglinie A konnte dagegen festgestellt werden, dass

einige Bereiche im Projektgebiet auch bei einem langsameren Fließverlauf, bei zugleich niedrigeren Abflusswerten, überflutet wurden. Durch den langsameren Anstieg der Abflusswerte hatte das Wasser mehr Zeit, sich für die jeweiligen Abflusshöhen auszubreiten und erreichte bestimmte Augebiete auch bei deutlich geringeren Abflusswerten.

Aus diesen Ergebnissen liesen sich grundlegend zwei Erkenntnisse ableiten:

- Die Abflusshöhe ist ein entscheidender Faktor für den Fließverlauf und das Ausmaß der Überflutungsflächen und -volumen. Dabei bestimmt die Abflusshöhe welche Geländestrukturen überflutet und dadurch auch welche Augebiete erreicht werden können.
- Die Dauer der Abflusshöhe bestimmt das Überflutungsgeschehen maßgeblich, indem es die Zeit vorgibt, die das Wasser für den jeweiligen Abflusswert hat, um sich auszubreiten. Dazu beeinflussen die Anstiegs- und Abfallraten des Abflusses auch die Strömungsgeschwindigkeiten und dadurch wiederum den Fließverlauf.

Daraus folgt für die Fragestellung dieser Masterarbeit, ob eine Veränderung der Abflussganglinienform für Abflussimpulse das Überflutungsgeschehen in Flussauen verändert, dass die von Pekárová et al. (2016) in der österreichischen Donau festgestellte Veränderung der Abflussganglinien, hin zu kürzeren Laufzeiten und höheren Scheitelpunkten, eindeutig zu einem veränderten Überflutungsgeschehen in Flussauen führt.

Dabei erzeugt eine kürzere Laufzeit eine steilere Abflussganglinie, die aufgrund ihrer schneller ansteigenden Abflusswerte und höheren Fließgeschwindigkeiten zu einem rascheren und zum Teil veränderten Fließverlauf führen. Ein höherer Scheitelpunkt resultiert in einer größeren Überflutungsfläche und mehr Wasservolumen in der Au, wobei diese zunehmen, je länger die Abflusshöhe gehalten wird. Zudem deuten die höheren Scheitelpunkte eine Steigerung der Vernetzung zwischen Gewässer und Au an, da höhere Geländestrukturen überwunden werden und somit insgesamt Überflutungsflächen und -volumen zunehmen. Zugleich könnten die höheren Fließgeschwindigkeiten zu einer verstärkten Erosion innerhalb der Nebenarme führen und die Gewässerdynamik verbessern(Reckendorfer, 2000). Dagegen dürfte die kürzere Laufzeit der Abflussganglinien höchstwahrscheinlich zu einer Reduktion der jährlichen Durchströmungstage innerhalb der Nebengewässer, vor allem für die große Binn und den Rohrhaufenarm, führen (vgl. Kapitel 3.3). Ob die dafür häufiger auftretenden Abflussimpulse dies ausgleichen, müsste in weiteren Studien geklärt werden. Für die Augebiete trifft eine Reduktion der Überflutungstage höchstwahrscheinlich nicht zu, da die überfluteten Flächen durch die höheren Abflussimpulse zunehmen werden und bei einer Überflutung zugleich ein gewisses Wasservolumen in der Au zurückgehalten wird.

Inwieweit diese Ergebnisse auf den gesamten Nationalpark oder andere Auensysteme übertragbar sind, muss in einem nächsten Schritt, mit einer größeren Anzahl von Abflussganglinien und kalibrierten HN-Modellen statistisch überprüft werden. Nichtsdestotrotz konnte mit der hydrodynamisch-numerischen Modellierung der Orther Au eine klare Tendenz für den Einfluss der Abflussganglinienform auf das Überflutungsgeschehen in Auen gezeigt werden.

Auch die diskutierten potenziellen Auswirkungen durch die Veränderung der Abfluss-ganglinienform auf den Nationalpark Donau-Auen müssen in weiterführenden Studien thematisiert werden, um mögliche Folgen für die Donau-Auen besser einschätzen zu können und diese bei der Planung zukünftiger Renaturierungsmaßnahmen berücksichtigen zu können. Dies gilt auch für die Sohleintiefung der Donau, für die es nach wie vor keine nachhaltige Lösung gibt. Nur so kann dieser Lebensraum, mit seinen vielfältigen Ökosystem-funktionen langfristig erhalten bleiben.

Literaturverzeichnis

Arscott, D. B., Tockner, K., Van Der Nat, D., & Ward, J. V. (2002). Aquatic habitat dynamics along a braided alpine river ecosystem (Tagliamento River, Northeast Italy). Ecosystems, 5(8), 802–814. https://doi.org/10.1007/s10021-002-0192-7

Asenkerschbaumer, M., Skublics, D., & Rutschmann, P. (2012). Verzögerung und Abschätzung von Hochwasserwellen entlang der bayerischen Donau. In Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft.

Baart, I., Gschöpf, C., Blaschke, A. P., Preiner, S., & Hein, T. (2010). Prediction of potential macrophyte development in response to restoration measures in an urban riverine wetland. Aquatic Botany, 93(3), 153–162. https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2010.06.002

Chatterjee, C., Förster, S., & Bronstert, A. (2008). Comparison of hydrodynamic models of different complexities to model floods with emergency storage areas. Hydrological Processes, 22(24), 4695–4709. https://doi.org/10.1002/hyp.7079

Chow, V. Te. (1959). Open-Channel Hydraulics. In McGRAW-HILL CLASSIC TEXTBOOK REISSUE SERIES. McGraw-Hill Book Company, Inc. U.S.

