

Donauschifffahrt im Ingolstädter Becken in römischer Zeit – von der Rekonstruktion bis zur Reisezeit

Uwe Arauner

Abstract: The paper deals with the reconstruction of a water-dominated river landscape in the Ingolstadt basin in Roman times and the question of how to simulate travel times at that time. For this purpose, performance data of reconstructed Roman military ships were combined with the conditions of an ancient river system with the aim of obtaining realistically quantifiable forecasts for Roman inland navigation.

Einleitung

Das Flusssystem der Donau bildete in der römischen Kaiserzeit eine zentrale Lebensader der Infrastruktur der Nordwest-Provinzen und hatte eine immense Bedeutung für die Grenzsicherung sowie als Verkehrs- und Transportweg. Die Versorgung von Truppen als auch der zivilen Bevölkerung wurde, wann immer möglich, aus Kosten- und Zeitgründen über den Fluss durchgeführt. Heute kennen wir bis auf vereinzelte Restbestände von Donauauen und isolierten Altwasserarmen weder den genauen Verlauf der Donau noch die Verhältnisse, mit denen die Binnenschifffahrt in römischer Zeit zu kämpfen hatte.

Der Beitrag beschäftigt sich, aufbauend auf der Rekonstruktion des antiken Flusssystems im Ingolstädter Becken, mit der Berechnung von Reisezeiten damaliger Militärschiffe. In einer Modellsimulation werden experimentell ermittelte Leistungsdaten der Schiffsnachbauten mit wirklichkeitsnahen Attributen des antiken Flusslaufs verknüpft, mit dem Ziel, realitätsnahe und quantifizierbare Reisezeiten für eine römerzeitliche Flussschifffahrt zu gewinnen. Für die Historiker eröffnen sich hiermit Einblicke in Fahrzeiten, Transportgeschwindigkeiten und Leistungsfähigkeit der römischen Schifffahrt auf der Donau.

Rekonstruktion des antiken Donauverlaufs

Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich über das Ingolstädter Becken von der Weltenburger Enge im Osten (Flkm 2419) bis zur Neuburger Enge bei Stepperg (Flkm 2486) im Westen (Abb. 1).

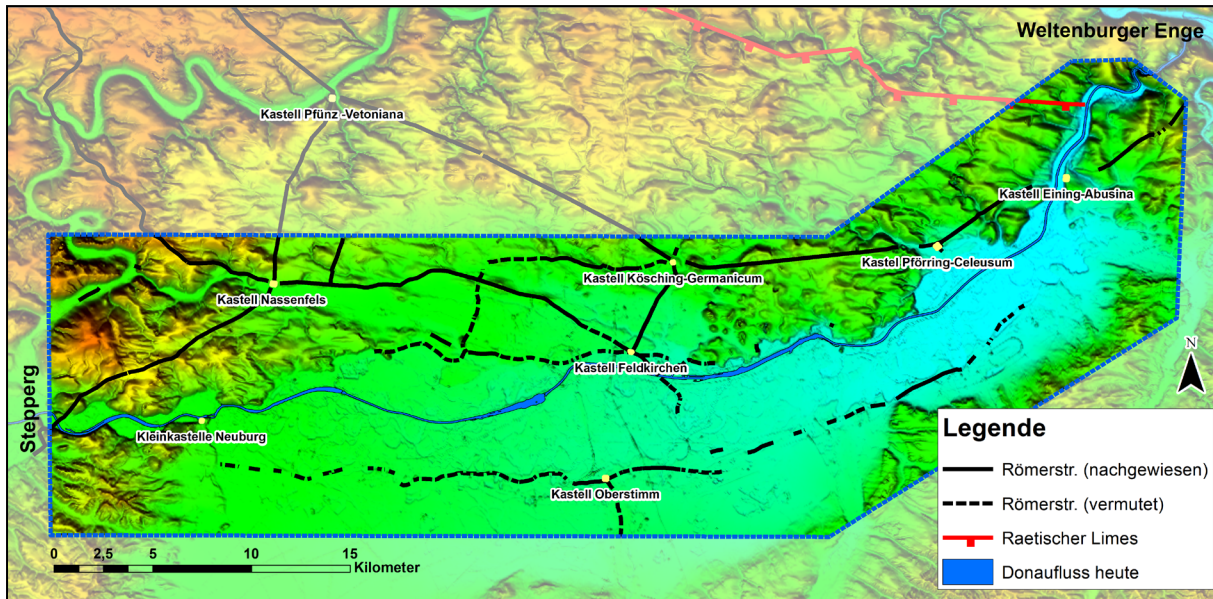


Abb. 1: Untersuchungsgebiet mit Kastellen der Römischen Kaiserzeit und archäologisch nachgewiesenen sowie vermuteten Römerstraßen aus dem Bayerischen Denkmal-Atlas, Basisdaten: Geländemodell DGM2 und DGM5 Stadt Ingolstadt, DGM30 SRTM-GDEM ©NASA 2009. (Verf.).

Die heutige Flusslaufänge beträgt 67 km, wobei die Flussebene in einem Höhenbereich von 342 bis 385 müNN verläuft. Das Ingolstädter Becken wird im Norden von den Juraausläufern und im Süden vom tertiären Hügelland begrenzt. Der flussaktive Bereich weist eine Abflussbreite von 2–5,5 km auf und reduziert sich in den Weltenburger und Neuburger Engtälern auf eine Breite von 0,4–1,2 km. Im Osten befindet sich der Übergang von der natürlichen römischen Reichsgrenze (Donau) zum Limes. Im Zentrum des Untersuchungsgebietes, rund 5 km südlich des heutigen Donauverlaufs liegt das römische Kastell Oberstimm (1. Jh. n. Chr.), welches für diesen Abschnitt der Donau die Funktion eines Versorgungslagers hatte. Das Kastell hatte die Aufgabe den Verkehr entlang der wichtigen Donau-Südstraße und den Übergang nach Norden zu kontrollieren. 1994 wurden nahe dem Kastell an der Mündung des Brautlachbaches, zwei sehr gut erhaltene frühkaiserzeitliche Patrouillenboote gefunden.

Methodik und Abgleichungsprozess

Einen antiken Donauverlauf zu rekonstruieren, erscheint angesichts der wechselvollen Flussgeschichte eines sich ständig veränderten Flusssystemes zunächst fast unmöglich. Dessen ungeachtet wird im Folgenden der Versuch unternommen, durch die Rekonstruktion der antiken Wasserverhältnisse zumindest annähernd die Flusslandschaft vor rund 2000 Jahren zu erfassen. Die Methodik basiert auf dem Aufbau eines Differenzenmodells, in welchem die rekonstruierte Grund- und Hochwasserfläche mit Geländemodellen¹ räumlich verschnitten wird. Der Vorteil des Differenzenmodells – auch als Grundwasserflurabstandskarte² bekannt – liegt insbesondere in der Visualisierung durch eine farbliche Darstellung von Intervallflächen. Hierzu ordnet man den einzelnen Werteklassen eine assoziative Farbgebung von blau (oberflächennahes Grundwasser) bis hin zu braun (tiefer Grundwasserstand) zu. Im Ergebnis wird eine

- 1 Für den Großteil des Untersuchungsgebietes stand ein digitales Geländemodell mit einer Rasterweite von 2x2 m (DGM 2) und 5x5 m (DGM5) zur Verfügung. Das Modellgebiet wurde östlich und westlich mit den SRTM-Daten (Shuttle Radar Topography Mission) der NASA mit einer Rasterweite von 30x30 m ergänzt.
- 2 Der Grundwasserflurabstand wird als lotrechter Höhenunterschied zwischen dem Gelände und der Grundwasseroberfläche des oberen Grundwasserstockwerkes definiert.

von Wasser geprägte Morphologie sichtbar, welche mit dem bloßen Auge heutzutage nicht mehr wahrnehmbar ist. Die Durchführung einer antiken Grundwassermodellierung ist letztendlich ein interaktiver Abgleichungsprozess (“check and balance”) von hydrogeologischen und archäologischen Daten innerhalb eines geografischen Informationssystems (GIS).³

Der Abgleich wird ergänzt durch eine Reihe von weiteren Datensätzen wie Grundwassermächtigkeit, Auelehmüberdeckung oder den Bohrergebnissen aus dem Boden- und Grundwasserarchiv⁴ (Abb. 2). Auf einen Teil der wichtigsten Datensätze und Fachinformationen wird nachfolgend kurz eingegangen.

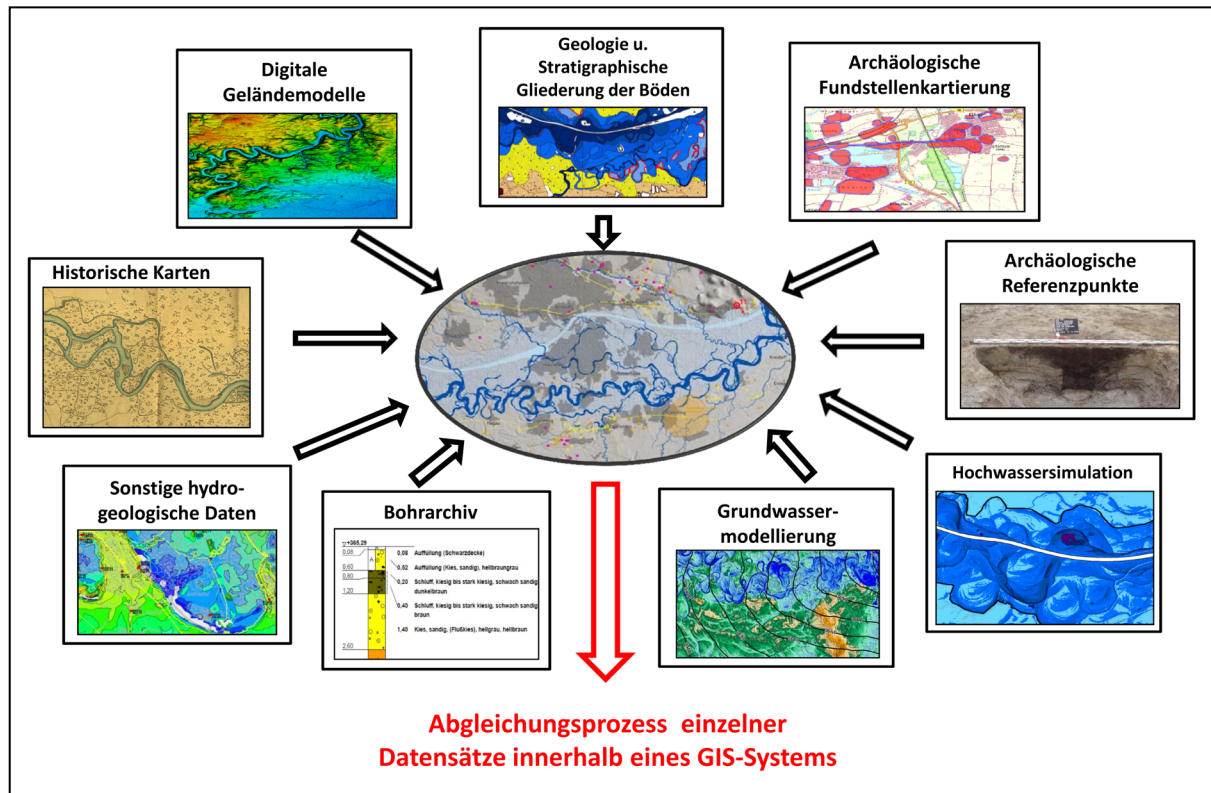


Abb. 2: Bausteine zur Rekonstruktion der Gewässer- und Topographieverhältnisse (Verf.).

