



Modellierung antiker Wasserversorgungssysteme

Ein Kostenpfad-Methodenvergleich am Beispiel des
römischen Carnuntum

Masterthesis

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

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

eingereicht von

Christopher Vadeanu, BA MA

GutachterIn:
Dr. Christian Neuwirth

Wien, Mai 2026

Eidesstattliche Erklärung

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

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

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

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

(Digitale) Unterschrift einfügen



(Christopher Vadeanu, MA)

Danksagung

An erster Stelle ist neben meinem Betreuer Dr. Christian Neuwirth auch dem Österreichischen Archäologischen Institut (ÖAI), insbesondere Dr. Christian Gugl zu danken. Dr. Neuwirth stand mir immer mit konstruktiver Kritik und Rat zur Seite und begleitete mich mit großem Engagement bei der Erstellung der vorliegenden Masterarbeit. Das ÖAI stellte mir die notwendigen Daten zur Verfügung, ohne die diese Arbeit nicht hätte entstehen können.

Dank möchte ich auch der Abteilung für Hydrologie und Geoinformation – NÖGIS der NÖ Landesregierung ausrichten, die mir ihre digitalen Geländedaten zur Verfügung gestellt hat.

Abschließend gilt mein Dank auch meinen Eltern, die immer an mich geglaubt und mich nach besten Möglichkeiten unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
Römische Wasserleitungen	1
Stand der Forschung und methodische Lücken	2
Problemstellung und Forschungsfrage	4
Operative Teilschritte	5
Forschungsgebiet	6
Carnuntum	6
Bekannte Wasserleitungen	8
Wasserleitungen der Zivilstadt	9
Wasserleitung für die Militärstadt	10
Der Große Kanal	10
Methode und Daten	12
Datengrundlage	12
Software und Arbeitsumgebung	14
Interpolation und Maskierung moderner Infrastrukturen	15
Least Cost Path Methodenvergleich	16
Berechnung basierend auf Hangneigung/Steigung	18
Berechnung basierend auf Abtrag- und Auffüllungsoperationen (englisch Cut and Fill)	21
Validierung der Ergebnisse	29
Sensitivitätstests	30
Ergebnisse	31
Methodenvergleich	31
Wasserleitung a	33
Wasserleitung b	36
Wasserleitung c1	38
Wasserleitung c2	40
Wasserleitung c3	42
Wasserleitung d1	44
Wasserleitung d2	46
Wasserleitung e	48

Wasserleitung h.....	50
Zusammenfassung des Methodenvergleichs	52
Höhen- und Steigungsprofile der Methoden D, E und G im Vergleich zu den ursprünglichen Wasserleitungen	54
Sensitivitätstests (Überprüfen).....	57
Methode G	57
Methode E	65
Zusammenfassung der Sensitivitätsanalysen (Methode G und Methode E)	68
Fallbeispiel – Der „Große Kanal“	69
Diskussion.....	71
Grenzen der Topografie und historische Veränderungen.....	71
Allgemeine Grenzen von LCP-Modellen	72
Vergleich der Methoden A–G	74
Methoden basierend auf Hangneigung/Steigung	75
Methoden basierend auf Abtrag- und Auffüllungsoperationen.....	76
Ergebnisse der Validierung	78
Höhen- und Steigungsprofile	78
Sensitivität und Parametrisierung	80
Vergleich mit anderen Studien	81
Einordnung in moderne Infrastrukturplanung.....	83
Fallbeispiel – Großer Kanal	83
Fazit	85
Literatur.....	87
Anhang.....	95
Zusammenfassung.....	104
Abstract.....	105

Einleitung

Für die Stabilität und Weiterentwicklung menschlicher Gesellschaften war das Gewinnen von Wasser und die nachhaltige Wasserbewirtschaftung von zentraler Bedeutung. Jede Gesellschaft nutzt Wasser im Einklang mit ihren kulturellen Traditionen und sozialen Bedürfnissen, wobei das System des Wassermanagements dabei stets in engem Zusammenhang mit kulturellen Praktiken steht (Orengo & Alaix, 2013).

Bereits in der Übergangszeit von der Jagd- und Sammelwirtschaft zur sesshaften Landwirtschaft wurden einfache Brunnen und Hohlrinnen eingesetzt, um Quellwasser in Häuser und Gehöfte zu leiten (Ertl & Leitner, 2023, Bd. 1, S. 3). Diese urgeschichtliche Wasserversorgung zeigt eine lange Tradition und diente als Vorbild für die antiken Bauprojekte von eindrucksvollen Aquädukten, welche teilweise noch bis heute die Landschaft prägen.

Römische Wasserleitungen

Römische Wasserleitungen¹ stellten technisch anspruchsvolle Infrastrukturelemente dar und dienten dabei nicht nur der Versorgung mit Trinkwasser. Aquädukte waren als Großbauprojekte auch Ausdruck römischer Ingenieurkunst (Sürmelhindi et al., 2023). Über die Wasserversorgung großer Städte wie Pergamon oder Rom sind wir durch archäologische Grabungen und zeitgenössische Berichte gut informiert (Ertl & Leitner, 2023, Bd. 1).

Teilweise verliefen Wasserleitungen in stadt- und talnahen Bereichen unterirdisch. Diese konnten aber auch, wie erwähnt, über Brücken, in gemauerten Kanälen oder offenen Gräben geführt werden. Leitungen, besonders unterirdische, sind heute häufig nur fragmentarisch erhalten. Oft wurden sie auch modern überbaut oder durch landwirtschaftliche Nutzung zerstört (vgl. Crapper et al., 2022; Grewe, 2016; Kessener, 2022). Eine Rekonstruktion solcher fragmentarisch erhaltenen Abschnitte ist dabei sehr anspruchsvoll und verdeutlicht die Notwendigkeit digitaler Methoden zur Analyse der Trassen.

Die römischen Ingenieure planten den Bau von Wasserleitungen anhand umfassender Geländebegehungen und vermaßen das Gelände mit unterschiedlichen Instrumenten, wie Chorobat, Diopter und Groma. Auf Basis dieser Daten wurden Gesamtpläne erstellt und das

¹ Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe Aquädukt und Wasserleitung synonym verwendet. Jene Wasserleitungen, die mit einer Brücke über ein Tal geführt werden, werden als Aquäduktbrücken bezeichnet.

Bauvorhaben in Bauabschnitte unterteilt (vgl. Deming, 2020; Grewe, 2016). Besonders die archäologische Untersuchung an der Kölner Wasserleitung (Grewe, 2016) gibt einen Einblick in die systematische Planung solcher Großprojekte.

Die Topografie spielt aber auch in einem anderen Bereich eine entscheidende Rolle. Mittels eines notwendigen Mindestgefälles floss das Wasser von der Quelle bis zum Ziel nur allein durch die Schwerkraft. Historische Quellen geben unterschiedliche Werte an. Während Vitruv (*De architectura* VIII, 8,6,1) ein $\frac{1}{2}$ Fuß je 100 Fuß Länge erwähnt, was umgerechnet etwa 0,5 % sind, erwähnt Plinius Extrembeispiele mit lediglich $\frac{1}{4}$ Zoll auf 100 Fuß, was einem Gefälle von nur rund 0,02 % entspricht (*Naturalis historia* XXXVI). Archäologische Befunde zeigen eine große Spannweite zwischen 0,02 % und 1,24 % Gefälle (vgl. Cech 2010, S. 18; Hodge, 2002, S. 347-348).

Stand der Forschung und methodische Lücken

Römische Wasserleitungen werden großteils in der Forschung durch archäologische Befunde, historischen Quellen und digitalen Methoden, wie Lidar-Daten oder Luftbilderanalysen im GIS, erforscht. Die meisten der verwendeten Ansätze ermöglichen zwar die Untersuchung von Gefälle, Höhenlagen, Leitungslängen und technisch realisierbaren Routen, ermöglichen aber an sich keine Modellierung unbekannter Leitungssysteme (vgl. Crapper et al., 2022; Doneus et al., 2013; Neubauer et al., 2018).