Colditz, G. (1994). Auen. In Auen, Moore, Feuchtwiesen (pp. 25–58). Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-6195-3_4

Crispino, G., Gisonni, C., & Iervolino, M. (2015). Flood hazard assessment: comparison of 1D and 2D hydraulic models. International Journal of River Basin Management, 13(2), 153–166. https://doi.org/10.1080/15715124.2014.928304

De Groot, R. (2006). Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes. In Landscape and Urban Planning. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.016

De Lange, N. (2013). Geoinformatik (3. Auflage). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34807-5

Deltares. (2018). Hydrodynamics, Rainfall Runoff and Real Time Control. https://download.deltares.nl/en/download/sobek/

Eckmüllner, O. (2012). Bericht über die Auswertung der Winterinventur 2008/2009 im Nationalpark Donau-Auen.ÖBF AG und MA49

Europäische Union. (2007). Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. Amtsblatt Der Europäischen Union, L 288, 27–34.

Feldmann, H., Schädler, G., Panitz, H.-J., & Kottmeier, C. (2013). Near future changes of extreme precipitation over complex terrain in Central Europe derived from high resolution RCM ensemble simulations. International Journal of Climatology, 33(8), 1964–1977. https://doi.org/10.1002/joc.3564

Ferziger, J. H., & Peric, M. (2008). Numerische Strömungsmechanik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68228-8

Fohrer, N. (Hrsg.), Bormann, H., Miegel, K., Casper, M., Bronster, A., Schumann, A., & Weiler, M. (2016). Hydrologie (1. Auflage). Haupt Verlag, Bern.

Funk, A., Gschöpf, C., Blaschke, A. P., Weigelhofer, G., & Reckendorfer, W. (2013). Ecological niche models for the evaluation of management options in an urban floodplain—conservation vs. restoration purposes. Environmental Science & Policy, 34, 79–91. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.08.011

Gegenleithner, S., Dorfmann, C., & Schneider, J. (2020). Hydronumerische Modellierung mittels frei verfügbarer Software: ein kurzer Überblick. Österreichische Wasser- Und Abfallwirtschaft, 72(7–8), 273–280. https://doi.org/10.1007/s00506-020-00679-4

Gharbi, M., Soualmia, A., Dartus, D., & Masbernat, L. (2016). Comparison of 1D and 2D hydraulic models for floods simulation on the medjerda riverin tunisia. Journal of Materials and Environmental Science, 7(8), 3017–3026.

Glaser, R., Hauter, C., Faust, D., Glawion, R., Saurer, H., Schulte, A., & Sudhaus, D. (2010). Physische Geographie kompakt. In Physische Geographie kompakt. Spektrum Akademischer Verlag. Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-662-50461-1

Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps-A review. Science of the Total Environment, 493, 1138–1151. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050

Habersack, H., Haimann, M., Krapesch, M., & Gmeiner, P. (2021). Bedeutung des Sedimenttransportes für den Hochwasserschutz und die Schifffahrt an der österreichischen Donau. In Endbericht.

Habersack, H. (2014). Tanz der Steine. In Österreichs Donau. Landschaft - Fisch - Geschichte (pp. 247–248). Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement, BOKU Wien.

Habersack, H., Schober, B., & Hauer, C. (2015). Floodplain evaluation matrix (FEM): An interdisciplinary method for evaluating river floodplains in the context of integrated flood risk management. Natural Hazards, 75(S1), 5–32. https://doi.org/10.1007/s11069-013-

0842-4

Hantel, M., & Haimberger, L. (2016). Grundkurs Klima. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48193-6

Heiler, G., Hein, T., Schiemer, F., & Bornette, G. (1995). Hydrological connectivity and flood pulses as the central aspects for the integrity of a river-floodplain system. Regulated Rivers: Research & Management, 11(3–4), 351–361. https://doi.org/10.1002/rrr.3450110309

Hein, T., Heiler, G., Pennetzdorfer, D., Riedler, P., Schagerl, M., & Schiemer, F. (1999). The Danube restoration project: functional aspects and planktonic productivity in the floodplain system. Regulated Rivers: Research & Management, 15(1–3), 259–270. https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199901/06)15:1/3<259::AID-RRR539>3.0.CO;2-E

Hein, T., Baranyi, C., & Reckendorfer, W. (2002). Bedeutung der hydrologischen Vernetzung für die hydrochemische Situation der Augewässer im Bereich. Nationalpark Donauauen - Wissenschaftliche Reihe, 10/2006, 1–16. www.biologiezentrum.at

Hein, T., Baranyi, C., Reckendorfer, W., & Schiemer, F. (2004). The impact of surface water exchange on the nutrient and particle dynamics in side-arms along the River Danube, Austria. Science of the Total Environment, 328(1–3), 207–218. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.01.006

Hein, T., Lazowski, W., Muhar, S., Schwarz, U., & Weigelhofer, G. (2014). Die Bedeutung von Augewässern am Beispiel der Donau-Auen bei Wien. Denisia 33, Kataloge Des Oberösterreichischen Landesmuseums, 163, 167–174. www.biologiezentrum.at

Herzog, G., & Zukrigl, K. (1999). Der tiefstgelegene Buchenwald Österreichs. Wissenschaftliche Mitteilungen Niederösterreichisches Landesmuseum, 12, 237–269. www.biologiezentrum.at

Heywood, I., Cornelius, S., & Carver, S. (2006). An Introduction to Geographical Information Systems (3. Edition). Pearson Education Limited. England. www.pearsoned.co.uk/heywood

Hohensinner, S., Habersack, H., Jungwirth, M., & Zauner, G. (2004). Reconstruction of the characteristics of a natural alluvial river-floodplain system and hydromorphological changes following human modifications: the Danube River (1812-1991). River Research and Applications, 20(1), 25–41. https://doi.org/10.1002/rra.719

Hohensinner, S., Haidvogl, G., Jungwirth, M., Muhar, S., Preis, S., & Schmutz, S. (2005).