Donauverlauf vor 200 Jahren

Einen ersten Eindruck des natürlichen Flussverlaufs vermitteln historische Karten wie die Bayerische Katasteraufnahme⁵ oder die Schmitt'sche Karte von Südwestdeutschland⁶ aus dem Jahr 1797. Die Urkatasterblätter im Maßstab 1:5000 aus den Jahren 1813–1817 zeigen noch am deutlichsten den anthropogen weitestgehend unbeeinflussten Donauverlauf mit seinen charakteristischen verzweigten bis mäandrierenden Hauptarmen mit einer Flussbreite von 110–180 m (Abb. 3).

3 Vgl. Gerlach (2006), S. 87–98.

4 Grundwassermanagement Ingolstädter Kommunalbetriebe AöR, Datenbasis: 4500 Bohrprofile, 1,4 Mio. gemessene Grundwasserstände an 1150 Messstellen über den Zeitraum von 1960–2020.

5 Digitalisiert abrufbar unter: <https://www.bayerische-landesbibliothek-online.de/ortsblaetter> (zuletzt abgerufen 24-04-2020).

6 Schmitt (1797).

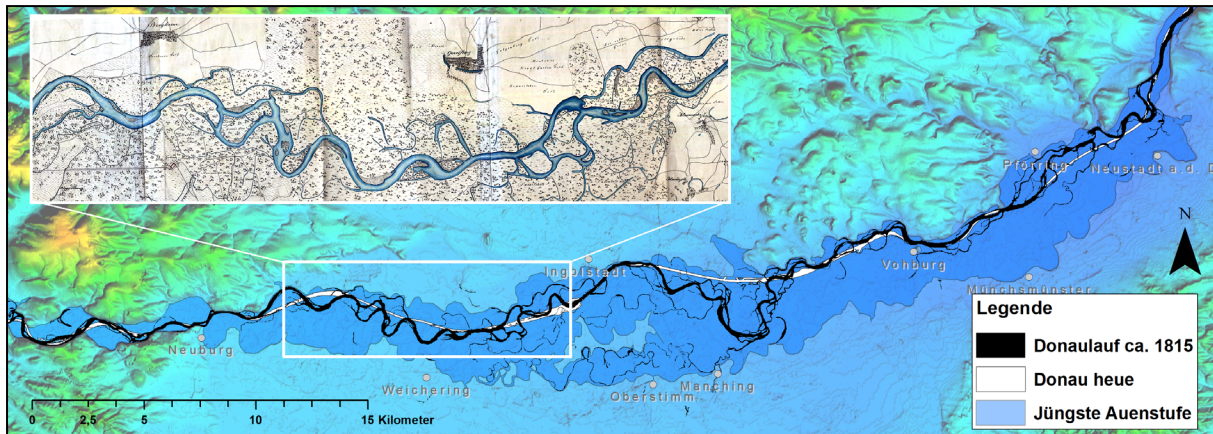


Abb. 3: Flussmorphologischer Zustand im Ingolstädter Becken zwischen Weltenburger Enge und Stepperg vor der Regulierung im Jahre 1815. Charakteristisch ist ein noch weitgehend natürlicher verzweigter Donauverlauf mit einem dominanten Hauptarm und vereinzelt Nebenrinnen sowie zahlreichen Inseln und Kiesbänken (Verf.).

Um eine Verbesserung der Schifffahrtsbedingungen herbeizuführen, erfolgten bereits Anfang des 19. Jh. größere flussbauliche Maßnahmen durch eine Mittelwasserkorrektur mit Laufbegradigung. Durch die Korrekturmaßnahmen hat sich allein die Länge des Abschnittes im Ingolstädter Becken um 18 % auf ca. 66 km verringert (Abb. 8). Um dem erhöhten Gefälle und der einsetzenden Tiefenerosion sowie dem gestiegenen Energiebedarf zu begegnen, wurde mit dem Bau der vier Staustufen in den Jahren 1968 bis 1992 das Ende des natürlichen Flussverlaufs besiegelt. Die historischen Karten können somit nur das morphologische Erscheinungsbild des jüngsten und niedrigsten Talniveaus wiedergeben, zu gravierend hat sich das instabile Flusssystem in den zurückliegenden Jahrhunderten verändert.

Die jungholozäne Auenterrasse

In den letzten 10.000 Jahren im erdgeschichtlichen Zeitalter des Holozäns prägte das fluviale System mit einer Vielfalt an Terrassen, Flussschlingen und Altarmen das Landschaftsbild im Ingolstädter Becken.

In der ersten Hälfte des Subatlantikums vor ca. 2.400 Jahren erreichte die fluviale Aktivität im Donautal einen ihrer Höhepunkte. Die Tendenz zur Verlagerung des Flusses war hier am größten, wobei diese durch den wachsenden anthropogenen Einfluss noch verstärkt wurde: Die Materialumlagerung erfasste nach und nach den gesamten Mäandergürtel. In poströmischer Zeit nahm die Tendenz zur Umlagerung von Flusssedimenten wieder ab, die Mäandrierung wurde geringer. Die Donau tendierte zur Ausbildung eines breiteren, flacheren Flussbettes.⁷

In dieser Zeit entstand die jungholozäne Talaue, welche sich in sechs Terrassen unterschiedlichen Alters untergliedern lässt. Ein Überblick über die Stratigraphie der jungholozänen Auenterrasse mit Flussgeschichte ist bei Peters⁸ zu finden. Die Flussterrassen, welche das Ergebnis eines mehrfachen Wechsels zwischen Erosion und Akkumulation sind, eignen sich besonders gut, um die Laufentwicklung eines großen Stromes nachzuzeichnen. Sie lassen sich anhand ihrer stratigraphischen Einordnung und ihres Höhenniveaus differenziert betrachten. Die obersten Terrassen sind demzufolge auch die ältesten und die unteren entsprechend jünger. Für die Rekonstruktion des Flussverlaufes sind die im Lauf von Eisen-

⁷ Jerz / Schmidt-Kale (1999), S. 39.

⁸ Peters / Jerz / Küster (2002).

zeit und Römerzeit entstandenen Auenterrassen am aufschlussreichsten, welche im Untersuchungsgebiet noch eine Fläche von annähernd 63 km² einnehmen (Abb. 4).

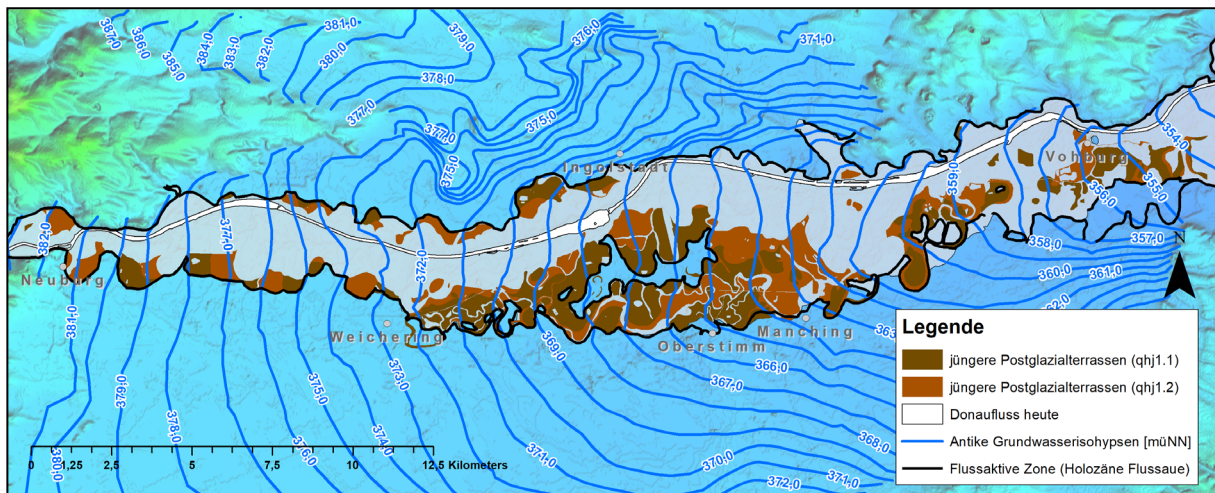


Abb. 4: Römerzeitliche Auenterrassen (Ausschnitt: Flkm 2440–2478) mit rekonstruierter Wasserspiegel-lage (Verf.).

Größere Teilflächen der jüngeren Postglazialterrassen (Stufe qh1₁ und qh1₂) prägen noch heute das Landschaftsbild südlich von Ingolstadt über einen rund 13 km langen Abschnitt zwischen den Ortschaften Weichering und Manching – auch Alte Donau genannt (Abb. 4). Ihre Erhaltung dürfte weitgehend der anthropogenen Donauverlegung⁹ im 14. Jh. zu verdanken sein, wo die Donau von ihrem alten Verlauf nach Norden an die werdende Stadt herangelegt wurde. Der morphologisch noch weitgehend erhaltene Abschnitt ermöglicht es, das Oberflächengefälle im Talraum für die antike Donau weitestgehend zu ermitteln.¹⁰

Hochwassersimulation – flussaktive Zone

Die Ermittlung der flussmorphologisch aktiven Zone und dessen potenzieller Überflutungsbereich, veranschaulichen die fluvialen Aktivitäten im Donautal und dessen laterale Abgrenzung. Die flusssynamisch aktive Zone, wurde hierbei nicht nach geomorphologischen Gesichtspunkten, sondern hydrologisch über ein außergewöhnliches Hochwasserereignis simuliert. Da für eine Hochwassersimulation die Scheitelabflüsse der ehemaligen Hochwässer kaum mehr über die Topographie der Flussaue zu berechnen sind (Wasserstand-Abfluss-Beziehung), müssen die Wasserspiegellagen aus historischen Hochwassermarken oder entsprechenden Referenzbezügen (Bodendenkmäler, Terrassenmorphologie) ermittelt werden. Auf deren Basis wurde für das Untersuchungsgebiet ein extremes Hochwasserszenario simuliert, wie es sich im 18. Jh. und in früheren Zeiten immer wieder ereignet hat (Abb. 5).

⁹ 1374 verfügten die bayerischen Herzöge Friedrich und Stephan III., dass der nördliche Hauptarm von allen Wasserfahrzeugen zu benutzen sei, die auf der Donau an Ingolstadt vorbeifuhren. Vgl.: Hofmann (2000), S. 192ff.

¹⁰ Vgl. Abschnitt: Gefälle- und Fließgeschwindigkeit der antiken Donau.