Die Dokumentation von Wasserleitungen ist jedoch, ähnlich wie die Kartierung alter Verkehrswege oft schwierig. Häufig sind nur punktuelle archäologische Befunde vorhanden, die insbesondere für unterirdische Leitungen nur eingeschränkte Informationen über den tatsächlichen Verlauf liefern. Um solche Informationen zu erhalten, müssen großflächige Prospektionen oder Grabungen durchgeführt werden. Wenn das Untersuchungsgebiet nicht klar eingegrenzt ist, können archäologische Kampagnen oft zeitaufwendig, teuer und nicht zielgerichtet sein (vgl. Conyers, 2023; Gaffney & Gater, 2003; Doneus, 2013). Auf Grund der Kosten werden GIS-Analysen und algorithmische Methoden bei der Modellierung von Trassen immer wichtiger, um dadurch ein potenzielles Untersuchungsgebiet einzugrenzen.

So ist es nicht verwunderlich, dass sich in der Archäologie Least-Cost-Path-Methoden (LCP) bereits seit längerer Zeit als nützliche Werkzeuge zur Rekonstruktion von Routen und Netzwerken herausgestellt haben. Des Weiteren ist es möglich, bekannte Strecken hinsichtlich

ihrer Erreichbarkeit mit diesen Methoden zu charakterisieren (vgl. Doneus, 2013; Herzog, 2020; Klammer, 2023). Die LCP-Methoden wurden zwar ursprünglich für Verkehrswege entwickelt, können jedoch auch zur Analyse von Wasserleitungstrassen genutzt werden. Denn auch Wasserleitungen folgen, genauso wie Straßen, der Geländetopografie, da für den schwerkraftbasierten Transport über lange Strecken ein Mindestgefälle erforderlich ist.

Trotz ihrer Bedeutung finden in der Forschung zu antiken Aquädukten Least-Cost-Path-Methoden selbst bislang noch kaum Anwendung. Obwohl GIS-Analysen mittlerweile weit verbreitet sind, dienen die meisten dieser Anwendungen primär der kartografischen und topografischen Analyse sowie der manuellen Plausibilitätsprüfung. Algorithmische Pfadfindung und Kostenanalysen, etwa mittels LCP, werden bislang kaum bei der Untersuchung römischer Wasserleitungen eingesetzt. Dabei wird LCP in der modernen Infrastrukturplanung regelmäßig bei der Planung von Pipelines, Straßen, Versorgungsleitungen und Energieinfrastrukturen genutzt um dadurch Routen, unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Kosten, wie zum Beispiel Hangneigung, Bodenbeschaffenheit und weiteren Faktoren, zu planen (vgl. Gajghate & Mirajkar, 2020; Jain et al., 2021; Kang & Lee, 2017; Makrakis et al., 2024).

Mehrere Studien zeigen auf, dass historische Quellen, archäologische Befunde, GPS und digitale Geländemodelle (DEM) bereits zur Rekonstruktion antiker Wasserleitungsverläufe genutzt werden. Keine davon führen aber Untersuchungen mittels LCP-Modellierung durch. Maktav et al. (2009) führten GPS-Feldstudien durch und kombinierten diese mit Satellitendaten, um die Topografie und Landnutzung des Einzugsgebiets des Valens-Aquädukts in Konstantinopel zu erfassen. Ward et al. (2017) kombinierten archäologische Funde, historische Quellen und topografische Beobachtungen, um plausible Funktionsrouten der Hadrianischen und Valens-Leitung zu rekonstruieren. Ruggeri et al. (2017) verwendeten GIS, DEM-Daten und Feldaufnahmen, um die Höhenlinien nachzuzeichnen und die geländefolgenden Routen des Valens-Aquädukts detailliert zu modellieren. Eine ähnliche Methode wurde auch beim römischen Aquädukt von Knossos verwendet. Kelly und O'Neill (2023) rekonstruierten die Wasserleitung auf Knossos anhand unterschiedlicher archäologischer und historischer Quellen und integrierten diese in einer GIS-Umgebung. Dadurch konnten sie anhand dieser Daten streckenweise den Verlauf der Leitung nachbilden und bestehende Abschnitte besser interpretieren. Auch das Aquädukt von Brigetio wurde über

Geländemodellierung und durch zerstörungsfreie archäologische Untersuchungen rekonstruiert (Simon & Rupnik, 2023). LCP-Methoden kommen aber weder bei der Forschung in Knossos noch in Brigetio zum Einsatz obwohl Simon und Rupnik (2023) in ihrer Arbeit den potenziellen Mehrwert von LCP für zukünftige Studien betonen. Trotz dieses hohen Wertes für die Rekonstruktion von römischen Wasserleitungen werden LCP-Modellierungen nur selten in der Forschung berücksichtigt.

Als einer der wenigen Anwendungen von LCP-Methoden kann die Untersuchung des römischen Wassersystems von Barcino (heutiges Barcelona) von Orengo und Miró (2011) genannt werden. Um das Wasserversorgungssystem teilweise zu rekonstruieren, verwendeten die Autoren aber neben LCP-Methoden auch noch weitere historische und archäologische Quellen, um diese über unterschiedliche GIS-Methoden zu interpretieren. Dabei betonen Orengo und Miró (2013), dass LCP-Analysen vor allem als exploratives Werkzeug genutzt werden sollte und auch andere Hilfsmittel notwendig sind, um eine Wasserleitung zu untersuchen.

Einige neuere GIS-gestützte LCP-Ansätze zur Modellierung potenzieller Leitungsverläufe, wie beispielsweise die Untersuchungen zu den römischen Aquädukten von Sparta (Kramer, 2025), sind bisher nur als Konferenzbeiträge erschienen und wurden noch nicht vollständig peer-reviewed veröffentlicht. Darüber hinaus wurde die LCP-Methode auch auf andere historische Wasserbauwerke angewandt, die zwar keine römischen Aquädukte darstellen, aber methodisch relevant sind (vgl. Schmidt et al., 2018) und zeigen, dass Least-Cost-Path-Ansätze gut für die rekonstruktive Modellierung historischer Wasserbauwerke geeignet sind.

Problemstellung und Forschungsfrage

In der bisherigen Forschung wurden römische Wasserleitungen hauptsächlich durch ein Zusammenspiel topografischer, hydraulischer und archäologischer Analysen untersucht. Eine geeignete algorithmische Methode für eine Modellierung des Verlaufs von Leitungstrassen mittels Kostenminimierung fehlt bisher weitgehend. Dadurch muss die Forschung bislang auf kostenintensive Geo-Prospektionen oder Grabungen zurückgreifen.

Die vorliegende Untersuchung formuliert daher die Hypothese, dass römische Wasserversorgungsleitungen und -kanäle nach dem Prinzip der Kostenminimierung konstruiert wurden, wobei Vermessungstechniken wie Chorobat und andere Bauhilfen eine

präzise Umsetzung ermöglichen und die Schwerkraft optimal für den Wassertransport genutzt wurde (Ertl & Leitner, 2023, Bd. 1; Margeta, 2023). Zur Überprüfung dieser Annahme wird untersucht, wie gut sich Least-Cost-Path-Methoden, parametrisiert über Hangneigung und Erdbewegungsaufwand, zur Rekonstruktion bzw. Modellierung römischer Wasserleitungen eignen.

Operative Teilschritte

Die methodische Umsetzung der Arbeit erfolgt im Rahmen eines GIS-gestützten Ansatzes und gliedert sich in mehrere operative Teilschritte:

1. Rekonstruktion des prämodernen Geländes
Interpolation und Bereinigung des digitalen Höhenmodells (DEM) zur Entfernung moderner anthropogener Strukturen.
2. Integration archäologischer Wasserleitungen
Bekannte römische Wasserleitungen, aus Grabungen und Prospektionen, werden in das rekonstruierte DEM integriert. Dabei dienen diese als Validierungsstrecken für die Modellierung.
3. Modellierung und Vergleich unterschiedlicher Least-Cost-Path-Ansätze
Anwendung und Gegenüberstellung mehrerer LCP-Methoden (u. a. hangneigungs-basierte Kostenmodelle sowie Cut-and-Fill-Ansätze) auf die ausgewählten Teststrecken.
4. Wahl der bestgeeigneten Methode
Auf Basis der Ergebnisse des Vergleichs wird diejenige Least-Cost-Path-Methode ausgewählt, die die bekannten Wasserleitungen am besten reproduziert und auf Basis von Plausibilität überzeugt. Jene Methode dient als Grundlage für die weiteren Analysen.
5. Sensitivitätsanalyse der Modellparameter
Untersuchung der Auswirkung variierender Kostenparameter auf die resultierenden Trassen.
6. Anwendung auf eine hypothetische Wasserleitung
Evaluierung eines hypothetischen römischen Wasserleitungsverlaufs unter Verwendung des bestgeeigneten Modellansatzes. Als Fallbeispiel dient eine bislang nur vermutete Wasserleitung innerhalb des Untersuchungsgebiets.