Historical analysis of habitat turnover and age distributions as a reference for restoration of Austrian Danube floodplains. WIT Transactions on Ecology and the Environment, River Basin Management III, 83, 489–502. https://doi.org/10.2495/RM050471

Hohensinner, S. (2020). Wien und die Donau. Landschaftswandel und Wasserbaumaßnahmen seit dem frühen 16. Jahrhundert. In: Die konstruierte Landschaft. Befunde und Funde zu anthropogenen Geländeveränderungen in Mittelalter und früher Neuzeit. Bd. 33. Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Archäologie des Mittelalters und der Neuzeit. (pp. 255–264). https://doi.org/10.17104/9783406661358

Huber, A., Lumassegger, S., Kohl, B., Spira, Y., Weingraber, F., & Achleitner, S. (2021). Modellierung pluvialer Sturzfluten – Anforderungen und Sensitivitäten der 2D-hydraulischen Modellierung. Österreichische Wasser- Und Abfallwirtschaft, 73(3–4), 116–133. https://doi.org/10.1007/s00506-021-00749-1

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability. In Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844

Jannidis, F., Kohle, H., & Rehbein, M. (Hg.) . (2017). Digital Humanities. In Digital Humanities. J.B. Metzler Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-476-05446-3_18

Jirka, G. H., & Lang, C. (2009). Einführung in die Gerinnehydraulik. Universitätsverlag Karlsruhe.

Jungwirth, M., Haidvogl, G., Hohensinner, S., Waidbacher, H., & Zauner, G. (2014). Österreichs Donau. Landschaft - Fisch - Geschichte. Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement, BOKU Wien. https://books.google.at/books?hl=de&lr=&id=lXLuBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=wien+und+die+donau+hohensinner+2014&ots=C71j6aYNxZ&sig=M7TtFJisvFZRYKhJW6ur5sFeP4g&redir_esc=y#v=onepage&q=wien und die donau hohensinner 2014&f=false

Junk, W. J., & Wantzen, K. M. (2004). The flood pulse concept: new aspects, approaches and applications - an update. Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries, 117–149. https://www.researchgate.net/publication/274511459_The_Flood_Pulse_Concept_New_Aspects_Approaches_and_Applications-An_Update

Junk, W. J., Bayley, P. B., & Sparks, R. E. (1989). The flood pulse concept in river-floodplain systems. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 106, 110–127.

https://www.researchgate.net/publication/256981220_The_Flood_Pulse_Concept_in_River-Floodplain_Systems

Keckeis, S., Baranyi, C., Hein, T., Holarek, C., Riedler, P., & Schiemer, F. (2003). The significance of zooplankton grazing in a floodplain system of the River Danube. Journal of Plankton Research, 25(3), 243–253. https://doi.org/10.1093/PLANKT/25.3.243

Khatami, S., & Khazaei, B. (2014). Benefits of GIS Application in Hydrological Modeling: A Brief Summary. In Vatten: tidskrift för vattenvård /Journal of Water Management and research (Vol. 70, Issue 1). Föreningen Vatten. https://portal.research.lu.se/en/publications/benefits-of-gis-application-in-hydrological-modeling-a-brief-summ

Klasz, G., Reckendorfer, W., Baumgartner, C., Gabriel, H., & Gutknecht, D. (2013). River-bed degradation and overbank deposition: A human induced geomorphic disequilibrium in the Donau-Auen National Park. 5th Symposium for Research in Protected Areas, 379–384.

Klasz, G., Schmalfuß, R., Zottl, H., & Reckendorfer, W. (2009). Das Flussbauliche Gesamtprojekt für die österreichische Donau östlich von Wien. Österreichische Ingenieur- Und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ), 154(1–6), 1–12. https://www.researchgate.net/publication/293156438

Kosz, M. (1996). Valuing riverside wetlands: the case of the “Donau-Auen” national park. Ecological Economics, 16(2), 109–127. https://doi.org/10.1016/0921-8009(95)00058-5

Lazowski, W. (1997). AUEN IN ÖSTERREICH Vegetation, Landschaft und Naturschutz (M–081). Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie. Wien

Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2005). DIGITAL TERRAIN MODELING Principles and Methodology. CRC PRESS. www.crcpress.com

Liebscher, H.-J. (1984). Der Wasserkreislauf und seine Beeinflussung durch den Menschen. In Geowissenschaften in unserer Zeit (Nr. 4, pp. 130–136). Verlag Chemie GmbH. Weinheim

Mader, H., Steidl, T., & Wimmer, R. (1996). Abflussregime österreichischer Fliessgewässer. In Monographien (Vol. 82). Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie. Wien