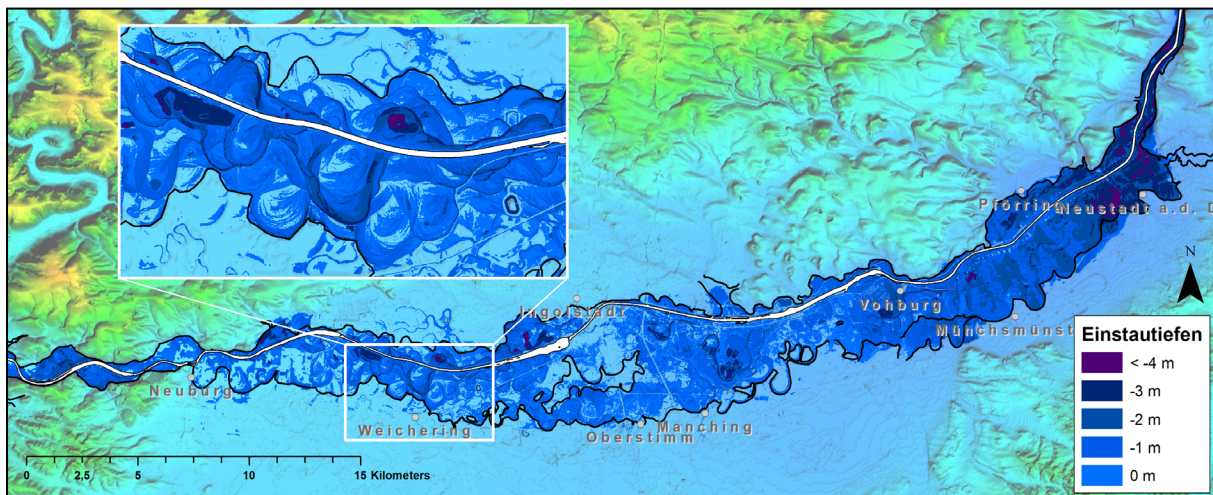


Abb. 5: Berechnete Überflutungsflächen der Donau für ein historisches Hochwasserereignis aus dem Jahre 1784 mit Abgrenzung (schwarze Linie) der flussmorphologischen aktive Zone. (Verf.).

Im historischen Szenario erstreckte sich die Flussaktivität innerhalb des Talniveaus mit Einstautiefen von 0,5 bis 3 m nahezu über das gesamte Donautal. Die Hochwassersimulation gibt erste Hinweise auf die vom Fluss geformten jungholozänen Rinnenstrukturen. Innerhalb einer flussaktiven Breite von 3–5 km werden zugleich Paläomäander sichtbar, welche in ältere Auenterrassen hineinreichen. Ein überwiegender Teil wurde hierbei durch die morphodynamischen Prozesse unter den klimatischen Bedingungen der letzten 200–300 Jahre geprägt. Das Szenario stellt gleichzeitig ein ca. 1000-jähriges Extremhochwasserereignis dar, wie es sich als „Magdalenenflut“¹¹ im Sommer des Jahres 1342, höchstwahrscheinlich auch im Ingolstädter Donauroum, ereignete.

Hydrogeologisches Modell und archäologischer Abgleichungsprozess

Wichtiger Bestandteil der Rekonstruktion war der Aufbau einer antiken, für die Römerzeit repräsentativen Wasser- bzw. Grundwasseroberfläche. Wesentlicher Bestandteil hierfür sind die Grundwasserstände und der Verlauf der Oberflächengewässer. Die aus Grundwassermessstellen der letzten Jahrzehnte dokumentierten Messreihen¹² können nur begrenzt für den Aufbau eines hydrogeologischen Modells in Betracht gezogen werden. Im ersten Arbeitsschritt wurde ein Modellaufbau zunächst durch die Wasserspiegellage aus der antiken Flusslängsneigung (Niveau römerzeitliche Auenterrasse) und den untergeordneten hydraulisch an den Donauverlauf angebotenen Nebengewässern ermöglicht. Die Grundwasserverhältnisse außerhalb der jungholozänen Auenterrassen basieren behelfsmäßig auf den Maximalwerten des gut dokumentierten, gegenwärtigen Ist-Zustands¹³. Sie dienen zunächst als Hilfsnetz, nachdem davon ausgegangen wird, dass sich die Grundwasserverhältnisse in den Randgebieten nicht grundlegend geändert haben. Eine deutliche Anpassung musste aber für die im Süden angrenzenden Niedermoorgebiete erfolgen, wo nach deren Kultivierung im ausgehenden 18. Jh. eine generelle Grundwasserabsenkung von bis zu 1,5 m zu berücksichtigen war. In einem weiteren Arbeitsschritt er-

11 Vgl. Zbinden (2011), S. 193–203.

12 Vgl. Fußnote 4.

13 Für einen ersten Modellaufbau im Bereich der Hoch- und Niederterrasse stellten behelfsweise die mittleren höchsten Grundwasserstände aus einer Stichtagsmessung v. März 1999 die Ausgangsbasis dar.

folgte eine Abstimmung mit den hydrogeologischen Randbedingungen wie Grundwasserhöhengleichen und Fließrichtungen.¹⁴

Ein adäquates hydrogeologisches Modell ist trotz einer Reihe von Basisdaten¹⁵ nur zu erzielen, wenn es gelingt, ausreichend Referenzpunkte für einen Abgleich der Grundwasseroberfläche einzubeziehen. Wertvolle Hinweise auf prähistorische oder antike Grundwasserverhältnisse ergeben sich aus archäologischen Brunnenbefunden und Besiedelungspätzen. Die Modellanpassung erfolgte zunächst anhand von Grundwasserbrunnen aus der jüngeren vorrömischen Eisenzeit, welche vorwiegend auf dem äußeren Terrassenrand der Niederterrasse zur angrenzenden holozänen Donauaue vorzufinden sind (Abb. 6).

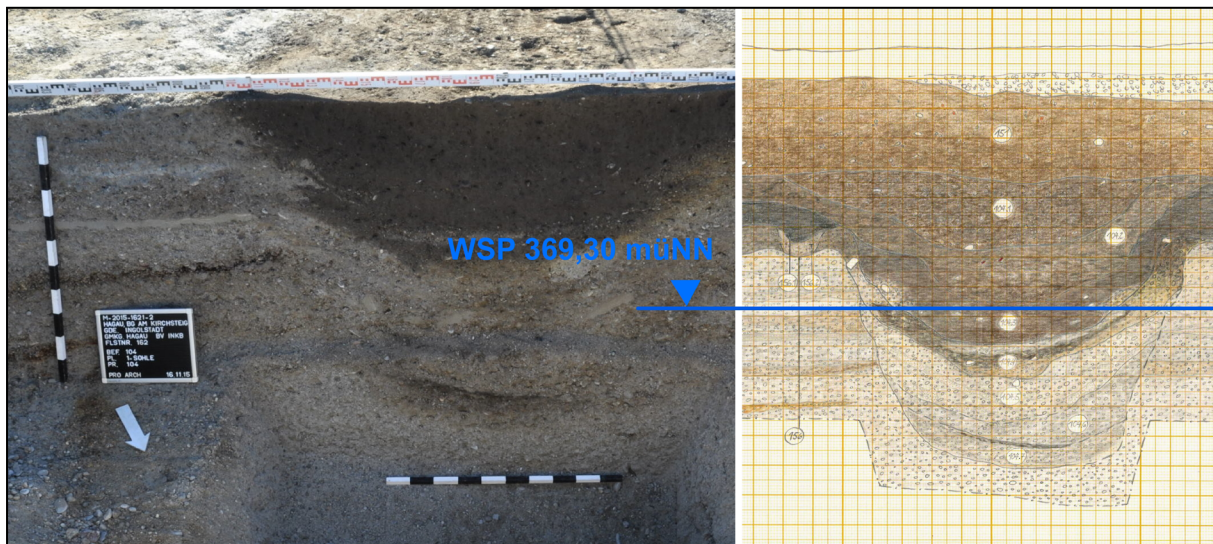


Abb. 6: Latènezeitlicher Brunnenschacht im BG Hagau / Am Kirchsteig (Befund Nr. 104) mit stratigraphischer Interpretation des Brunnens und fingiertem Grundwasserstand (Foto: Pro Arch, Ingolstadt).

Aufgrund des relativ geringen Schwankungsbereiches des Grundwassers, wie es sich aus vereinzelten archäologischen Befunden¹⁶ abzeichnet, kann der vergangene Grundwasserhorizont verlässlich fixiert werden.

Weitere wichtige Stützstellen im Abgleichungsprozess sind die zahlreich vorliegenden archäologischen Fundstellen im Donautal, wo sich das Besiedelungsgeschehen schon von jeher auf höher gelegene Terrassen und Höhenzüge ausrichtete. Die Informationen der Bodendenkmäler werden vom Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege als WMS-Layer¹⁷ zur Verfügung gestellt und lassen sich, in ein GIS eingebunden, mit anderen Layern überlagern. Dies ermöglicht es, das Differenzenmodell und die zugrunde liegende Wasseroberfläche mit den Fundstellen im GIS abzugleichen. Das heißt, dass beispielsweise bekannte römische Fundplätze, welche generell auf hoch- und grundwassersicheren Terrassen sowie auf erhöhtem Terrain angelegt wurden, im Modell zu hohe Wasserspiegel aufweisen und demzufolge eine Höhenanpassung im Modell erforderlich machen. Durch Vergleich mit den archäologischen Referenzpunkten kann das hydrogeologische Modell auf Plausibilität geprüft und gegebenenfalls weiter überarbeitet werden.

14 Siehe Abbildung 4.

15 Siehe Abbildung 2.

16 Näßl (2016), S. 20.

17 Der WMS-Layer des Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege wird durch das Geoportal Bayern unter: <https://geoportal.bayern.de/geoportalbayern/> zur Verfügung gestellt. (zuletzt gesehen a. 24-04-2020).

Analyse der Modellergebnisse

Nach wiederholter Plausibilitätsprüfung und Neuberechnung des Differenzenmodells lassen sich die Modellergebnisse wie folgt interpretieren: Die generierte Karte (Abb. 7) gibt zunächst einen Überblick über die räumliche Verteilung der mit Hilfe des hydrogeologischen Modells berechneten Flurabstandsklassen¹⁸ in einem Bereich von -1 m bis 10 m. Alle Bereiche mit positivem Wert (bis dunkelbraun) liegen über dem Wasserspiegel, alle negativen sind überstaut (bis dunkelblau).