Forschungsgebiet

Um die aufgestellte Hypothese zu überprüfen, werden Least-Cost-Path-Methoden in Kombination mit anderen geoinformatischen Analysen eingesetzt, die es ermöglichen, potenzielle Leitungsverläufe basierend auf der Topografie bzw. dem Gefälle zu modellieren. Eine quantitative Bewertung erfolgt im Vergleich der Ergebnisse mit archäologisch und geophysikalisch nachgewiesenen Wasserleitungen. Als Untersuchungsgebiet wurde Carnuntum ausgewählt, da hier mehrere römische Wasserleitungen unterschiedlicher Bauweise und Trassenführung bekannt sind und deren Verlauf durch Ausgrabungen und großflächige geophysikalische Prospektionen ausführlich nachgewiesen werden können.

Carnuntum

Carnuntum zählt zu den bedeutendsten urbanen Zentren des römischen Donauraums und nahm innerhalb der Provinz Pannonia superior eine Schlüsselstellung als Militär-, Verwaltungs- und Wirtschaftszentrum ein. Die antike Stadt liegt im heutigen östlichen Niederösterreich südlich der Donau und umfasste neben dem Legionslager und der Zivilstadt (municipium) weitläufige suburbane Siedlungszonen (vgl. Doneus et al., 2013; Ertl & Leitner, 2023, Bd. 2; Humer, 2014).

Bekanntheit erhielt Carnuntum unter anderem aufgrund der Wichtigkeit als archäologische Fundstätte und bietet durch Ausgrabungen und Rekonstruktionen, wie zum Beispiel dem Freilichtmuseum, aufschlussreiche Erkenntnisse über das Leben und die Struktur einer römischen Stadt. Besonders die modernen Methoden der Luftbildarchäologie und geophysikalischen Prospektionen ermöglichen einen Einblick in die städtische Ausdehnung (vgl. Neubauer et al, 2018). Dadurch liegt für Carnuntum eine außergewöhnliche dichte Datengrundlage zur Rekonstruktion der antiken Infrastruktur und Siedlungsentwicklung vor (vgl. Wallner et al 2021a).

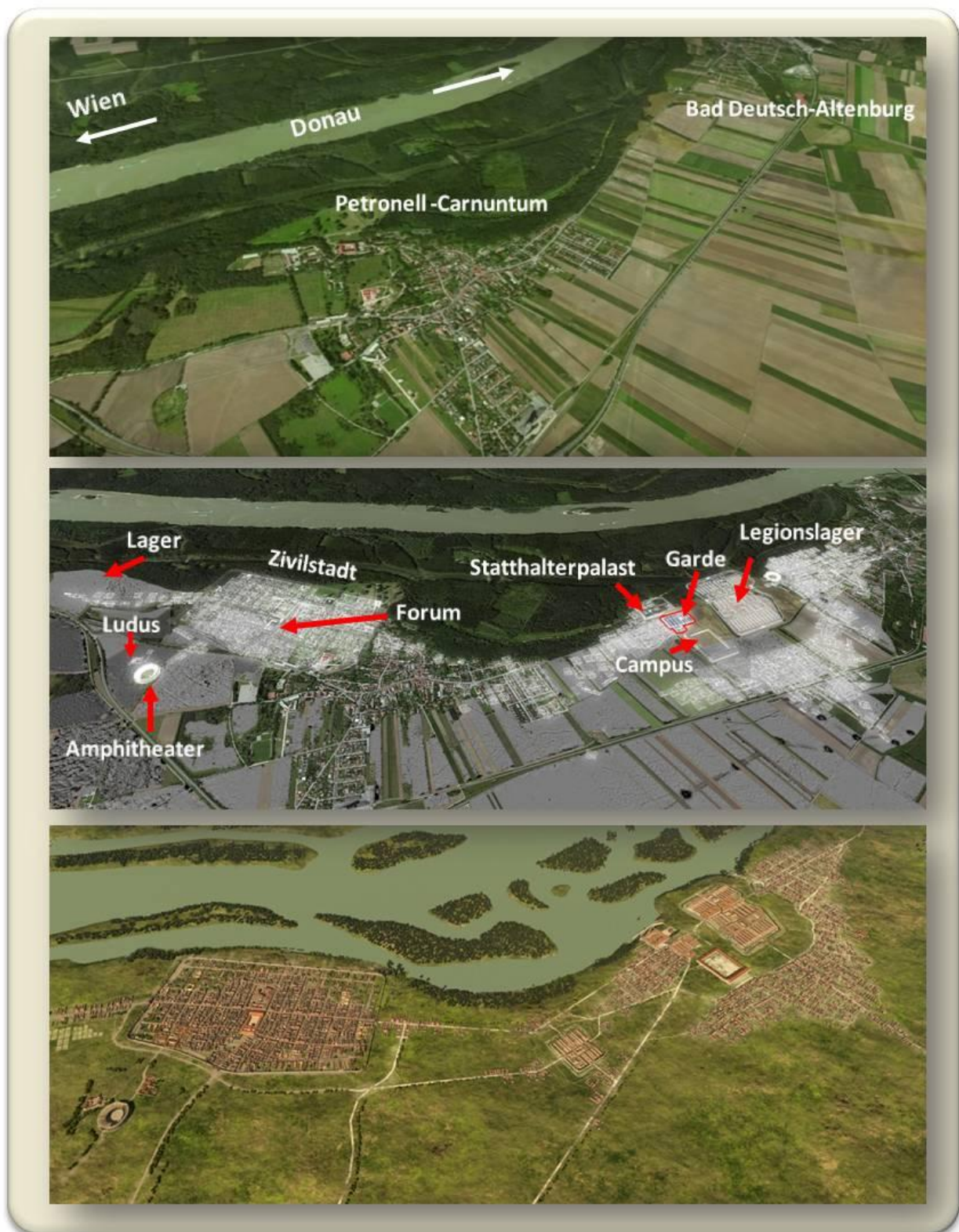


Abbildung 1: Römisches Carnuntum erstreckt sich über mehr als 10km², am orographisch rechten Ufer der Donau.

Oben: aktuelle Ansicht des Gebietes; Mitte: vollständige geomagnetische Prospektion des Gebietes mit den wichtigsten Entdeckungen. Unten: virtuelle Rekonstruktion. (Quelle: © 7reasons / IKAnt / LBI ArchPro; <https://scienceblog.at/die-zerst%C3%B6rungsfreie-vermessung-der-r%C3%B6mischen-provinzhauptstadt-carnuntum> [Stand 17.01.2026])

Bekannte Wasserleitungen

Ein besonders gut erforschtes und zugleich aussagekräftiges Forschungsgebiet stellt dabei die Wasserversorgung der römischen Stadt dar. Die Stadt wurde durch ein komplexes System aus mehreren Leitungen unterschiedlicher Größe, Funktion und Bauzeit täglich mit frischem Wasser versorgt. Archäologische Untersuchungen belegen, dass sowohl die Zivilstadt als auch ihre suburbane und militärische Umgebung durch ein verzweigtes Netz aus Fern- und Verteilleitungen erschlossen war. Das System entwickelte sich über mehrere Jahrhunderte hinweg und passte sich stets an die städtischen, funktionalen und militärischen Anforderungen an (vgl. Ertl & Leitner, 2023, Bd. 2; Konecny et al., 2021; Wallner et al.; 2021a, b).