Maidment, D. R. (1993). GIS and Hydrologic Modeling - an Assessment of Progress. In Environmental Modeling with GIS (pp. 147–167). https://www.caee.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/meetings/santafe/santafe.htm

Manzano, C. (2000). Großräumiger Schutz von Feuchtgebieten im Nationalpark Donau-

Auen. Stapfia 69, Kataloge Des OÖ. Landesmuseums, 149, 229–248. www.biologiezentrum.at

Margl, H. (1973). Pflanzengesellschaften und ihre standortgebundene Verbreitung in teilweise abgedämmten Donauauen (Untere Lobau). www.biologiezentrum.at

Meyer, T. (2017). Ökologie mitteleuropäischer Flussauen. In Ökologie mitteleuropäischer Flussauen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55455-5

Millenium Ecosystem Assessment. (2004). Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Choice Reviews Online, 41(08). https://doi.org/10.5860/CHOICE.41-4645

Nanson, G. C., & David Knighton, A. (1996). Anabranching rivers: Their cause, character and classification. Earth Surface Processes and Landforms, 21(3), 217–239. https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199603)21:3<217::AID-ESP611>3.0.CO;2-U

Nationalpark Donau-Auen GmbH. (2019). Managementplan 2019-2028. https://www.donauauen.at/ueber-uns/organisation/managementplan-2019-2028

Nationalpark Donau-Auen GmbH. (2022a). Flusslandschaft im Wandel. https://www.donauauen.at/ueber-uns/downloads/folder

Nationalpark Donau-Auen GmbH. (2022b). Leistungsbericht 2017-2021. https://www.donauauen.at/ueber-uns/downloads/folder

Oertel, M., & Bung, D. B. (2014). Numerische Strömungssimulation von Fließgewässern – Wo stehen wir und was werden wir im Laufe der nächsten Jahre erreichen? Simulationsverfahren Und Modelle Für Wasserbau Und Wasserwirtschaft. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 50, 50, 19–30. https://hdl.handle.net/20.500.11970/103425

ÖNORM B 2400. (2016). Hydrologie-Hydrographische Begriffe und Zeichen. Österreichisches Normungsinstitut. www.austrian-standards.at/webshop

ÖWAV. (2014). Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Hydrodynamik. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Pekárová, P., Pramuk, B., Halmová, D., Miklánek, P., Prohaska, S., & Pekár, J. (2016). Identification of long-term high-flow regime changes in selected stations along the Danube River. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 64(4), 393–403. https://doi.org/10.1515/johh-2016-0045

Pfundner, G. M., Sauberer, N. D., Willner, W. D., & Zuna-Kratky, T. DI. (2012). Wiesen im

Nationalpark Donau-Auen. Naturschutz Bund NÖ

Raab, R. (2000). Die Libellenfauna in den Maßnahmenbereichen Untere Lobau und Orth. Nationalpark Donauauen- Diverse Wissenschaftliche Arbeiten, 03, 1–74. www.biologiezentrum.at

Rak, G., Kozelj, D., & Steinman, F. (2016). The impact of floodplain land use on flood wave propagation. Natural Hazards, 83(1), 425–443. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2322-0

Reckendorfer, W. (2000). Morphometrie, Hydrologie und Sedimentologie in den Orther Donauauen. Nationalpark Donauauen - Wissenschaftliche Reihe, 6/2006, 1–20. www.biologiezentrum.at

Reckendorfer, W. (2004a). Der Einfluss der Gewässervernetzung Orth auf das Makrozoobenthos. Nationalpark Donauauen-Wissenschaftliche Reihe, 61/2016, 1–25. www.zobodat.at

Reckendorfer, W. (2004b). Der Einfluss der Gewässervernetzung Orth auf die Sedimentverhältnisse. Nationalpark Donauauen - Wissenschaftliche Reihe, 59/2016, 1–14. www.zobodat.at

Reckendorfer, W. (2004c). Ökologische Grundlagen zukünftiger Restaurationsmaßnahmen im Nationalpark Donau-Auen. Nationalpark Donauauen - Wissenschaftliche Reihe, 56/2016, 1–119. www.zobodat.at

Reckendorfer, W., Baranyi, C., Funk, A., & Schiemer, F. (2006). Floodplain restoration by reinforcing hydrological connectivity: expected effects on aquatic mollusc communities. Journal of Applied Ecology, 43(3), 474–484. https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01155.x

Reckendorfer, W., Böttiger, M., Funk, A., & Hein, T. (2013a). The development of abandoned side-channels: ecological implications and future perspectives. 5th Symposium for Research in Protected Areas--Conference Volume, 639–642. www.biologiezentrum.at

Reckendorfer, W., Funk, A., Gschöpf, C., Hein, T., & Schiemer, F. (2013b). Aquatic ecosystem functions of an isolated floodplain and their implications for flood retention and management. Journal of Applied Ecology, 50(1), 119–128. https://doi.org/10.1111/1365-2664.12029

Rössler, M. (2000). Aktuelle Situation, Gefährdung und Schutz der Europäischen Sumpfschildkröte Emys orbicularis (L.) in Österreich. Stapfia 69, Kataloge Des OÖ. Landesmuseums, 149, 169–178. www.biologiezentrum.at

Schabuss, M., & Reckendorfer, W. (2002). Einfluß der Gewässervernetzungsmaßnahmen auf die Adult-und Jungfischfauna im Altarmsystem von Orth an der Donau. Nationalpark Donauauen - Wissenschaftliche Reihe, 13/2006, 1–26. www.biologiezentrum.at