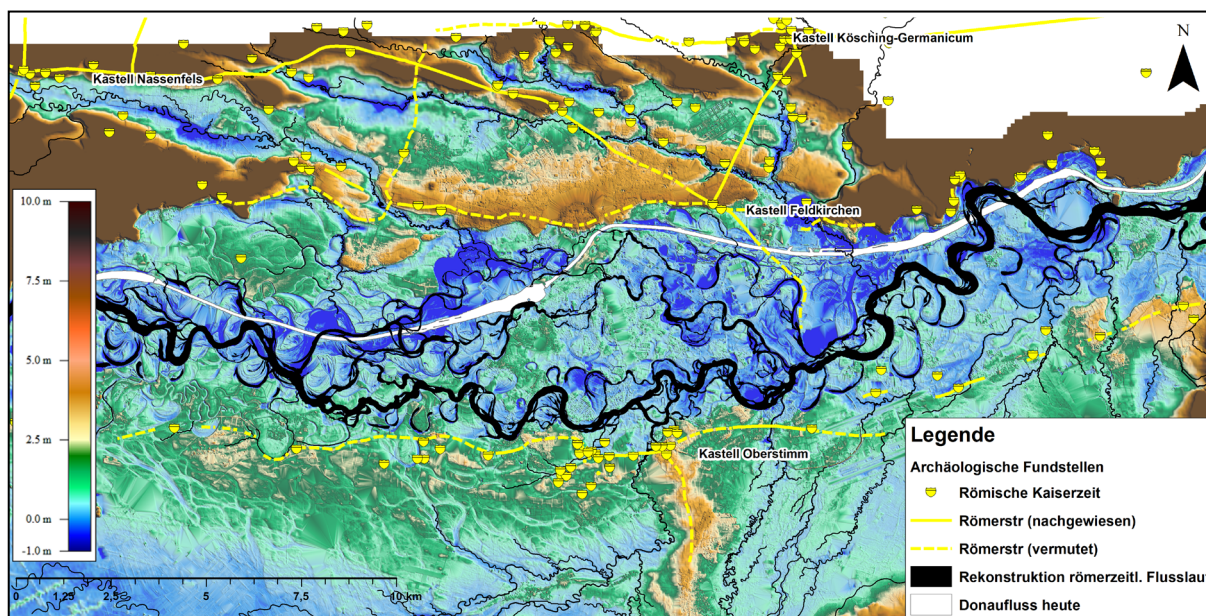


Abb. 7: Antikes Differenzenmodell (Grundwasserflurabstände) mit rekonstruiertem und vektorisiertem Gewässerverlauf (Ausschnitt: Flkm 2440–2474), Basisdaten Geländemodell: SRTM-GDEM ©NASA 2009 und Stadt Ingolstadt (Verf.).

Um dem Modell ein möglichst unbeeinflusstes Landschaftsbild zu geben, wurden alle künstlichen Geländeerhebungen oder Vertiefungen wie Straßen, Hochwasserschutzdeiche und Bahnlinien sowie Baggerseen aus dem Höhenmodell entfernt.¹⁹ Auf der Karte lassen sich die postglazialen Erosions- und Akkumulationsvorgänge der Donau an den zahlreichen, teils mäanderförmigen, teils verzweigten Flussarmen und Hochwasserrinnen in dunkelblauer Farbgebung (bis etwa $< 0,5$ m) ablesen. Die Gerinnesysteme lassen die Dynamik in einer frei fließenden Aue noch gut erahnen. Im Bereich des neuzeitlichen Flussverlaufs (dunkelblau) liegen die geringsten Flurabstände vor. Hier hat sich die Donau in den letzten Jahrhunderten durch die gesteigerte Erosionskraft zum Teil mehrere Meter in die Auenterrassen eingetieft (< -1 bis -2 m). Erhöhte Grundwasserflurabstände sind hingegen entlang der hochwassersicheren Niederterrasse im Süden mit $> 2,5$ m und entlang der Hochterrasse sowie der tertiären Höhenzüge mit $> 4,0$ m zu verzeichnen.

Die Rekonstruktion des römertlichen Flusslaufs in Abb. 7 beruht im Wesentlichen auf dem morphologischen Erscheinungsbild des sich abzeichnenden Rinnensystems unter Berücksichtigung der Auenstratigraphie. Wo sich die römertlichen Terrassen noch deutlich abzeichnen, lässt sich der Verlauf des Stroms mit Hilfe des Differenzenmodells noch verhältnismäßig gut rekonstruieren. Je größer jedoch der Niveauunterschied zu den angrenzenden jüngeren und tiefer liegenden Auenterrassen ist, umso unsiche-

¹⁸ Vgl.: Fußnote 2.

¹⁹ Die Überarbeitung des digitalen Geländemodells (DGM2) erfolgte über die Software Global Mapper v21.

rer wird eine Rekonstruktion. Wo die Auenterrassen durch jüngere Flussaktivitäten ausgeräumt wurden, ist eine verlässliche Rekonstruktion nicht durchführbar und bleibt der individuellen Interpretation überlassen.

Die abschließende Vektorisierung des Donauverlaufs zeigt, dass von einem überwiegend gewundenen, teils mäandrierenden Flusscharakter mit einzelnen Nebengerinnen auszugehen ist. Westlich und östlich des Untersuchungsgebietes, nimmt der Donaustrom aufgrund der morphologisch ausgebildeten Engtäler zwangsläufig einen überwiegend schwach gewundenen Verlauf ein. Die ermittelte ungefähre Flussbreite von durchschnittlich 200 m, sowie die teilweise engen Krümmungsradien von 200–400 m, dürften die Navigation sicherlich erschwert haben. Dies setzte etwa beim Segeln voraus, dass das von den Römern standardmäßig genutzte Rahsegel schnell auf den optimalen Windeinfallswinkel eingestellt werden konnte.

Der Mäandrierungsfaktor – das Maß der Intensität der Krümmung (Sinuosität) – welcher sich aus der Division der Flusslauflänge durch die Tallänge ergibt, wurde mit 1,40 ermittelt. Im Vergleich hierzu liegt die Sinuosität des historischen Donaulaufs aus der Zeit um 1817 bei 1,28.

Betrachtet man aus archäologischer Sicht die Verteilung der Flächen mit Bodendenkmälern, so erkennt man deutlich den breiten Auengürtel der Donau, der das Kartenbild als weitgehend befundfreier Streifen von Ost nach West durchschneidet. Es ist eine klare Ausrichtung der Flächen mit Bodendenkmälern auf die Gewässerläufe der Donau und ihrer Zuflüsse zu erkennen. Der Donauverlauf südlich von Ingolstadt orientiert sich zwischen der höher liegenden bronzezeitlichen Auenterrasse im Zentrum der Karte und der südlich verlaufenden Niederterrasse. Besonders das in der Nähe des Donauverlaufs gelegene römische Kastell in Oberstimm und die Kleinkastelle entlang der Donausüdstraße profitierten von der Situation mit dem mühelosen Zugang zu dem Flusssystem. Auch das bekannte römische Straßennetz meidet die feuchten, gewässernahen Bereiche und liegt mit Ausnahme der Flussübergänge gänzlich auf den höher gelegenen äußeren Terrassenrändern. Wie archäologische Brunnenbefunde im Randbereich der Flussaue zeigen, lagen nur geringe Grundwasserschwankungen von ca. 50–80 cm vor, was darauf hindeutet, dass die Donau damals über ein wesentlich seichteres und damit breiteres Flussbett verfügte. Das Donautal muss in dieser Zeit über Furten verfügt haben, die es erlaubten, den Hauptstrom an geeigneten Stellen, meist Schwemmfächer oder flache Schotterbänke, bei entsprechenden Niedrigwassersituationen zu überqueren.

Gefälle- und Fließgeschwindigkeit der antiken Donau

Für die Berechnung von Reisezeit und Reisegeschwindigkeit ist es unerlässlich, die Fließgeschwindigkeit der Donau zu bestimmen. Die Schwierigkeit liegt generell darin, dass für die antike Donau weder der exakte Flussverlauf noch die Gerinnegeometrie für die weiteren Berechnungen bekannt sind. Vor allem in den letzten Jahrhunderten haben anthropogene Einflüsse wie Begradigungen und Laufverkürzungen an der Donau und die damit verbundenen Erosionen und Eintiefungen des Flussgerinnes zu einer deutlichen Veränderung der Gefälle- und Fließgeschwindigkeiten geführt. Allein die Fließstrecke der Anfang des 19. Jh. noch frei fließenden Donau hat sich innerhalb des Untersuchungsgebietes von 80,4 km staugeregelt auf eine Streckenlänge von 66 km verringert (Abb. 8).

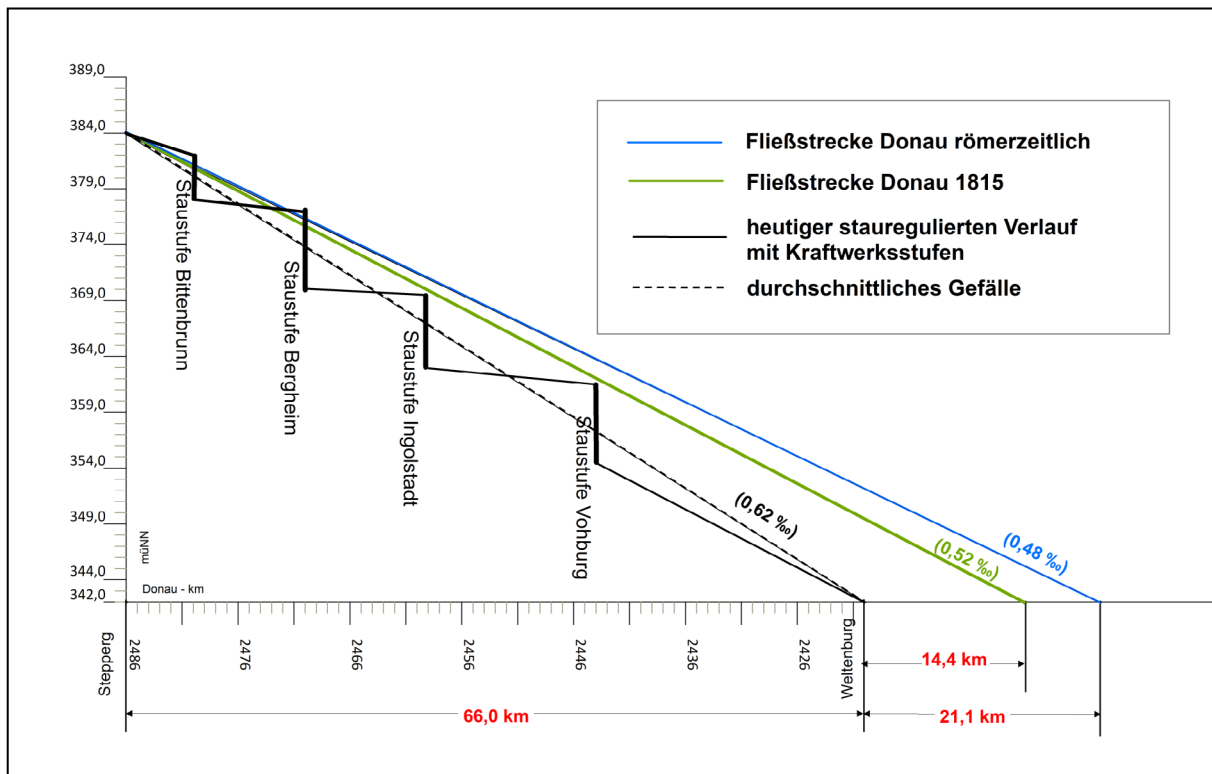


Abb. 8: Veränderung der Fließstrecke und der Gefälleverhältnisse seit der Römerzeit innerhalb des Untersuchungsgebietes (Verf.).