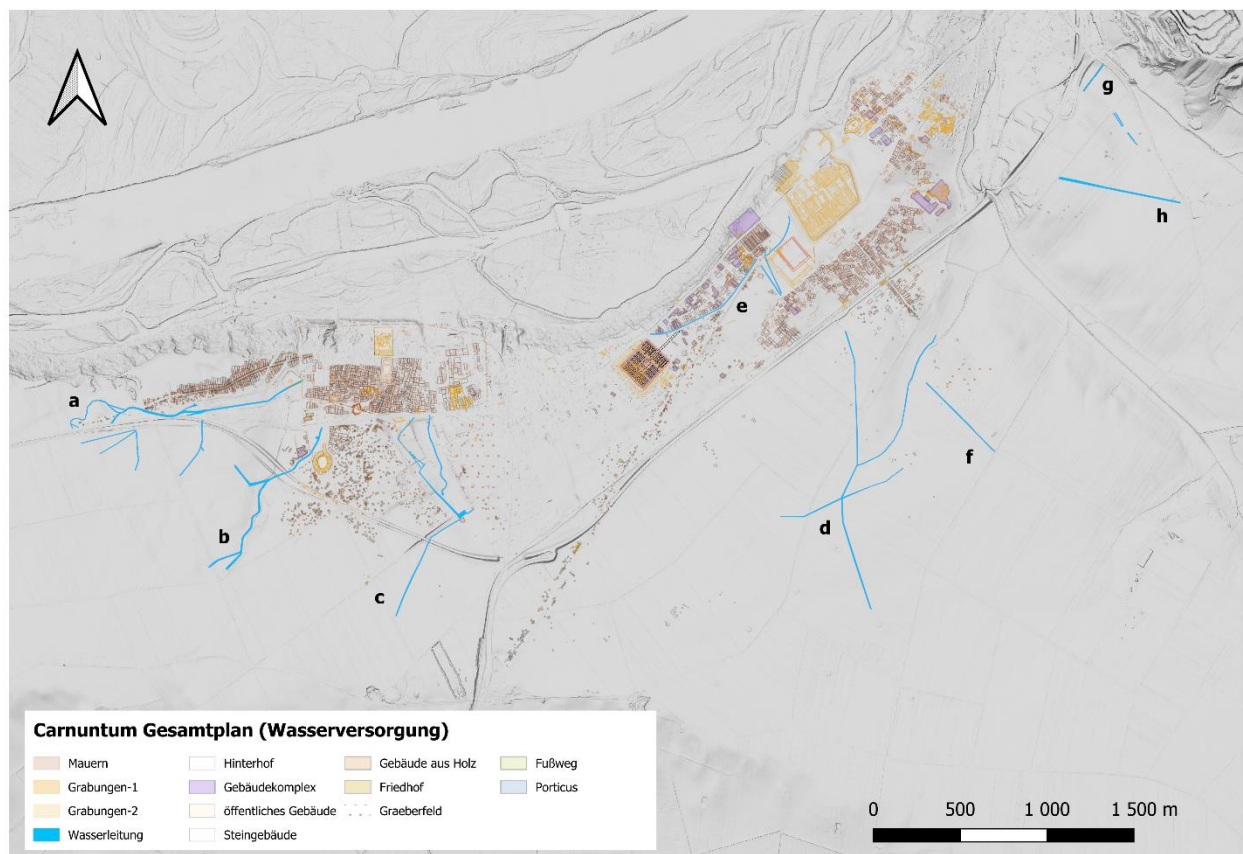


Abbildung 2: Wasserversorgung des Carnuntiner Legionslagers, der *canabae legionis* und der Zivilstadt: Gesamtplan mit Kartierung der Wasserbauten (blaue Linien). a: Aquädukt in der Flur Gstettenbreite, b: Zuleitung zwischen Gladiatorenschule und Amphitheater II, c: Wasserleitung vom Quellgebiet bei Petronell (Sportplatz), d: Solafeld-Leitung, e: Wasserleitung in den westlichen *canabae*, f: Wasserleitung im Bereich der Südnekropole, g: Aquäduktbrücke westlich des Pfaffenbergs, h: weitere als Wasserleitung interpretierte Struktur.

Wasserleitungen der Zivilstadt

Die Zivilstadt von Carnuntum wurde von 3 Wasserleitungen, welche gut aus den Prospektionsdaten identifiziert werden konnten, versorgt (vgl. Neubauer et al., 2018; Teichmann et al., 2022).

Aquädukt in der Flur Gstettenbreite

Die zentrale Wasserversorgung der Zivilstadt Carnuntum erfolgte über eine mäandrisch verlaufende Hauptwasserleitung (Abb. 2, a), die aus westlicher Richtung in das Stadtgebiet führt. Die Leitung stellt die leistungsfähigste und bislang am besten dokumentierte Wasserzufuhr dar und wurde im späten 2. oder frühen 3. Jahrhundert n. Chr. errichtet (Konecny et al., 2021). Sie wurde im Bereich des westlichen Vorfeldes von mehreren Sammelkanälen gespeist und trat durch die Gstettenbreite in das Stadtgebiet ein. Im Bereich des westlichen Suburbiums unterquerte die Leitung die römische Limesstraße und trat unter der Stadtmauer in das Gebiet der Zivilstadt ein, wo sie vermutlich die große Thermenanlage mit Wasser versorgte (Wallner et al., 2021a). Archäologisch ist diese Hauptwasserleitung größtenteils als unterirdisch geführtes Aquädukt mit tonnengewölbten Freispiegelkanal nachgewiesen und erreicht in seinen freigelegten Abschnitten ein Gefälle von 0,8 % (Konecny et al., 2021).

Südwestliche Zuleitung zwischen Gladiatorenschule und Amphitheater II

Eine zweite Wasserleitung (Abb. 2, b) führte aus dem südwestlichen Vorfeld der Zivilstadt nach Norden. Ihr Verlauf ist zwischen der Gladiatorenschule und dem Amphitheater II am besten dokumentiert und teilweise noch heute im Gelände sichtbar. Der vermutlich unterirdisch geführte Kanal trat direkt in den südwestlichen Bereich der Zivilstadt ein und wird als separate Zuleitung interpretiert. Sie versorgte spezifische Funktionsbereiche wie das Amphitheater, infrastrukturelle Bauten und angrenzende Stadtquartiere (Neubauer et al., 2018).

Östliche Wasserleitung vom Quellgebiet bei Petronell (Sportplatz / Quellheiligtum)

Die dritte Wasserleitung (Abb. 2, c) entspringt östlich der Zivilstadt. Sie führte in den östlichen Teil der Stadt, in der Nähe des heutigen Besucherzentrums und hatte ihren Ursprung bei einem Quellgebiet im Bereich des heutigen Sportplatzes von Petronell, wo ein römisches Quellheiligtum lokalisiert, ist (Neubauer et al., 2018).

Wasserleitung für die Militärstadt

Auch für die Militärstadt (*canabae legionis*) ist eine eigenständige Wasserversorgung über Prospektionsdaten und Grabungen nachgewiesen (Wallner et al., 2021b).

Solafeldleitung

Die nord-süd laufende Wasserleitung (Abb. 2, d) auf dem Solafeld, rund 1,5–2,5 km südlich des Legionslagers gelegen, wurde bereits 1895 von Josef Dell ausführlich untersucht. Er dokumentierte eine 1,070 m lange, mit Steinplatten abgedeckte begehbare Wasserleitung, dessen Anfang- und Endpunkte zu diesem Zeitpunkt bereits zerstört waren. Im nördlichen Teil der Leitung wurde von Dell eine von Südwesten kommender Leitungsarm dokumentiert (Doneus et al., 2013). Neubauer et al. (2018) berichten, dass diese Leitung sich im Magnetogramm bis zur Militärstadt verfolgen lässt, wobei weitere bislang unbekannte Zuleitungen erkennbar sind.

Die Wasserleitung in den westlichen canabae

1902 entdeckte Maximilian Groller eine Wasserleitung (Abb. 2, e) nördlich der *canabae*, die aus südwestlicher Richtung auf das Legionslager zulief. Die Lage des dazugehörigen Quellgebiets ist unbekannt. Es wird aber eine Quelle im Osten oder Süden des heutigen Ortsgebiet von Petronell vermutet. (Doneus et al., 2013).

Weitere Wasserleitungen

Im Bereich der Südnekropole, im Nordosten, konnte eine weitere römische Wasserleitung (Abb. 2, f) erkannt werden (Neubauer et al., 2018). Zudem finden sich Nachweise einer Aquäduktbrücke (Abb. 2, g) am Nordabhang des Pfaffenberges, welche sich über neun punktförmige Trockenmarker identifizieren lässt (Doneus et al., 2013). Darüber hinaus findet sich eine weitere lineare Struktur ca. 0,6 km südlich des Pfaffenberg-Aquädukts. Sie wurde von den beteiligten Forschern bereits als zusätzliche Wasserleitung (Abb. 2, h) interpretiert. Obwohl diese Leitung in der bisherigen Literatur nicht im Detail beschrieben ist, lässt sie sich in den vom ÖAI bereitgestellten GIS-Daten klar nachvollziehen. Jene Wasserleitung verläuft in Südost-Nordwest Richtung zwischen der Bundesstraße 9 und der Landstraße 167.