Schagerl, M., Drozdowski, I., Angeler, D. G., Hein, T., & Preiner, S. (2009). Water age – a major factor controlling phytoplankton community structure in a reconnected dynamic floodplain (Danube, Regelsbrunn, Austria). Journal of Limnology, 68(2), 274–287. https://doi.org/10.4081/JLIMNOL.2009.274

Schiemer, F. (1995). Revitalisierungsmaßnahmen für Augewässer - Möglichkeiten und Grenzen. Large Rivers, 9(3–4), 383–398. https://doi.org/10.1127/lr/9/1996/383

Schiemer, F. (1999). Restaurierungsmöglichkeiten von Flussauen am Beispiel der Donau. Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege

Schober, B., Hauer, C., & Habersack, H. (2020). Floodplain losses and increasing flood risk in the context of recent historic land use changes and settlement developments: Austrian case studies. Journal of Flood Risk Management, 13(3), 1–18. https://doi.org/10.1111/JFR3.12610

Scholz, M., Mehl, D., Schulz-Zunkel, C., Kasperidus, H. D., Born, W., & Henle, K. (2012). Ökosystemfunktionen von Flussauen - Analyse und Bewertung von Hochwasserretention, Nährstoffrückhalt, Kohlenstoffvorrat, Treibhausgasemissionen und Habitatfunktion. In Naturschutz und Biologische Vielfalt: Vol. Heft 124. www.buchweltshop.de/bfn

Schön, R. (1999). Die Donau-Auen östlich von Wien - Natur- oder Kulturlandschaft? Kulturlandschaft - Natur in Menschenhand. Naturnahe Kulturlandschaften: Bedeutung, Schutz Und Erhaltung Bedrohter Lebensräume, 11, 249–262.

Seibert, S. P., & Auerswald, K. (2020). Hochwasserminderung im ländlichen Raum. In Hochwasserminderung im ländlichen Raum. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61033-6

Stanford, J. A., Lorang, M. S., & Hauer, F. R. (2005). The shifting habitat mosaic of river ecosystems. Verh. Internat. Verein. Limnol., 29(1), 1–14. https://doi.org/10.1080/03680770.2005.11901979

Sui, D. Z., & Maggio, R. C. (1999). Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects. Computers, Environment and Urban Systems, 23, 33–51.

TELEMAC-MASCARET Consortium. (2022). TELEMAC-2D UserManual. http://wiki.opentelemac.org/doku.php?id=documentation_v8p4r0

Thakur, J. K., Singh, S. K., & Ekanthalu, V. S. (2017). Integrating remote sensing, geographic information systems and global positioning system techniques with hydrological modeling. Applied Water Science, 7(4), 1595–1608. https://doi.org/10.1007/s13201-016-0384-5

Tockner, K., Schiemer, F., Baumgartner, C., Kum, G., Weigand, E., Zweimüller, I., & Ward, J. V. (1999a). The Danube restoration project: species diversity patterns across connectivity gradients in the floodplain system. Regulated Rivers: Research & Management, 15, 245–258. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/(SICI)1099-1646(199901/06)15:1/3%3C245::AID-RRR540%3E3.0.CO;2-G

Tockner, K., Malard, F., & Ward, J. V. (2000). An extension of the flood pulse concept. Hydrological Processes, 14(16–17), 2861–2883. https://doi.org/10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17<2861::AID-HYP124>3.0.CO;2-F

Tockner, K., Schiemer, F., & Ward, J. V. (1998). Conservation by restoration: the management concept for a river-floodplain system on the Danube River in Austria. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 8(1), 71–86. https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0755(199801/02)8:1<71::AID-AQC265>3.0.CO;2-D

Tockner, K., Lorang, M. S., & Stanford, J. A. (2010). River flood plains are model ecosystems to test general hydrogeomorphic and ecological concepts. River Research and Applications, 26(1), 76–86. https://doi.org/10.1002/rra.1328

Tockner, K., Pennetzdorfer, D., Reiner, N., Schiemer, F., & Ward, J. V. (1999b). Hydrological connectivity, and the exchange of organic matter and nutrients in a dynamic river-floodplain system (Danube, Austria). Freshwater Biology, 41(3), 521–535. https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1999.00399.x

Tockner, K., & Schiemer, F. (1997). Ecological aspects of the restoration strategy for a river-floodplain system on the Danube River in Austria. Global Ecology and Biogeography Letters, 6(3–4), 321–329. https://doi.org/10.2307/2997746

Tockner, K., & Stanford, J. A. (2002). Riverine flood plains: present state and future trends. In Environmental Conservation (Vol. 29, Issue 3, pp. 308–330). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/S037689290200022X

Tögel, R. (2017). Integrative Ansätze zur Bewältigung der wasserbaulichen Herausforderungen an der österreichischen Donau. In Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Wasserbauliche Herausforderungen an den Binnenschifffahrtsstraßen. Bundesanstalt für Wasserbau.