Bedingt hierdurch hat sich das Fließgefälle um insgesamt 10 % verringert. Als Glücksfall erwies sich, dass südlich von Ingolstadt entlang eines rund 13 km langen Flussabschnittes (heutige Sandrach) noch größere zusammenhängende Flächen von eisen- und römischen Terrassen existieren, über welche sich die Gefälleverhältnisse der antiken Donau abgreifen lassen. Das Fließgefälle kann aus den Längsprofilen der rezenten Sohl- und Wasserspiegellage der Sandrach mit ca. 0,54 ‰ abgeleitet werden. Umgelegt auf die 87,1 km lange rekonstruierte Donaustrecke, wurde das Gefälle letztlich über die Höhenangaben des hydrologischen Flusslängsschnittes mit einem einheitlichen Gefälle von 0,48 ‰ ausgeglichen.

Eine ungleich größere Herausforderung stellt die Abschätzung der mittleren Fließgeschwindigkeit für die Vergangenheit dar. Die zur hydraulischen Berechnung erforderlichen Abflussprofile orientieren sich wiederum an unterschiedlichen Querschnitten innerhalb der morphologisch weitgehend erhaltenen römischen Auenterrassen südlich von Ingolstadt. Die Berechnung der Fließgeschwindigkeit erfolgte über die empirische Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler²⁰ mit einer Fließgewässerrauheit von $0,3 \text{ s/m}^{1/3}$. Im Ergebnis kann die antike Fließgeschwindigkeit mit $0,85 \text{ m/s}$ bei einem Abfluss²¹ von $225 \text{ m}^3/\text{s}$ bestimmt werden. Diese Abflussmengen dürften circa in der Größenordnung damaliger Abflüsse gelegen haben, sofern man von einem römischen Klimaoptimum²² ausgehen kann. In welchem

20 Hydraulische Berechnung von Fließgewässern mit Vegetation DWA-M 524, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), D-53773 Hennef.

21 Die berechnete Abflussmenge liegt im Bereich der langjährig (1947–2005) gemessenen niedrigen bis mittleren Donauabflüsse von 128 bis $310 \text{ m}^3/\text{s}$, Bayer. Landesamt für Umwelt, Statistisches Jahrbuch, Messpegel Nr.: 10046105 Ingolstadt Luitpoldstraße. Digitalisiert abrufbar unter: https://media.hnd.bayern.de/pegel_jahrbuchseiten/Q/10046105.pdf (zuletzt abgerufen 27-04-2020).

22 Glaser (2008), S. 58.

Umfang klimatische, flussinterne oder anthropogene Einflüsse für die Entwicklung verantwortlich sind, wird vielfach in der Wissenschaft diskutiert.²³

Abflussberechnungen bei Hochwasser ergaben nur eine geringe Zunahme der Fließgeschwindigkeit, da sich der Abfluss innerhalb der breiten Flusslandschaft über eine Vielzahl von Nebengerinnen und höher gelegenen Auenterrassen erstreckte. Der Fluss konnte daher wohl auch bei kleineren Hochwasserereignissen befahren werden, selbst wenn sich die Orientierung bei einer Vielzahl von Nebengerinnen schwierig gestaltet haben dürfte.

Römische Flussschifffahrt und deren Fahrzeiten

Schiffstypen und Rudergeschwindigkeiten

Zwischen 2004 und 2011 wurden die in den 80er Jahren in Mainz und Oberstimm bei Manching geborgenen Schiffswracks von Teams aus Wissenschaftlern, Studierenden und freiwilligen Helfern unter der Leitung von Christoph Schäfer rekonstruiert und wissenschaftlich untersucht.²⁴ Die Schiffstypen *navis lusoria* und *Oberstimm* (Abb. 9) erwiesen sich bei Testfahrten durch ihre leichte Bauart und fehlende Ladung als überaus wendig und schnell einsatzbereit.



Abb. 9: Nachbau des Typs Oberstimm 1 Victoria, Foto: W. Huppertz.

²³ Jerz / Peters (2002), S. 107.

²⁴ Brechtel / Schäfer / Wagener (2016), S. 236–250.

Die mit Besatzung rund 4–5 Tonnen schweren Schiffe konnten mühelos beschleunigen und in der Spitze eine Endgeschwindigkeit von über 5 Knoten erreichen. Mit einem Rahsegel von 25 m² ausgerüstet, bildeten etwa 20–24 Ruderer den Hauptantrieb, was die Boote unabhängiger von Wind und Strömung macht. Die bis zu 18 m langen und 2,70 m breiten Schiffe waren allein mit der Besatzung ausgelastet und weniger zum Lastentransport konzipiert. Sie wurden vermutlich als Patrouillenboote genutzt, um die römischen Grenzen zu sichern. Bei den römischen Flusskriegsschiffen wird angenommen, dass sie im Donaoraum weit verbreitet und für die Bedingungen auf der Donau konzipiert waren.

In zahlreichen mit den Schiffsnachbauten unternommenen Versuchen, konnten bei mittleren Ruderfrequenzen für die *lusoria Rhenana* Rudergeschwindigkeiten von 4,1–4,7 Knoten und für den Bootstyp *Oberstimm* 4,6–5,3 Knoten ermittelt werden. Die Geschwindigkeiten wurden mit einem elektronischen nautischen Messsystem gemessen, mit dem die Versetzung durch Strom und Wind – also die Drift – herausgerechnet werden kann. So lassen sich valide und vergleichbare Daten gewinnen. Diese können daher auf den mäandrierenden Flussverlauf der Spätantike übertragen werden. Bei mehrtägigen Fahrten auf überwiegend geraden Kursen und bei längeren Distanzen, ist allenfalls eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 3–4 Knoten realistisch.²⁵ Für die nachfolgenden Simulationsberechnungen wird aufgrund der variierenden Gegebenheiten, von einer Rudergeschwindigkeit von 3 Knoten (= 5,5 km/h) flussaufwärts und von 3,5 Knoten (= 6,5 km/h) flussabwärts ausgegangen.

Segeleigenschaften der Schiffsnachbauten

Die Segeleigenschaften der Schiffsnachbauten wurden in zahlreichen Erprobungsfahrten ermittelt und in Polardiagrammen dokumentiert.²⁶ „Ein Polardiagramm zeigt die Segeleigenschaften eines Schiffes, d. h. die maximale Geschwindigkeit (bei optimaler Segelstellung) in Abhängigkeit von Windstärke und Windrichtung zum Schiff.“²⁷ Die Winkel im Polardiagramm dürfen hierbei nicht mit den Himmelsrichtungen verwechselt werden. Bei Testfahrten wurden Messungen bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Die erreichten Geschwindigkeiten wurden je nach Winkelbereich durch verschiedene Farben mit 1 bis 7 Knoten im Polardiagramm abgebildet (Abb. 10).

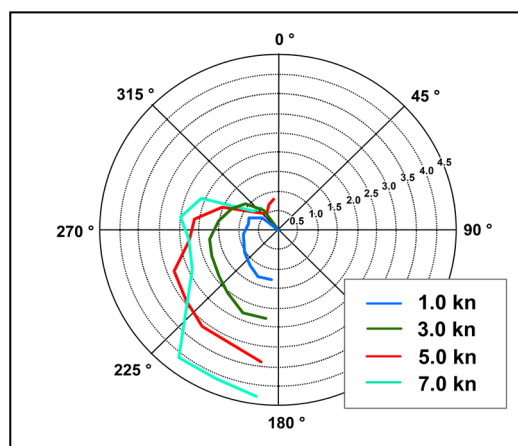


Abb. 10: Polardiagramm der *lusoria Rhenana* (Graphik: C. Wawrzyn).

25 Mündl. Mitteilung Christoph Schäfer (Univ. Trier): Medizinische Versuche auf dem Halterner See haben gezeigt, dass wir mit einer Dauerleistung von bis zu 4,48 kn für die *Lusoria Rhenana* und von 5,10 kn für die *Victoria* (*Oberstimm* 1) kalkulieren dürfen (Brechtel / Schäfer / Wagener [2016], S. 144).

26 Günther / Wawrzyn (2013).

27 Brechtel / Schäfer / Wagener (2016), S. 237.

Die Versetzung (Drift), welche bei seitlichem Wind unter Segel entsteht, wurde bei der Erstellung des Polardiagramms berücksichtigt und herausgerechnet. Zur Berechnung der Reisezeiten wurden die ermittelten Leistungsdaten der *navis lusoria Rhenana*, mit den interpolierten Messergebnissen von 1,3 – 4,2 Knoten, verwendet.

Windverhältnisse im Donautal

Windgeschwindigkeiten, Windrichtung und Windstärke sowie deren Häufigkeit, dürften sowohl für die Seefahrt als auch für die Binnenschifffahrt eine große Rolle gespielt haben. Es ist davon auszugehen, dass vor 2000 Jahren die postglazialen Landformen den heutigen entsprachen und bedingt durch die Corioliskraft und die planetarische Zirkulation bei uns die „Westwindzone“ vorherrschend war.²⁸

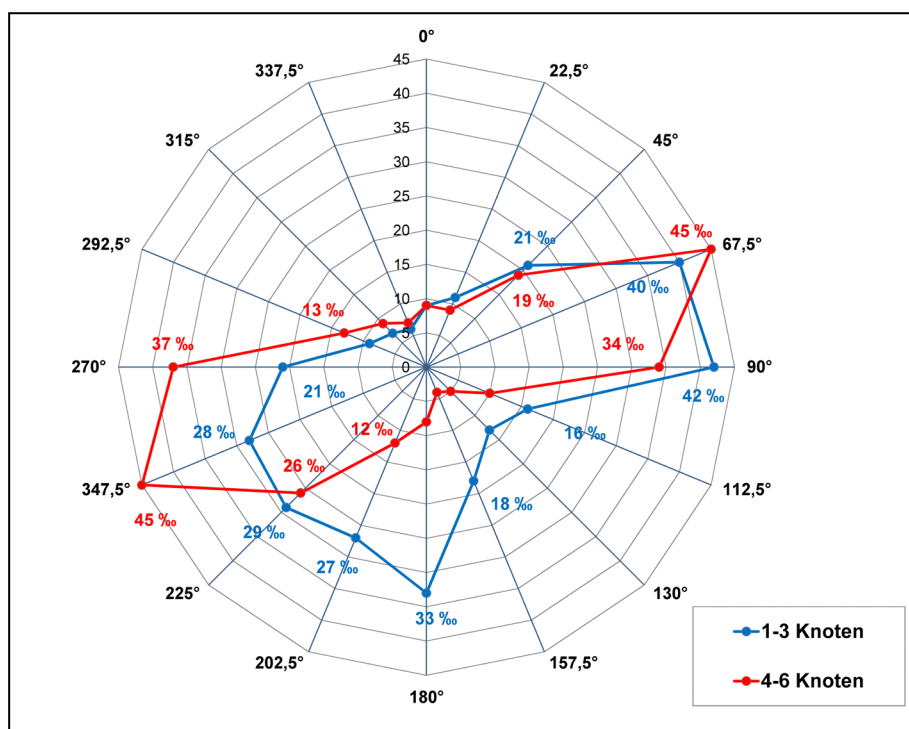


Abb. 11: Mittlere Bodenwindverteilung in 10 m Höhe, Messstation Flughafen Manching von 1971–2000 (Verf.).