Der Große Kanal

Der sogenannte „Große Kanal“ ist ein hypothetischer Kanal, der das Legionslager mit Wasser versorgt haben könnte. Bereits in den frühen 1900er Jahren wurde dieser vom Archäologen Eduard Nowotny in Betracht gezogen. Nedelik und Petznek (2017) greifen diese Vermutung

auf und analysieren das mögliche Gefälle und den vermuteten Verlauf. Ihr Ursprung wird an derselben Quelle wie die südwestliche Zuleitung zwischen Gladiatorenschule und Amphitheater II in der Nähe des Schlosses Petronell vermutet. Von hier ausgehend soll der Kanal in West-Ost-Richtung verlaufen sein und ein Gefälle von rund 0,4 % aufweisen. Der Kanal wurde aber bislang nicht systematisch untersucht und wird auch von den Autoren als rein hypothetisch beschrieben. Nedelik und Petznek stützen ihre Vermutung rein auf historische und archäologische Notizen und einzelnen Trassenpunkte, die eventuell einer Wasserleitung zugeordnet werden können. Die Frage, inwieweit ein solcher Kanalverlauf möglich ist, wird im Rahmen der Modellierung mit der ausgewählten LCP-Methode als Fallbeispiel analysiert.



Abbildung 3: Karte mit nummerierter Lage der Trassenpunkte des hypothetischen „Großen Kanals“. (Quelle: Nedelik & Petznek, 2017, Abb. 23, auf Basis NÖ Atlas © Land Niederösterreich).

Methode und Daten

Datengrundlage

Die digitale Datengrundlage dieser Arbeit bildet ein hochauflösendes digitales Geländemodell (DEM) mit einer räumlichen Auflösung von 1×1 m. Dieses Höhenmodell dient als primärer Datensatz für die Ableitung topografischer Parameter sowie für die Modellierung potenzieller Aquäduktrouten mittels Least-Cost-Path-Analysen. Ergänzend werden lineare Verkehrsinfrastrukturen aus OpenStreetMap herangezogen, insbesondere Straßen- und Eisenbahnlinien, um Bereiche moderner anthropogener Geländeänderungen zu identifizieren und in der Modellierung zu berücksichtigen. Darüber hinaus werden vom Österreichischen Archäologischen Institut (ÖAI) bereitgestellte GIS-Daten verwendet, welche kartierte archäologische Strukturen und Befundumzeichnungen umfassen und großteils im Rahmen archäologischer Geoprospektionsmaßnahmen und Grabungen erhoben wurden. (vgl. Abb. 2). Die dokumentierten Wasserleitungen der Zivilstadt, des Legionslagers sowie des umliegenden Siedlungsraums dienen dabei als Testpfade zur Bewertung der Modellgüte und als Referenzdatensatz, um unterschiedliche Least-Cost-Path-Methodiken mit realen, historischen Leitungsverläufen zu vergleichen. Um die Anwendbarkeit einer LCP-Methode im Kontext wasserwirtschaftlicher Infrastruktur zu vergleichen, erfolgt die Auswahl der römischen Leitungstrassen von Carnuntum exemplarisch anhand neun ausgewählter Abschnitte. Es werden sowohl vollständige Leitungsverläufe als auch Teilabschnitte berücksichtigt um so Leitungen unterschiedlicher Länge, Trassenführung und topografischer Rahmenbedingungen abzudecken.

Die östliche Wasserleitung der Zivilstadt (Abb. 2, c) wird aufgrund ihrer unterschiedlichen Teilabschnitte nicht als homogener Verlauf behandelt, sondern in drei räumlich voneinander abgegrenzten Abschnitten unterteilt (Abb. 2, c1-3) und umfasst einen südlichen Ausgangsbereich und zwei mittlere Transiträume. Auch die sogenannte Solafeldleitung (Abb. 2, d) wird in zwei getrennte Teststrecken gegliedert, da die Leitung aus mehreren räumlich separaten Leitungsabschnitten besteht (Abb. 2, d1-2). Die der Solafeldleitung unmittelbar benachbarte Leitung (Abb. 2, f) wird nicht in die Testdatenauswahl einbezogen, da ihre topografische Rahmenbedingung weitgehend mit der Solafeldleitung übereinstimmt. Stattdessen wird eine weiter entfernte Strecke (Abb. 2, h) berücksichtigt, um ein breiteres

Spektrum abzudecken. Die mögliche Aquäduktbrücke (Abb. 2, g) wird aufgrund ihrer sehr geringen Länge und fehlender Aussagekraft nicht mit einbezogen. Als Überbrückung eines Geländeeinschnittes liefert sie kaum relevante topografische Informationen für eine LCP-Modellierung, da die Leitungsführung an dieser Stelle nicht primär durch das Gelände, sondern durch bauliche Elemente bestimmt wird.

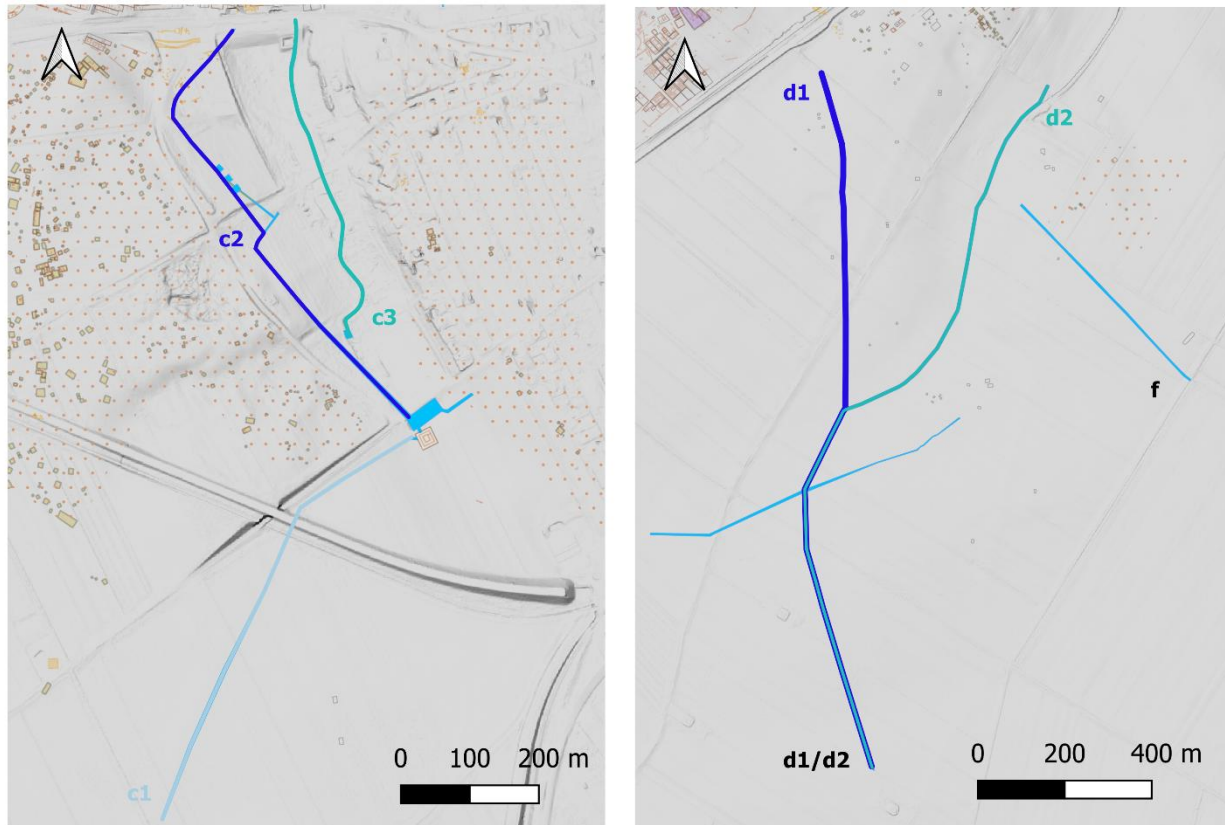


Abbildung 4 Detaildarstellung der in Teilabschnitte zerlegten Teststrecken. Links: östliche Wasserleitung der Zivilstadt mit den Teilabschnitten c1–c3. Rechts: Solafeldwasserleitung mit zwei getrennten Teststrecken (d–d1 und d–d2). Die dargestellte Leitung f wurde in der Analyse nicht einbezogen. Eine Übersicht aller untersuchten Leitungstrassen sowie die zugehörige Legende sind in Abb. 2 dargestellt.