Vetsch, D., Siviglia, A., Bacigaluppi, P., Bürgler, M., Caponi, F., Conde, D., Gerke, E., Halso,

M., Kammerer, S., Koch, A., Peter, S., Vanzo, D., Vonwiller, L., & Weberndorfer, M. (2023a). System Manuals of BASEMENT - Introduction & Installation. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW). ETH Zurich., 4.0.1. http://www.basement.ethz.ch

Vetsch, D., Siviglia, A., Bacigaluppi, P., Bürgler, M., Caponi, F., Conde, D., Gerke, E., Halso, M., Kammerer, S., Koch, A., Peter, S., Vanzo, D., Vonwiller, L., & Weberndorfer, M. (2023b). System Manuals of BASEMENT - UserManual. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW). ETH Zurich., 4.0.1., 205. https://www.basement.ethz.ch.

Vetsch, D., Siviglia, A., Bürgler, M., Caponi, F., Ehrbar, D., Facchini, M., Faeh, R., Farshi, D., Gerber, M., Gerke, E., Kammerer, S., Koch, A., Mueller, R., Peter, S., Rousselot, P., Vanzo, D., Veprek, R., Volz, C., Vonwiller, L., & Weberndorfer, M. (2022a). System Manuals of BASEMENT - Introduction & Installation. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW). ETH Zurich., 2.8.2, 58. http://www.basement.ethz.ch

Vetsch, D., Siviglia, A., Bürgler, M., Caponi, F., Ehrbar, D., Facchini, M., Faeh, R., Farshi, D., Gerber, M., Gerke, E., Kammerer, S., Koch, A., Mueller, R., Peter, S., Rousselot, P., Vanzo, D., Veprek, R., Volz, C., Vonwiller, L., & Weberndorfer, M. (2022b). System Manuals of BASEMENT - Reference Manual. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW). ETH Zurich., 2.8.2, 166. http://www.basement.ethz.ch

Vetsch, D., Siviglia, A., Bürgler, M., Caponi, F., Ehrbar, D., Facchini, M., Faeh, R., Farshi, D., Gerber, M., Gerke, E., Kammerer, S., Koch, A., Mueller, R., Peter, S., Rousselot, P., Vanzo, D., Veprek, R., Volz, C., Vonwiller, L., & Weberndorfer, M. (2022c). System Manuals of BASEMENT - Test Cases. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW). ETH Zurich., 2.8.2, 74. http://www.basement.ethz.ch

Vetsch, D., Siviglia, A., Bürgler, M., Caponi, F., Ehrbar, D., Facchini, M., Faeh, R., Farshi, D., Gerber, M., Gerke, E., Kammerer, S., Koch, A., Mueller, R., Peter, S., Rousselot, P., Vanzo, D., Veprek, R., Volz, C., Vonwiller, L., & Weberndorfer, M. (2022d). System Manuals of BASEMENT - Tutorials. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW). ETH Zurich., 2.8.2, 157. http://www.basement.ethz.ch

Vetsch, D., Siviglia, A., Bürgler, M., Caponi, F., Ehrbar, D., Facchini, M., Faeh, R., Farshi, D., Gerber, M., Gerke, E., Kammerer, S., Koch, A., Mueller, R., Peter, S., Rousselot, P., Vanzo, D., Veprek, R., Volz, C., Vonwiller, L., & Weberndorfer, M. (2022e). System Manuals of BASEMENT - UserManual. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW). ETH Zurich., 2.8.2, 111. http://www.basement.ethz.ch

Vetsch, David, Bürgler, M., Gerke, E., Kammerer, S., Vanzo, D., & Boes, R. (2020).

BASEMENT – Softwareumgebung zur numerischen Modellierung der Hydro- und Morphodynamik in Fließgewässern. Österreichische Wasser- Und Abfallwirtschaft, 72(7–8), 281–290. https://doi.org/10.1007/s00506-020-00677-6

via donau. (2010). Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau. via donau Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH. http://www.via-donau.org/

via donau. (2021). Fließgeschwindigkeiten der österreichischen Donau. via donau Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH. http://www.via-donau.org/

Ward, J. V., Tockner, K., & Schiemer, F. (1999). Biodiversity of floodplain river ecosystems: ecotones and connectivity. Regulated Rivers: Research & Management, 15(1–3), 125–139. https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199901/06)15:1/3<125::AID-RRR523>3.0.CO;2-E

Welti, N., Bondar-Kunze, E., Tritthart, M., Pinay, G., & Hein, T. (2012). Nitrogen dynamics in complex Danube River floodplain systems: effects of restoration. River Systems, 20(1–2), 71–85. https://doi.org/10.1127/1868-5749/2011/0047

Wesner, W. (2006). Marchfeldschutzdamm Bereich Lobau - Erhebung des ökologischen Ist-Zustands und Erstellung eines Managementplans. In Nationalpark Donauauen-Wissenschaftliche Reihe: Vol. 20/2006.

Wolski, K., Tyminski, T., & Dabek, P. B. (2018). Assessment of the effect of vegetation on the transition of the flood wave using hydraulic 2D models. E3S Web of Conferences, 44(00195), 1–8. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184400195

Zepp, H. (2017). Geomorphologie: Eine Einführung. utb. Stuttgart

Internetquellen

DANUBEPARKS, 2023: DANUBEPARKS – network of protected areas. About us. Members. URL: https://danubeparks.org/#members ; Zuletzt aufgerufen: 21.01.23

Esri Lexikon, 2023: GIS Dictionary. URL: https://support.esri.com/de-de/gis-dictionary/ ; Zuletzt aufgerufen: 31.08.2023

Hydrological Engineering Center, 2023a. HEC-RAS User´s Manual. U.S. Army Corps of Engineers. Davis CA. URL: https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest/introduction-to-hec-ras ; Zuletzt aufgerufen: 15.05.2023