Die Windverhältnisse im Donautal sind geprägt durch die Beckenlage, welche im Norden von den Juraausläufern und im Süden vom tertiären Hügelland begrenzt wird. Im Bereich der tief eingeschnittenen Flusstäler (Weltenburg-Eining und Neuburg-Stepperg) sorgt die Topografie zudem für eine Kanalisierung der Luftmassen mit südwest- und nordöstlich orientierten Hauptwindrichtungen. „Bayern erweist sich aufgrund seiner Randlage in Bezug auf den nordhemisphärischen Westwindgürtel als überwiegend windschwaches Gebiet. Die typischen Windgeschwindigkeiten in den südbayerischen Flusstälern liegen zwischen 1,7 und 2,0 m/s.“²⁹

28 Mündl. Information von Jürgen Kübert, Wehrtechnische Dienststelle für Luftfahrzeuge und Luftfahrtgerät der Bundeswehr (WTD 61) GF 230 GeoInfoBSt, Flugplatz 85077 Manching.

29 StMWIVT (2010), S. 17.

Für die nachfolgenden Rechenansätze wurden die langjährigen Daten der gemessenen Winddaten vom Flugplatz Manching für den Beobachtungszeitraum 1971–2000 verwendet. Die Messstation liegt ca. 5 km östlich von Oberstimm – dem Fundort der Römerschiffe. Aus der Abb. 11 sind die Bodenwindverteilungen im Donautal bei Manching im Bereich der unteren Windgeschwindigkeiten von 1–6 Knoten dargestellt.³⁰ Bei Windgeschwindigkeiten von 1–3 Knoten stellt sich die Hauptwindrichtung mit 42 % bzw. 40 % innerhalb eines relativ eng begrenzten Korridors aus östlicher Richtung ein. Die vorherrschende Hauptwindrichtung im Donautal erfolgt mit einem Anteil von 28 % bis 33 % aus südwestlicher Richtung. Höhere Windgeschwindigkeiten mit 4–6 Knoten verteilen sich mit 45 % hingegen deutlich auf nordöstliche und südwestliche Richtungen. Bei den Windgeschwindigkeiten von 1–3 Knoten verteilten sich die Häufigkeiten auf rund 130 Tage und von 4–6 Knoten auf rund 107 Tage im Jahr. An 29 Tagen im Jahr war es gemäß den Aufzeichnungen der Wetterwarte Manching windstill. Einschränkungen dürften sich jedoch aus der Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen ergeben haben. So konnte das Rahsegel flussabwärts bzw. flussaufwärts mit günstigen Hauptwindrichtungen aus Südwest und Nordost nur an ca. 70 Tagen im Jahr zum Einsatz kommen.

Berechnungsmodell für Fahrzeiten und Reisegeschwindigkeiten

Um die Fahrzeiten im Berechnungsmodell realitätsnah zu erfassen, ist es notwendig, den rekonstruierten Flussverlauf in einzelne Segmente mit entsprechenden Kurswinkeln zu untergliedern (Abb. 12).

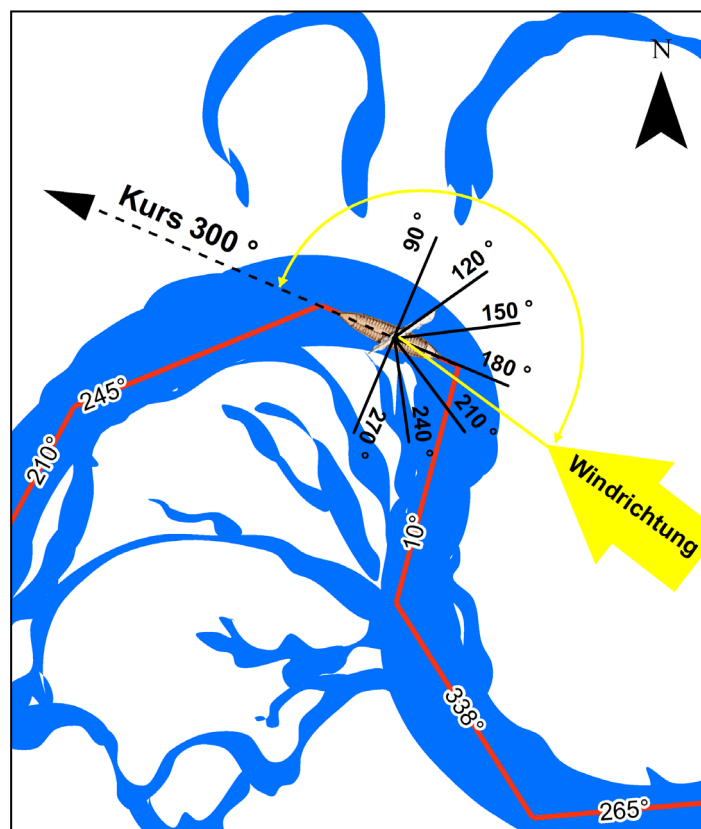
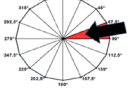
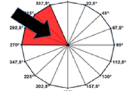




Abb. 12: Unterteilung des rekonstruierten Flussverlauf in einzelne Segmentabschnitte in Abhängigkeit von Kurswinkel, Windrichtung und Windeinfallswinkel zum Boot, unmaßstäblich (Verf.).

30 Nach Information der Wetterbeobachtungsstation der Wehrtechnischen Dienststelle für Luftfahrzeuge, Manching ist dies die relative Häufigkeit der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung (Durchschnitt 1971–2000).

Der 87 km lange Flussverlauf von Stepperg bis Weltenburg wird hierzu insgesamt in 146 Einzelsegmente mit Längen von 200–1600 m unterteilt. Kleinräumige Kursanpassungen an die Strömungsverhältnisse (Prallhang und Gleithang) bleiben zur Vereinfachung unberücksichtigt. Jedem einzelnen Segment, werden die jeweiligen Kurswinkel und Windeinfallswinkel aus dem Polardiagramm (Abb. 10) zugewiesen. Die Attribute der einzelnen Segmentabschnitte, welche im GIS-System vorliegen, werden abschließend über ein gestütztes Rechenmodell mit weiteren spezifischen Parametern wie Rudergeschwindigkeit (Fahrt durchs Wasser) und Strömungsgeschwindigkeit berechnet.³¹

Die für die antike Schifffahrt entscheidenden Ergebnisse wie Reisezeiten und Geschwindigkeiten sind sowohl für die vorwiegend günstigen, als auch für ungünstigen Hauptwindrichtungen in Tabelle 1 zusammengefasst.

	Windverhältnisse	Windrichtungs- verteilung	Windstärke bei 1 kn		Windstärke bei 3 kn		Windstärke bei 6 kn		
		[‰]	[h]	[km/h]	[h]	[km/h]	[h]	[km/h]	
Flussaufwärts	günstig Ostnordost bis Ost (67,5° - 90°)		41	20:41	4,2	15:57	5,5	12:33	6,9
	ungünstig West bis Nordordwest (270° - 337,5°)		11	Reisezeit ca. 35 h mit 2,5 km/h (nur Rudern)					
Flussabwärts	günstig Süd bis West (180° - 270°)		28	7:53	10,5 - 11,3	7:09	11,1 - 12,8	6:25	11,9 - 14,6
	ungünstig Nord bis Ost (0° - 90°)		25	Reisezeit ca. 9 h mit 9,5 km/h (nur Rudern)					

Tab. 1: Durchschnittlich berechnete Reisezeiten für den betrachteten 87,1 km langen Flussabschnitt mit den erreichten Geschwindigkeiten (Fahrt über Grund) bei unterschiedlichen Windverhältnissen und Windstärken.

Zu den flussabwärts erzielten Höchstgeschwindigkeiten ist anzumerken, dass sich die letztlich erreichten Geschwindigkeiten im unteren Bereich bewegen, da mit zunehmender Fahrt des Schiffes sich die Widerstandswerte bei der Fahrt durchs Wasser exponentiell erhöhen und deshalb die Segel- und Ruderleistungen nicht einfach addiert werden können. Kombiniert man Segel- und Ruderantrieb, gilt es zu bedenken, dass angesichts der Erfahrungen im Rahmen der Ruderversuche bei 6 Knoten Fahrt durchs Wasser ein Limit für die Koordination und die Frequenz der Ruderschläge erreicht wird. Eine Kombination der beiden Antriebsarten ist also überhaupt nur möglich bei Fahrt durchs Wasser von weniger als 6 Knoten.

Ausführliche Ergebnisse der numerischen Simulation sind als Netzdiagramme für alle Windrichtungen und unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten in den nachfolgenden Abb. 13 und Abb. 14 dargestellt. Aus ihnen sind die berechneten Fahrzeiten und die zurücklegbaren Ruderstrecken (mit oder ohne Segeleinsatz) zu entnehmen.

31 Die Umsetzung erfolgte mit ESRI ARCGIS und Microsoft Excel.

Simulierte Reisezeiten flussaufwärts

Bei optimalen Windverhältnissen mit 1–3 Knoten aus östlicher Richtung (67,5–90 Grad) liegen die Reisezeiten flussaufwärts für den rund 87,1 km langen Flussverlauf bei durchschnittlich 18,5 Stunden ($\pm 1,5$ h). Bei zunehmendem Wind auf 6 Knoten verringert sich die Fahrzeit auf rund 12,5 Stunden (siehe Abb. 13a). Unter diesen windgünstigen Voraussetzungen konnte mit rund 80 km der überwiegende Teil der Flussstrecke durch Rudern einschließlich Segelunterstützung bewältigt werden (Abb. 13b).