Neben den hier detailliert dargestellten Leitungen werden auch die Wasserleitungen a, b, e und h (vgl. Abb. 2) als vollständige Verläufe in die Testdatenauswahl einbezogen.

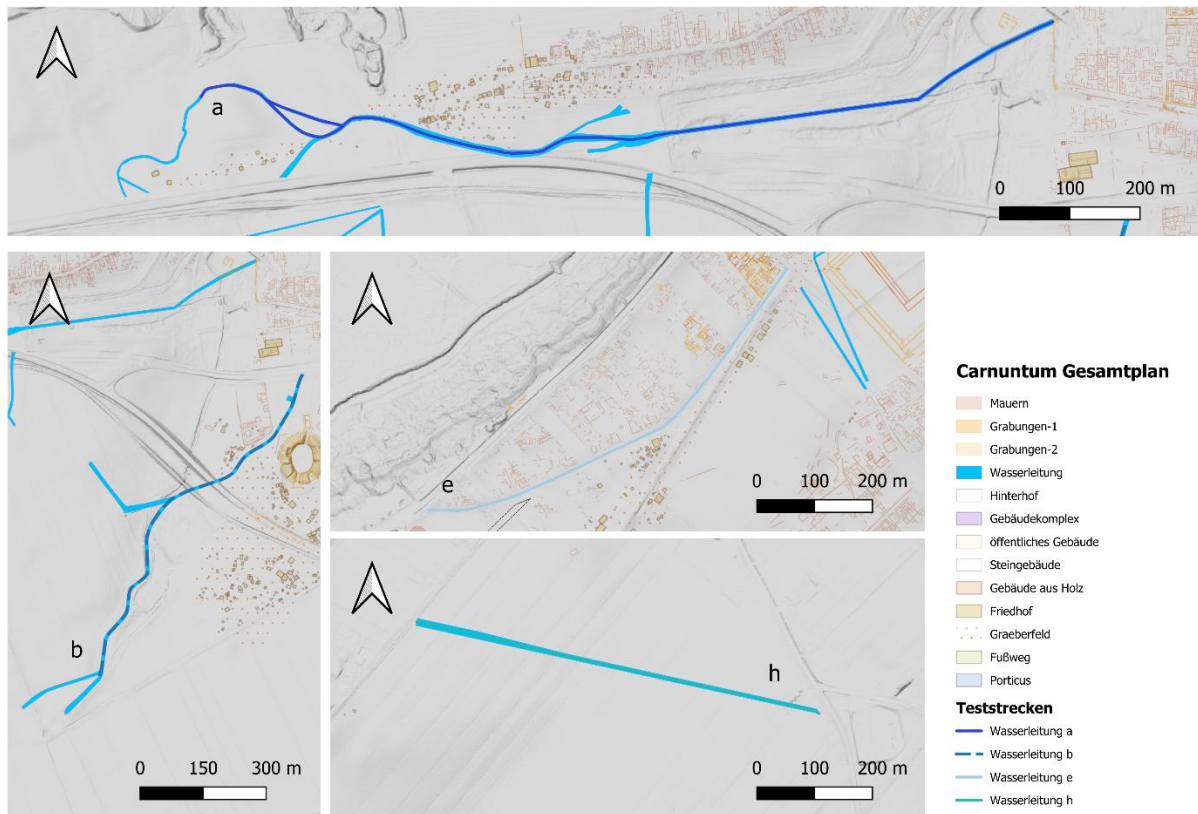


Abbildung 5 Detailansicht der als Teststrecken berücksichtigten Wasserleitungen a, b, e und h

Sämtliche Daten werden in einem einheitlichen Koordinatensystem (EPSG:31256 - MGI / Austria GK East) verarbeitet und in einer GIS-Umgebung für die weiteren Analyseschritte vorbereitet und visualisiert.

Für die Analyse werden zusätzlich die Höhenprofile (Meter) und Steigungsprofile (%) der bekannten Wasserleitungen (A–H) mithilfe des Profile Tool-Plugins in QGIS extrahiert. Darüber hinaus werden die Trassen mit dem Plugin Road Slope Calculator in 150 m lange Segmente unterteilt, um minimale, maximale, mittlere sowie mediane Steigungswerte für die spätere Interpretation zu berechnen.

Software und Arbeitsumgebung

Alle Daten dieser Arbeit werden in einer GIS-Umgebung (QGIS 3.42.2 „Münster“) verarbeitet und analysiert. Für Aufgaben wie Datenaufbereitung, Least-Cost-Modellierung und Validierung kommen Python-Skripte (Python 3.10.18) zum Einsatz, wobei ChatGPT-5 und Microsoft Copilot teilweise bei der Skripterstellung, Optimierung von Code-Strukturen und der Entwicklung effizienter Analyse-Routinen unterstützten. Dabei kommen zur Unterstützung der Datenverarbeitung und Modellierung Bibliotheken für numerische Berechnungen (numpy,

scipy) und Geodatenverarbeitung (geopandas, shapely, rasterio, osgeo.gdal) zum Einsatz. Die Netzwerkstrukturen für Least-Cost-Pfade werden mittels networkx 3.4.2 modelliert, während Module für Dateiverwaltung, algorithmische Hilfsmittel und Fortschrittsanzeigen (os, pathlib, tempfile, shutil, heapq, functools.partial, threading, time, tqdm) den Workflow unterstützen. Dadurch wird eine effiziente, flexible und reproduzierbare Verarbeitung der Daten für die nachfolgenden Analysen potenzieller Aquädukttrassen ermöglicht.

Interpolation und Maskierung moderner Infrastrukturen

Zur Annäherung an ein historisches Geländemodell werden zunächst lineare Elemente (Straßen und Schienen) aus OpenStreetMap herangezogen. Die Vorgehensweise orientiert sich an *Schmidt et al. (2018)*, die ein ähnliches Verfahren für die Rekonstruktion prämoderner Gelände entwickelt haben. Dabei werden Straßen- und Eisenbahnstrukturen extrahiert und mit individuellen Pufferzonen versehen, um den räumlichen Einfluss moderner anthropogener Geländeänderungen abzubilden. Die einzelnen Pufferzonen werden zuerst zu einer Gesamtebene zusammengeführt, die als Maske zur Identifikation anthropogen beeinflusster Bereiche dient. Dabei werden die Schienenlinien, genau wie in der Arbeit von *Schmidt et al. (2018)*, mit einem Puffer von 20 m und die Straßen mit 15 m erweitert. Auf dieser Grundlage werden sämtliche, durch moderne Infrastruktur geprägten Zellen, aus dem digitalen Geländemodell (DEM) entfernt, wodurch eine perforierte Datenschicht entsteht.

Die verbleibenden, unbeeinflussten Geländepunkte werden anschließend interpoliert, um die entstandenen Lücken zu schließen. Hierfür kommt ein mehrstufiges B-Spline-Interpolationsverfahren (vgl. Smith et al. 2018, S. 120; Burrough & McDonnell, 2005) zum Einsatz. Dieses erzeugt eine glatte und kontinuierliche Höhenoberfläche. Um eine vollständige Datenbasis für weitere Analysen vorzubereiten, werden verbleibende NoData-Zellen mit dem Median der gültigen Höhenwerte aufgefüllt. Das vervollständigte Höhenmodell wird anschließend mittels eines Lowpass Gaussian Filter, ($\sigma = 1,2$) geglättet (vgl. Bruker, 2010; Esri, 2025; SAGA GIS, 2025; Maucher, 2024). Auf diese Weise wird eine saubere Grundlage für die nachfolgenden Least-Cost-Path-Analysen zur Modellierung von Aquädukttrassen geschaffen.

Das interpolierte Höhenmodell wird, anders als bei Schmidt et al. (2018), nicht separat validiert, da es ausschließlich als abgeleiteter Eingangsdatensatz für die Least-Cost-Path-

Analysen dient. Ziel der Interpolation ist nicht die exakte Rekonstruktion historischer Geländehöhen, sondern die gezielte Reduktion moderner Geländeeinschnitte entlang heutiger Verkehrswege, welche aufgrund ihrer kostengünstigen Linienführung die Modellierung potenzieller Aquäduktrouten beeinflussen können. Anstelle einer Bewertung der Modelle werden nur die abgeleiteten Leitungspfade auf ihre Nachvollziehbarkeit überprüft, da diese den zentralen Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit bilden.