Hydrological Engineering Center, 2023b. HEC-RAS 2D User´s Manual. Development of the 2D Computational Mesh. U.S. Army Corps of Engineers. Davis CA. URL: https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/latest/development-of-a-2d-or-combined-1d-2d-model/development-of-the-2d-computational-mesh ; Zuletzt aufgerufen: 16.05.2023

Hydrological Engineering Center, 2023c. HEC-RAS 2D User´s Manual. Optimize your Computer for Fast Computation. U.S. Army Corps of Engineers. Davis CA. URL: https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/latest/optimize-your-computer-for-fast-computations ; Zuletzt aufgerufen: 16.05.2023

Hydrotec, 2023. HydroAS. Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH. Aachen. URL: https://www.hydrotec.de/software/hydroas/ ; Zuletzt aufgerufen: 15.05.2023

Lexikon der Geographie, 2023: Lexikon der Geographie. URL: https://www.spektrum.de/lexikon/geographie ; Zuletzt aufgerufen: 31.08.2023

MIKE, 2023. Areas of Application. MIKE Powered by DHI. DHI Group. URL: https://www.mikepoweredbydhi.com/areas-of-application ; Zuletzt aufgerufen: 15.05.2023

NCCHE, 2023: NCCHE Software. National Center for Computational Hydroscience and Engineering. The University of Mississippi. South Oxford Center. URL: https://www.ncche.olemiss.edu/software/ ; Zuletzt aufgerufen: 15.05.2023

Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2023a: Zahlen, Daten, Fakten. URL: https://www.donauauen.at/wissen/zahlen-daten-fakten ; Zuletzt aufgerufen: 02.02.2023

Nationalpark Donau-Auen GmbH, 2023b: Die Lebensräume. URL: https://www.donauauen.at/wissen/natur-wissenschaft/die-lebensraeume ; Zuletzt aufgerufen: 31.08.2023

NOEL, 2023: Messstellen. URL: https://www.noel.gv.at/wasserstand/#/de/Messstellen ; Zuletzt aufgerufen: 31.08.2023

QGIS Documentation, 2023: QGIS User Guide. 7. QGIS GUI. © Copyright 2002-now, QGIS project. Last updated on 2023 Aug 20, 08:00 +0000. URL: https://docs.qgis.org/3.28/en/docs/user_manual/introduction/qgis_gui.html; Zuletzt aufgerufen: 20.08.2023

Stadt Wien, 2023: Technische Daten – Donau – Hochwasserschutz. URL: https://www.wien.gv.at/umwelt/gewaesser/hochwasserschutz/donau/daten.html; Zuletzt aufgerufen: 11.04.2023

USGS Earth Explorer, 2023: Landsat 8. Earth Explorer. URL: https://earthexplorer.usgs.gov/ ; Zuletzt aufgerufen: 31.08.2023

Anhang

BASEMENT_v2.8.2

Input Structure: Ganglinie A

```
PROJECT {
title = 1D-2D_Modell
author = Nils_Orwat
date = 11.04.2023
}
DOMAIN {
PHYSICAL_PROPERTIES {
gravity = 9.81
viscosity = 1e-06
rho_fluid = 1000
}
BASECHAIN_1D {
region_name = Donau
GEOMETRY {
file = Donau.bmg
cross_section_order = (1907500 1907400 1907300 1907200 1907100 1907000 1906900
1906800 1906700 1906600 1906500 1906400 1906300 1906200 1906100 1906000
1905900 1905800 1905700 1905600 1905500 1905400 1905300 1905200 1905100
1905000 1904900 1904800 1904700 1904600 1904500 1904400 1904300 1904200
1904100 1904000 1903900 1903800 1903700 1903600 1903500 1903400 1903300
1903200 1903100 1903000 1902900 1902800 1902700 1902600 1902500 1902400
1902300 1902200 1902100 1902000 1901900 1901800 1901700 1901600 1901500
1901400 1901300 1901200 1901100 1901000 1900900 1900800 1900700 1900600
1900500 1900400 1900300 1900200)
}
HYDRAULICS {
BOUNDARY {
type = hydrograph
string = upstream
file = Ganglinie_A.txt
slope = 0.46
precision = 0.001
number_of_iterations = 100
}
BOUNDARY {
type = hqrelation
string = downstream
slope = 0.46
}
FRICTION {
type = strickler
default_friction = 31
}
INITIAL {
type = continue
file = Donau_restart_86400.dat
}
```

```
PARAMETER {
minimum_water_depth = 0.05
simulation_scheme = explicit
riemann_solver = roe
SECTION_COMPUTATION {
type = table
min_interval = 0.0025
max_interval = 0.2025
}
}
}
TIMESTEP {
total_run_time = 859500
initial_time_step = 1.0
maximum_time_step = 60.0
CFL = 0.95
start_time = -1.0
}
OUTPUT {
output_time_step = 3600
console_time_step = 3600
restart_time_step = 21600
SPECIAL_OUTPUT {
type = monitor
cross_sections = (1907500 1900200)
output_time_step = 3600
wse = (time min max)
}
SPECIAL_OUTPUT {
type = monitor
cross_sections = (1907500 1906500 1906200 1905300 1905100 1904800 1904600 1904400
1904200 1903700 1903500 1903100 1902900 1902700 1902300 1901700 1901800
1900200)
output_time_step = 3600
Q = (time min max sum)
}
}
}
BASEPLANE_2D {
region_name = DonauAuen
GEOMETRY {
type = 2dm
file = DonauAuen.2dm
}
HYDRAULICS {
PARAMETER {
minimum_water_depth = 0.05
}
FRICTION {
type = strickler
wall_friction = off
index = (1 2 3 4 5 6)
friction = (29 29 22 16 38 8)
input_type = index_table
default_friction = 31
}
```

```
INITIAL {
type = continue
file = DonauAuen_restart.cgns
restart_solution_time = 86400.000
}
}
TIMESTEP {
total_run_time = 859500
CFL = 0.95
start_time = -1.0
}
OUTPUT {
console_time_step = 3600
restart_time_step = 21600
SPECIAL_OUTPUT {
type = balance
balance_values = (water_volume)
output_time_step = 3600
}
SPECIAL_OUTPUT {
type = node_centered
format = sms
output_time_step = 900
values = (velocity depth wse)
}
SPECIAL_OUTPUT {
type = element_centered
format = shape
output_time_step = 3600
values = (velocity depth wse)
}
}
}
COUPLINGS {
PARAMETER {
max_time_level = 1
}
COUPLING_LATERAL {
basechain = Donau
baseplane = DonauAuen
connections_automatic = no
connections_filename = lateral_connections_created.dat
weir_from_dyke1D = no
damping_factor = 0.5
}
}
PARALLEL {
number_threads = 4
}
}
```