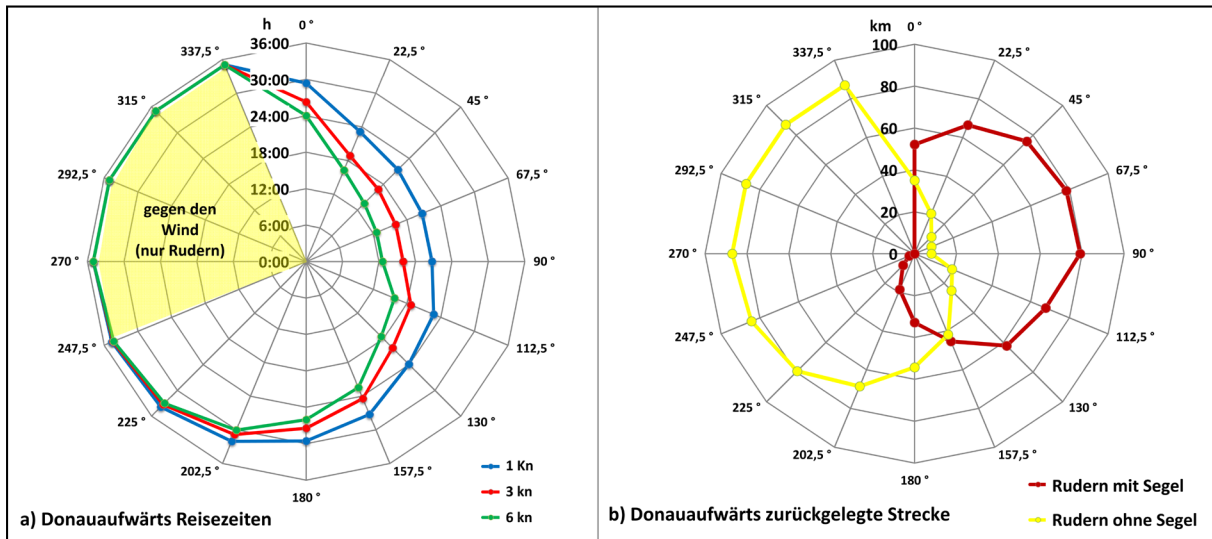


Abb. 13: Berechnete Reisezeiten und zurückgelegte Entfernungen bezogen auf Windrichtung und Windstärke (donauaufwärts) für den untersuchten Streckenabschnitt von 87,1 km. a) zeigt die erreichten Fahrzeiten von 12–34 Stunden in Abhängigkeit zu den Windrichtungen von 337,5°–247,5°. b) zeigt die zurücklegbare Ruderstrecke mit oder ohne Segeleinsatz. Beispiel: Kommt der Wind mit 0° aus Norden, können 52 km der Strecke mit Hilfe des Rahsegels und 35 km ohne Segel (nur Rudern) zurückgelegt werden (Verf.).

Für die verbleibende 7 km lange Flussstrecke musste sich die Mannschaft mit 3–5 Stunden zusätzlich in die Riemen legen. Segeln alleine ohne Rudern war bei einer kalkulierten Gegenströmung von 0,85 m/s erst ab Windstärken von mehr als 6 Knoten realisierbar. Stromaufwärts war bei optimalen Verhältnissen der 87,1 km lange betrachtete Flussabschnitt theoretisch in 2–3 Tagen zu bewältigen. Die Zeiten waren nur zu erreichen, wenn keine Flusshindernisse oder ungünstige Strömungsverhältnisse vorlagen, welche mittels Treideln oder Staken zu überwinden waren. Wie sich zeigte, verringerte hierbei der Einsatz des Rahsegels bei guten Windverhältnissen mit etwa 3 Knoten aus östlicher Richtung die Reisezeiten der Militärschiffe um ca. 16 Stunden. Mit Hilfe des Rahsegels wurde somit ein deutlicher Zeitgewinn erreicht, was auch erheblich zur Entlastung der Ruderer beigetragen haben dürfte. Dies setzte allerdings auch voraus, dass die Handhabung des Segels unter den ständigen Kurswechseln auf einem mäandrierenden Flussverlauf effektiv umsetzbar war. Wie die Ergebnisse zeigen, war der Einsatz des Rahsegels deutlich mehr als nur ein unterstützender Hilfsantrieb.

Stellte sich die Hauptwindrichtung jedoch durchgehend aus nordwestlichen Richtungen (270–337,5 Grad) ein, blieb nur noch Muskelkraft und die Strecke musste ausschließlich durch Rudereinsatz zurückgelegt werden. Die Reisezeit betrug für den untersuchten Streckenabschnitt dann mindestens 35 Stunden bei einer Reisegeschwindigkeit von 2,5 km/h.

Simulierte Reisezeiten flussabwärts

Flussabwärts konnte für den rund 87,1 km langen Untersuchungsabschnitt, bei einer südwestlichen Hauptwindrichtung (180–270 Grad), eine Reisezeit von durchschnittlich 7 Stunden ($\pm 1,5$ h) ermittelt werden (Abb. 14a).

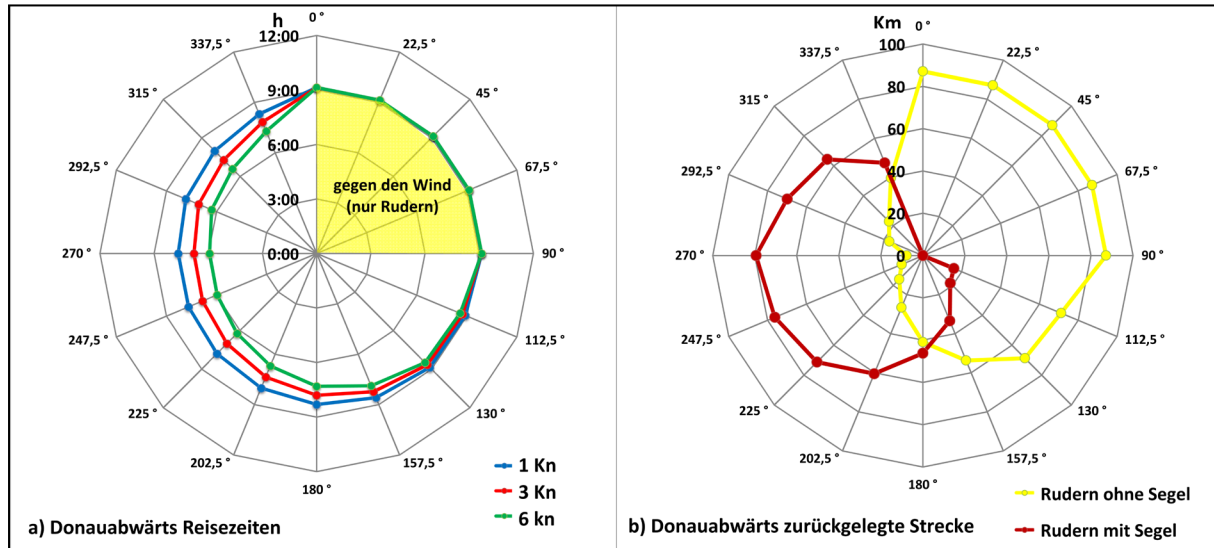


Abb. 14: Berechnete Reisezeiten und zurückgelegte Entfernungen bezogen auf Windrichtung und Windstärke (donauabwärts) für den untersuchten Streckenabschnitt von 87,1 km (Verf.). a) zeigt die erreichten Fahrzeiten von 6–9 Stunden in Abhängigkeit zu den Windrichtungen von 90°–360°. b) zeigt die zurücklegbare Ruderstrecke mit oder ohne Segeleinsatz. Beispiel: Kommt der Wind mit 112,5° aus Süden, können 71 km der Strecke mit Hilfe des Rahsegels und 16 km ohne Segel (nur Rudern) zurückgelegt werden.

Die erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit betrug bei Windstärken von 1–6 Knoten zwischen 10–14 km/h über Grund (Tab. 1). Bei anhaltend guten Windverhältnissen und unter dem Einsatz einer routinierten Rudermannschaft dürfte die rund 87,1 km lange Flusstrecke von Stepperg bis zur Weltenburger Enge mit Unterstützung der Strömung in gut einem Tag zu schaffen gewesen sein. Dabei war der Einsatz des Rahsegels, unabhängig von der Windstärke, für die Reisezeit flussabwärts nicht so bedeutend, da sich Rudergeschwindigkeit und Fließgeschwindigkeit der Donau summieren und der Segelantrieb, gegenüber flussaufwärts, nur mehr einen unterstützenden Beitrag leisten konnte. Trotzdem wird die Besegelung auch flussabwärts für die Ruderer eine spürbare Entlastung gewesen sein. Deutlich geringere Fahrzeiten mit ca. 6,5 Stunden dürften bei einer Windstärke von 6 Knoten aus südwestlicher Richtung erzielt worden sein. Mittels Besegelung und gleichzeitigem Rudereinsatz konnten bei passenden Winden bis zu knapp 85% der Strecke bewältigt werden (Abb. 14 b). Für den restlichen Streckenverlauf lag der Bootskurs im Wind, so dass zur schnellen Fortbewegung wiederum der Ruderbetrieb entscheidend war. Solch optimale Bedingungen mit aus Südwest vorherrschenden Windsituationen dürften allerdings lediglich an ca. 70 Tagen im Jahr vorgelegen haben (Abb. 11).

Treideln und Staken

Bei der Bewältigung des fluvialen Systems musste vor allem flussaufwärts mit einer Reihe von Unwegsamkeiten gerechnet werden, welche die Fahrzeiten deutlich verlängern konnten. So konnte mit dem Rahsegel nur schlecht am Wind gesegelt werden, was bei den beengten Spielräumen und den

hierfür erforderlichen Manövern (Kreuzen) sowieso schwer zu bewerkstelligen war. Der mäandrierende Fluss zwang immer wieder zu Richtungsänderungen und zum ständigen Setzen und Bergen des Segels. Zusätzlich spaltete sich das Flussbett immer wieder in zahlreiche, sich ständig verändernde Arme mit unterschiedlichen Strömungsverhältnissen auf. Hinzu kam, dass je nach Vegetationsbedeckung der Flussaue mit wechselnden Windrichtungen und Verminderung der Windgeschwindigkeiten gerechnet werden musste. Ein Hauptproblem dürften jedoch ungünstige Strömungsverhältnisse, insbesondere bei extremem Niedrigwasser, aber auch bei Hochwasser, dargestellt haben.

Wenn ein Schiff aufgrund schwieriger Verhältnisse nicht mehr zu rudern war oder wenn es aufgrund von Windstille kein Vorwärtskommen mehr gab, musste es mittels Treideln oder Staken bewegt werden. Zum Treideln³² war neben Zugpersonen oder –tieren auch immer ein Pfad oder Weg und ein mehr oder minder freies Ufer nötig.³³ Das mühsame Treideln wurde vermutlich von einem Teil der Besatzung übernommen. Für die kleinen und wendigen Lusoriae muss das Staken eine gute Alternative zum Treideln dargestellt haben, sofern die Geschwindigkeit der Gegenströmung nicht zu groß wurde.