Least Cost Path Methodenvergleich

Für die Analyse der besten Methode für die Modellierung der Wasserleitungen werden unterschiedliche Ansätze miteinander verglichen. Die Pfadberechnung erfolgt dabei immer auf Basis eines gerichteten Graphen, der aus dem DEM abgeleitet wird. Jede Rasterzelle des DEM wird als Knoten übertragen, wobei jede Zelle über Kanten zu den jeweils benachbarten Zellen im Umfeld gemäß der angegebenen Fenstergröße verbunden wird (vgl. Moving-Window-Ansatz). Bei einem 3x3-Fenster entspricht dies einer klassischen 8-Nachbarschaft, während größere Fenster eine erweiterte Nachbarschaft abbilden. Durch diese Erweiterung können weiter entfernte Zellen berücksichtigt werden (Baek & Choi, 2017).

Die Gewichte der Kanten werden dabei dynamisch während dem Aufbau des Graphen berechnet und basieren in den einfachsten Fällen auf der Geländeneigung. Zunächst werden Least-Cost-Modellierungen auf Basis der Hangneigung berechnet. Dabei wird das Höhenmodell unter anderen in Steigungsklassen eingeteilt, um die Kosten zu gewichten. Um zu analysieren, wie sich die Geländeglättung auf die Routenwahl auswirkt, kommen unterschiedliche Fenstergrößen des Moving-Window-Ansatzes zum Einsatz, zum Beispiel 3x3 oder 9x9.

Ein Moving-Window (auch Sliding-Window) ist ein definiertes Rasterfenster, das über das gesamte Raster verschoben wird, um auf Basis der Werte in der Nachbarschaft eine fokale Statistik zu berechnen. Für jede Position des Fensters werden alle Rasterzellen innerhalb dieses Fensters identifiziert und eine Operation angewendet. Das Ergebnis der Operation wird dann der zentralen Zelle im Ausgabe-Raster zugeordnet. Anschließend wird das Fenster verschoben, um auf die benachbarte Zelle zu zentrieren. Typischerweise ist dabei das Fenster rechteckig und 3x3 groß, kann aber auch auf einen größeren Bereich erweitert werden (Dastrup 2020; Ren et al., 2024).

Parallel zu den einfachen auf der Hangneigung basierten Methoden werden auch Methoden verglichen die ihre Kosten über Cut/Fill-Modellierungen berechnen. Auch hier werden unterschiedliche Fenstergrößen berücksichtigt, um das Netzwerk aufzubauen.

Der so aufgebaute Kostengraph bildet die Grundlage für die anschließende Least-Cost-Path-Berechnung mittels des Dijkstra-Algorithmus (Dijkstra 1959), die zur Ermittlung der jeweils günstigsten Verbindung zwischen Start- und Zielpunkt verwendet wird. Dabei werden alle mögliche Pfadalternativen im Graph berücksichtigt und ein global optimaler Least-Cost-Path identifiziert (Kantner 2012; Lock & Pouncett, 2010).

Der Dijkstra-Algorithmus wird von den meisten Softwares zur Least-Cost-Path-Analyse benützt, auch wenn nicht explizit erwähnt (Lock & Pouncett, 2010), und setzt ein gewichtetes Graph mit ausschließlich positiven Kantengewichten voraus. Das kann nur durch die Verwendung einer Kostenfunktion, die nicht-negative Werte liefert, gewährleistet werden (Cormen, et al., 2001, S. 595-599; Herzog, 2010, 2016). In Python-Bibliotheken wird hierfür unter anderem die Funktion *abs()* verwendet, um den Absolutwert einer Zahl zurückzugeben. So kann sichergestellt werden, dass Zahlen immer nur positive Vorzeichen aufweisen (Python Software Foundation, 2025, *abs*).

Der Dijkstra-Algorithmus wird von der Bibliothek NetworkX als eigene Implementierung über der Funktion *networkx.dijkstra_path(G, source, target, weight='weight')* zur Verfügung gestellt. *G* repräsentiert den gewichteten Graphen, *source* und *target* jeweils die Start- und Zielknoten. Der Parameter *weight* gibt an welches Kantenattribut als Gewicht verwendet wird (NetworkX Developers 2025)

In archäologischen Studien werden insbesondere drei Methoden zur Schätzung der Kosten für die Fortbewegung verwendet: einfache Funktionen, Zeitaufwand und Energieaufwand. (Herzog, 2014, 2016, 2020, 2021) Formeln zur Berechnung der Gehzeit, wie Tobler's Hiking Formel (Tobler, 1993), werden im Methodenvergleich nicht berücksichtigt. Diese Ansätze sind für die Analyse von Wegen und Fußpfaden entwickelt worden, während in dieser Arbeit Kanal-beziehungsweise Aquädukttrassen untersucht werden. Das Fließverhalten von Wasser lässt sich nicht über die Gehgeschwindigkeit einer Person im Gelände definieren. Für die Wasserführung ist vielmehr ein leichtes kontinuierliches Gefälle erforderlich.

Berechnung basierend auf Hangneigung/Steigung

Die Berücksichtigung der Hangneigung, beziehungsweise Steigung, ist ein entscheidender Faktor bei der Modellierung von Kanal- und Aquädukttrassen in topografischen Landschaften. Für die Berechnung von LCP-Werten in Abhängigkeit von der Steigung ist eine Kostenfunktion erforderlich, die einem Weg mit gegebener Länge und Steigung Kosten zuordnet (Herzog 2014). Die Erstellung einer Hangneigungskarte (englisch Slope) ist ein wesentlicher erster Schritt in der Kostenanalyse. Diese Karte bildet die Grundlage für die anschließende Berechnung der zusätzlichen Energie- oder Kosteneinflüsse, die durch die Neigung des Geländes entstehen. In Fall der vorliegenden Arbeit wird die Hangneigung für jeden Rasterpunkt einzeln ermittelt. Hierfür wird die Differenz der Höhenwerte zwischen der aktuellen Zelle und einer benachbarten Zelle im DEM herangezogen. Genauer gesagt wird die absolute Differenz der Höhenwerte berechnet:

$$\text{Hangneigung} = |\text{elev_from} - \text{elev_to}|$$

wobei:

- elev_from den Höhenwert der aktuellen Zelle darstellt, der aus dem DEM mittels eines gleitenden Fensters (z.B. 3x3 oder 9x9 Rasterzellen) extrahiert wird, und
- elev_to der Höhenwert der benachbarten Zelle im Betrachtungsbereich ist.

In der Implementierung wird anhand eines Fenstermittelpunkts formuliert:

$$\text{elev_from} = \text{dem_windows}[i,j][\text{half_win}, \text{half_win}]$$

$$\text{elev_to} = \text{dem_windows}[i,j][dy, dx]$$

wobei:

- i,j die Koordinaten des aktuellen Pixels im Raster sind,
- dem_windows[i,j] das Fenster um den aktuellen Punkt
- half_win die Hälfte der Fenstergröße angibt,
- dy, dx die Verschiebung in y- und x-Richtung zu der benachbarten Zelle sind.

Die Höhendifferenz zwischen der aktuellen Zelle und dessen Nachbar bildet die Basis für die weitere Berechnung der Hangneigung, die anschließend zur Abschätzung der Bewegungskosten verwendet wird.

Aufbauend auf der berechneten Hangneigung werden spezifische mathematische Funktionen, mit unterschiedlichen Ansätzen, angewandt. Diese Ansätze berücksichtigen sowohl isotrope als auch anisotrope Effekte.

Methode A

Eine sehr bekannte und einfache Kostenformel (Herzog 2014), die auf einem physikalischen Modell für aufsteigende und abfallende Hänge basiert, wurde von Bell und Lock (2000) entwickelt. Sie verwenden eine vereinfachte isotrope Funktion zur Abschätzung der Energiekosten anhand der Hangneigung in Grad, diese ursprünglich nur für Wege entwickelt wurde. Dabei werden die Kosten in Abhängigkeit der Steigung $\hat{s}$ (in Grad) durch folgende Formel bestimmt:

$$\text{Cost}(\hat{s}) = \tan(\hat{s})/\tan(1^\circ)$$

Dadurch leiten sich die relativen Kosten aus dem Verhältnis ihrer Tangente zur Tangente von 1° ab und führt dazu, dass die Energiekosten bei steilem geneigtem Terrain im Vergleich zum leicht geneigten Terrain ansteigen (van Leusen 2002, Kap. 6, S. 6).