BASEMENT_v2.8.2

Input Structure: Ganglinie B

```
PROJECT {
title = 1D-Modell
author = Nils_Orwat
date = 05.09.2022
}
DOMAIN {
PHYSICAL_PROPERTIES {
gravity = 9.81
viscosity = 1e-06
rho_fluid = 1000
}
BASECHAIN_1D {
region_name = Donau
GEOMETRY {
file = Donau.bmg
cross_section_order = (1907500 1907400 1907300 1907200 1907100 1907000 1906900
1906800 1906700 1906600 1906500 1906400 1906300 1906200 1906100 1906000
1905900 1905800 1905700 1905600 1905500 1905400 1905300 1905200 1905100
1905000 1904900 1904800 1904700 1904600 1904500 1904400 1904300 1904200
1904100 1904000 1903900 1903800 1903700 1903600 1903500 1903400 1903300
1903200 1903100 1903000 1902900 1902800 1902700 1902600 1902500 1902400
1902300 1902200 1902100 1902000 1901900 1901800 1901700 1901600 1901500
1901400 1901300 1901200 1901100 1901000 1900900 1900800 1900700 1900600
1900500 1900400 1900300 1900200)
}
HYDRAULICS {
BOUNDARY {
type = hydrograph
string = upstream
file = Ganglinie_B.txt
slope = 0.46
precision = 0.001
number_of_iterations = 100
}
BOUNDARY {
type = hqrelation
string = downstream
slope = 0.46
}
FRICTION {
type = strickler
default_friction = 31
}
INITIAL {
type = continue
file = Donau_restart_86400.dat
}
PARAMETER {
minimum_water_depth = 0.05
simulation_scheme = explicit
riemann_solver = roe
```

```
SECTION_COMPUTATION {
type = table
min_interval = 0.0025
max_interval = 0.2025
}
}
}
TIMESTEP {
total_run_time = 779400
initial_time_step = 1.0
maximum_time_step = 60.0
CFL = 0.95
start_time = -1.0
}
OUTPUT {
output_time_step = 3600
console_time_step = 3600
restart_time_step = 21600
SPECIAL_OUTPUT {
type = monitor
cross_sections = (1907500 1900200)
output_time_step = 3600
wse = (time min max)
}
SPECIAL_OUTPUT {
type = monitor
cross_sections = (1907500 1906500 1906200 1905300 1905100 1904800 1904600 1904400
1904200 1903700 1903500 1903100 1902900 1902700 1902300 1901700 1901800
1900200)
output_time_step = 3600
Q = (time min max sum)
}
}
}
BASEPLANE_2D {
region_name = DonauAuen
GEOMETRY {
type = 2dm
file = DonauAuen.2dm
}
HYDRAULICS {
PARAMETER {
minimum_water_depth = 0.05
}
FRICTION {
type = strickler
wall_friction = off
index = (1 2 3 4 5 6)
friction = (29 29 22 16 38 8)
input_type = index_table
default_friction = 31
}
INITIAL {
type = continue
file = DonauAuen_restart.cgns
restart_solution_time = 86400.000
```

```
}
}
TIMESTEP {
total_run_time = 779400
CFL = 0.95
start_time = -1.0
}
OUTPUT {
console_time_step = 3600
restart_time_step = 21600
SPECIAL_OUTPUT {
type = balance
balance_values = (water_volume)
output_time_step = 3600
}
SPECIAL_OUTPUT {
type = node_centered
format = sms
output_time_step = 900
values = (velocity depth wse)
}
SPECIAL_OUTPUT {
type = element_centered
format = shape
output_time_step = 3600
values = (velocity depth wse)

}
}
}
COUPLINGS {
PARAMETER {
max_time_level = 1
}
COUPLING_LATERAL {
basechain = Donau
baseplane = DonauAuen
connections_automatic = no
connections_filename = lateral_connections_created.dat
weir_from_dyke1D = no
damping_factor = 0.5
}
}
PARALLEL {
number_threads = 4
}
}
```