Zunächst stellt sich jetzt die Frage, ob und wie das Treideln bzw. Staken in das Berechnungsmodell integriert werden kann. Hierfür mussten gewisse Annahmen hinsichtlich der Rahmenbedingungen gemacht werden, da bislang keine belastbaren Erfahrungswerte vorliegen. So wurde unterstellt, dass auf ca. 10 % der untersuchten Flussstrecke ungünstige Strömungsverhältnisse, vorwiegend innerhalb der engen Flussschleifen auftreten, welche ein Treideln oder Staken erforderlich machten. Im Berechnungsmodell wurde für diesen Fall, für die kurzen Flussabschnitte (Segmente < 350 m), eine fiktive Geschwindigkeit von 0,60 m/s ohne Ruder- und Segeleinsatz einkalkuliert. Diese Geschwindigkeit ist durchaus denkbar, wenn man davon ausgeht, dass beim Schieben und Ziehen durch Menschenkraft eine Geschwindigkeit von ca. 2–2,5 km/h (= 0,5–0,7 m/s) erreicht werden kann. Bei entsprechenden Versuchen mit einem rekonstruierten römischerzeitlichen Prahm auf der Mosel konnten für das Treideln vergleichbare Geschwindigkeiten von 1,8 Knoten (0,9 m/s) und für das Staken 1,5 Knoten (0,77 m/s) erreicht werden.³⁴ Das berechnete Ergebnis ist überraschend eindeutig und ergab für die untersuchte Gesamtstrecke bei mittleren Windstärken von 3 Knoten, lediglich eine Fahrzeiterhöhung von bis zu 2 Stunden. Der Schluss liegt nahe, dass auch das Treideln oder Staken einen entscheidenden Beitrag zur Fortbewegung leisten konnte, wobei diese im Vergleich zur sonstigen Fahrt nur geringfügig langsamer gewesen sein dürfte.

Zusammenfassung

Durch die Rekonstruktion der antiken Wasser- bzw. Grundwasserspiegellagen und der räumlichen Verschneidung mit einem nachgearbeiteten Geländemodell wurde ein wassergeprägtes Fluss- und Landschaftsbild geschaffen. Dieses Differenzenmodell ermöglicht es, unter Berücksichtigung einer Reihe von geologischen und hydrogeologischen Datensätzen eine Rekonstruktion des römischerzeitlichen Flusslaufs zu bewerkstelligen. Im Kontext mit archäologischen Fundplätzen wird deutlich, dass nicht nur in römischer Zeit eine angepasste Besiedelung des Donautals gegenüber potenziellen Überschwemmungsgebieten, grundwassernahen Böden oder staunassen Gebieten lebenswichtig war. Der über eine Länge von 87 km rekonstruierte Flussverlauf entspricht einem weitgehend gewundenen

32 Siehe hierzu den Beitrag von P. Reinard in diesem Band (Reinard [2020] – mit weiterer Literatur).

33 Für diesen Abschnitt der Donau ist von einem einigermaßen befestigten Weg und einem freien Ufer ohne Vegetation, nicht auszugehen. Die heute noch erkennbaren Treidelpfade sind vermutlich erst im Mittelalter an dem zunehmend stabileren Flusslauf entstanden. Hinzu kamen seitliche Zuflüsse und Nebengerinne als Störfaktoren.

34 Döpke (2017), S. 11.

bis mäandrierenden Flusscharakter mit einzelnen Nebengerinnen. Der ermittelte Mäandrierungsfaktor von 1,4 liegt deutlich über dem historischen Flussverlauf von 1818 mit einem Faktor von 1,28 und einer Lauflänge von 66 km.

Durch die Verknüpfung der experimentell ermittelten Leistungsdaten der Schiffsnachbauten mit den wirklichkeitsnahen Attributen wie Windverteilung, Bootskurs und Fließgeschwindigkeiten eines rekonstruierten antiken Flusssystemes war es möglich, realitätsnahe quantifizierbare Reisezeiten für eine römische Flussschiffahrt zu simulieren.

Wie die Modellsimulationen ergaben, konnten die Flusskriegsschiffe den 87,1 km lange Flussabschnitt im Untersuchungsgebiet stromaufwärts bei optimalen Windverhältnissen mittels Rudern und Segeln und je nach Windstärke in 13 bis 21 Stunden zurücklegen. Mit einer durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit von 5,5 km/h, war der Abschnitt von Weltenburg bis Stepperg je nach Windverhältnissen theoretisch in 2–3 Tagen zu bewältigen. Der Einsatz des Rahsegels führte bei guten Windverhältnissen zu einem Zeitgewinn von rund 16 Stunden, sofern das Segel angesichts der ständigen Kurswechsel auf einem mäandrierenden Flusslauf effektiv gehandhabt wurde. Für Fahrten unter Segel unterstreichen die Ergebnisse die hohe Bedeutung des Rahsegels als effektivem Zusatzantrieb. Mussten die Schiffe flussaufwärts gegen den Wind fahren, verlängerten sich die Reisezeiten bei durchgehender konstanter Ruderleistung auf mindestens 35 Stunden bei einer Reisegeschwindigkeit von ca. 2,5 km/h. Eine zuverlässige und windunabhängige Alternative stellte flussaufwärts das Treideln oder Staken dar. Die Simulationsberechnungen zeigen, dass sich die Reisezeit, wenn beispielsweise 10 % der Strecke getreidelt oder gestakt werden musste, nur geringfügig um ca. 2 Stunden erhöhte.

Flussabwärts ergeben die Modellberechnungen, dass der untersuchte Streckenabschnitt bei günstigen Windverhältnissen in durchschnittlich 7 Stunden zu bewältigen war. Vor allem unterstützt durch die Fließgeschwindigkeit der Donau konnte unter Ruder eine Reisegeschwindigkeit von 10–12 km/h erzielt werden. Die schnellen und effizienten Patrouillenboote waren somit in der Lage, flussabwärts ihre ganze militärische Überlegenheit auszuspielen und in kürzester Zeit im Einsatzgebiet für Kampfeinsätze zu Verfügung zu stehen. Ausgehend vom Römerkastell Oberstimm konnte bei einer durchschnittlichen Windstärke von 3 Knoten, der Flussabschnitt bis zum Kastell Abusina in Eining mit dem Strom in ca. 4 Stunden oder das ungefähr 90 Flusskilometer entfernte Legionslager in Regensburg in ca. 8 Stunden erreicht werden. Das rund 30 km flussaufwärts gelegene römische Militärlager in Neuburg konnte hingegen erst nach einer Fahrzeit von ca. 6 Stunden erreicht werden.

Die größten Faktoren, welche die Schiffahrt auf der Donau erschwerten oder ganz einschränkten, dürften die Wind- und Wetterverhältnisse sowie Hoch- und Niedrigwasser gewesen sein. Die Ergebnisse stellen somit Annäherungswerte dar, welche je nach örtlichen Verhältnissen gewissen Schwankungen unterliegen. Trotz der Beschwerlichkeiten und Tücken, welche eine Schiffahrt gegen und mit dem Strom mit sich brachte, dürfte der Zeitvorteil gegenüber dem Landweg dennoch außer Frage stehen.

Mit Hilfe der prognosefähigen Modellsimulation können künftige Fragestellungen zu Reisezeiten in der antiken Flussschiffahrt plausibel bearbeitet werden. Im Rahmen der experimentellen Archäologie bestünde nun die Möglichkeit durch realitätsnahe Versuche auf vergleichbaren Flusssystemen zukünftig neue Erkenntnisse erzielen, um das Berechnungsmodell zu überprüfen und zu verfeinern.

Literatur

- Aßkamp / Schäfer (2008): R. Aßkamp, C. Schäfer (Hg.), Projekt Römerschiff, Nachbau und Erprobung für die Ausstellung 2000 Jahre Varusschlacht, Hamburg 2008.
- StMWIVT (2010): Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (2010), Bayerischer Windatlas, München 2010.
- Brechtel / Schäfer / Wagener (2016): F. Brechtel, C. Schäfer, G. Wagener (Hg.), Lusoria Rhenana ein römisches Schiff am Rhein, Hamburg 2016.
- Döpke (2017): A. Döpke, „Zur Leistungsfähigkeit antiker Prahme: Auswertung erster Treidelversuche mit einer Prahmrekonstruktion nach Funden aus Bevaix/Neuchâtel in der Schweiz“, in: H. Walle (Hg.): Über die Kimm – Maritime Themen. Jahrbuch der Deutschen Gesellschaft für Schiffahrts- und Marinegeschichte e.V. 19, Bonn 2017, S. 8–18.
- Gerlach (2006): R. Gerlach, Holozän: „Die Umgestaltung der Landschaft durch den Menschen seit dem Neolithikum“, in: J. Kunow – H. Wegner (Hg.), Urgeschichte im Rheinland, Köln 2006, S. 87–96.
- Glaser (2008): R. Glaser, Klimageschichte Mitteleuropas. 1200 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen, Darmstadt 2008.
- Günther / Wawrzyn (2013) H. M. Günther, A. C. Wawrzyn, Roman warship project <https://roemerschiff.readthedocs.io> (zuletzt abgerufen am 29-04-2020).
- Hofmann (2000): S. Hofmann Geschichte der Stadt Ingolstadt. Von den Anfängen bis 1505, Ingolstadt 2000.
- Jerz / Schmidt-Kale (1999): H. Jerz, H. Schmidt-Kale, Geologische Karte von Bayern 1:25 000 Blatt Nr. 7234 Ingolstadt mit Erläuterungen, München 1999.
- Jerz / Peters (2002): H. Jerz, M. Peters, Flussdynamik der Donau bei Ingolstadt in vorgeschichtlicher, geschichtlicher und heutiger Zeit, mit Ergebnissen zur Landschafts- und Vegetationsentwicklung, in: Rundgespräche der Kommission für Ökologie 24, München 2002, S. 95–108.
- Peters / Jerz / Küster (2002): M. Peters, H. Jerz, H. Küster, Entwicklung und Wandel einer Flusslandschaft (Donautal bei Ingolstadt) seit der letzten Eiszeit. Arbeitskreis Vegetationsgeschichte der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft. 12. Jahrestreffen vom 25. – 28. Oktober 2002 in Greifswald, 14.
- Schmitt (1797): J. H. v. Schmitt, von Schmitt'sche Karte von Südwestdeutschland vom Jahre 1797. Freudenstadt 1797.
- Näßl (2016): H. Näßl, Grabungsbericht Baugebiet „Am Kirchsteig“ der Stadt Ingolstadt Ortsteil Hagau, Pro Arch Prospektion und Archäologie GmbH, Am Nordbahnhof 23, 85049 Ingolstadt.
- Zbinden (2011): E. Zbinden, Das Magdalenen-Hochwasser von 1342 – der „hydrologische Gau“ in Mitteleuropa, in: Wasser Energie Luft – Eau Energie Air 103,3, S. 193–203.

Abbildungs-/ Tabellennachweise

Abb. 1: Basisdaten Geländemodell SRTM-GDEM ©NASA 2009; Graphik: Stadt Ingolstadt (U. Arauner).

Abb. 2–5, Abb. 7–8, Abb. 11–14: U. Arauner.

Abb. 6: Foto Pro Arch, Ingolstadt.

Abb. 9: Foto W. Huppertz.

Abb. 10: Graphik A. C. Wawrzyn.

Autorenkontakt³⁵

Uwe Arauner

Ingolstädter Kommunalbetriebe AöR
Wasserwirtschaft und Grundwassermanagement
Hindemithstraße 30
D – 85057 Ingolstadt

uwe.arauner@in-kb.de

³⁵ Die Rechte für Inhalt, Texte, Graphiken und Abbildungen liegen, wenn nicht anders vermerkt, bei dem Autor. Alle Inhalte dieses Beitrages unterstehen, soweit nicht anders gekennzeichnet, der Lizenz CC BY 4.0.