Methode B

Im Gegensatz zur isotropen Methode von Bell und Lock (2000) wurde, vorgestellt von van Leusen (2002, Kap. 6, S. 6) eine anisotrope Kostenfunktion von Hayden entwickelt, welche sowohl Auf- als auch Abstieg berücksichtigt, um ein kumulatives Wegenetz zwischen den Standorten in Italien zu generieren (van Leusen 2002, Kap. 6, S. 6). Er modifiziert frühere Überlegungen in dem er bergauf volle Kosten und bergab halbe Kosten zuweist. Haydens Funktion wurde erstmals von van Leusen vorgestellt:

$$\text{Cost}(s) = s/10 \text{ if } s > 0, \text{Cost}(s) = |s|/20 \text{ if } s \leq 0, \text{ with } s = \text{per cent slope}$$

Bei der Formel werden positive Werte (bergauf) durch Division durch 10 gewichtet, negative Werte (bergab) durch Division durch 20. Damit wird ein unterschiedlicher Energieaufwand für die Richtung modelliert.

Methode C

Silvia Polla (2009) entwickelte in ihrer Untersuchung zu unterschiedlichen Streckenverläufen im Umfeld des Stadiasmos von Patara ein vereinfachtes Modell, welches rein die positive

Steigung berücksichtigt. Dabei testet Polla mehrere lineare Kostenfunktionen deren Struktur wie jene Formel beschrieben werden kann:

$$\text{Cost}(s) = p \cdot s + k$$

Dabei wird die Steigung s in Prozent angegeben. Die Ergebnisse von Pollas Untersuchung zeigen, dass die Wahl der Parameter einen erheblichen Einfluss auf die resultierenden Wege hat. Die mit den Parametern $p=1$ und $k=1$ erzielten LCP-Ergebnisse kommen dem bekannten Verlauf einer römischen Straße am nächsten (Herzog 2014). Für die vorliegende Arbeit werden die Parameter (p und k) der Einfachheit halber auch auf 1 festgelegt. Weitere Kombinationen werden nicht getestet.

Methode D

Als letzte Methode für die Modellierung von Aquädukttrassen, welche rein die Steigung berücksichtigt, wird eine steigungsbasierte Strafkostenfunktion definiert. GIS-Anwender klassifizieren häufig Attribute neu, um Geodaten für die Analyse vorzubereiten (Murekatete & Shirabe, 2021). Häufig werden auch der Steigung selbst unterschiedliche Klassen, wie zum Beispiel flach, mittel, steil und sehr steil, zugeordnet (Ismail und Kamaruzaman, 2009; Kamrudin et al., 2014). Eine reale Analyse benötigt dabei umgewandelte gewichtete Rasterwerte zu einem realen Bezug zu den tatsächlichen Kosten (Medrana, 2021).

Jede Steigung wird in eine qualitative Eignungsklasse überführt, wobei die Klassen durch die Höhe der Strafkosten repräsentiert werden. Auf diesem Wege wird eine Klassifizierung der Steigungen auf Basis der Literatur vorgenommen und basiert sowohl auf antiken Schriftquellen, insbesondere von Plinius der Ältere und Vitruv (Vitruv, 2019) als auch auf archäologisch ausgewerteten Gefälle von vermessenen Aquädukten (Hodge, 2002, S. 347-348; Konecny et al., 2021). Historische Gefälleangaben werden, sofern notwendig, aus Winkelangaben in technische Steigungsverhältnisse % umgerechnet.

Die Strafkosten $P(s)$ werden als multiplikativer Faktor auf die jeweiligen Kantengewichte angewandt und sind wie folgt definiert:

$$P(s) = \begin{cases} 2.0, & s < 0.007 \\ 1.4, & 0.007 \leq s < 0.0208 \\ 1.2, & 0.0208 \leq s < 0.1 \\ 0.9, & 0.1 \leq s < 0.5 \\ 0.8, & 0.5 \leq s \leq 1.0 \\ 1.0, & 1.0 < s \leq 1.5 \\ 1.2, & 1.5 < s \leq 2.5 \\ 2.0, & s > 2.5 \end{cases}$$

Die Klassifizierung erfolgt anhand definierter Schwellenwerte und unterteilt den Gefällebereich in qualitative Eignungsklassen. Sehr geringe Gefälle, unterhalb des minimalen Schwellenwertes, werden, da sie den kontinuierlichen Wasserfluss gefährden, stark bestraft. Gefälle im Bereich von Vitruv empfohlenen Werten und Gefällebereichen, im funktionalen Optimalbereich, werden dagegen belohnt. Mit zunehmender Steigung oberhalb des Idealbereichs steigen die Kosten erneut an. Dadurch sollen hydraulische Probleme und erhöhte Erosionsgefahr sowie bautechnische Schwierigkeiten berücksichtigt werden, wobei ein fein abgestuftes Strafmodell, welches realistische Aquädukttroutenverläufe berücksichtigt, entstand.

Berechnung basierend auf Abtrag- und Auffüllungsoperationen (englisch Cut and Fill)

Abtrag- und Auffüllarbeit sind genauso wie die Hangneigung und Bodenbeschaffenheit maßgeblich für die Kosten beim Bau von unterschiedlichen Trassen, sei es Eisenbahnlinien, Autobahnen oder Pipelines (Cowen et al., 2000; Sthapit & Mori, 1994). Auch um Unterbrechungen im Wasserfluss möglichst gering zu halten, werden vor hydrologischen Analysen häufig Cut/Fill-Verfahren eingesetzt, um lokale Oberflächenvertiefungen in digitalen Geländemodellen zu beseitigen (Baek & Choi, 2017).

Um die durch Abtrag und Auffüllung entstehenden Geländeänderungen zu erstellen, werden für jede Rasterzelle die Differenz zwischen der bestehenden und der gewünschten Höhe berechnet und jeder Rasterzelle zugeordnet. Ausgehend von der Annahme eines überwiegend unterirdischen Leitungsverlaufs wurden die Kostenparameter so definiert, dass Auffüllungen höher gewichtet sind als Abtrag.

Methode E

Als weitere Methode wird der von Baek und Choi (2017) entwickelte Algorithmus eingesetzt, einer der frühesten Ansätze, der Geländeveränderungen durch Abtragung- und Auffüllmaßnahmen explizit in Least-Cost-Path-Berechnungen integriert. Der Algorithmus ermittelt kostengünstigste Wege, indem er die Geländeneigung mithilfe eines erweiterten Moving Windows berechnet und potenzielle kostengünstigste Trassen anhand der Geländeveränderung mittels Abtrags und Auffüllung (Cut und Fill) bewertet.

Der Algorithmus basiert auf den von Baek und Choi (2017) bereitgestellten Formeln und wird mithilfe generativer KIs in einen eigenen Python Skript implementiert. Die Ausführung erfolgt mittels einer Fenstergröße von 9x9 und einer vorgegebenen Steigungsschwelle von 0,5 %. Beck und Choi (2017) empfehlen in ihrer Arbeit bei kleinen Steigungsschwellen, sprich bei sehr flachem Pfad, in einem komplexen Gelände ein größeres Fenster zu wählen und verwenden in ihrer Studie für eine Neigungsschwelle von 8° ebenfalls ein 9x9 großes Fenster.

Da archäologische Befunde sowohl geringere als auch höhere Längsneigungen römischer Wasserleitungen belegen, wird zusätzlich ein zulässiger Steigungsbereich definiert. Dieser liegt zwischen einer minimalen Längsneigung von 0,05 % und einer maximalen Längsneigung von 1,2 %. Pfadsegmente außerhalb dieses Intervalls werden mit sehr hohen Kosten belegt und somit faktisch ausgeschlossen.

Die Baukosten werden dabei „on the fly“ aus geometrischen Eigenschaften wie Distanz, Höhenunterschied, Erdbewegungsaufwand und Richtungsänderungen entlang zusammenhängender Trassenabschnitte berechnet. Das Gelände wird dabei als kontinuierlicher Raum interpretiert, in dem sich kleine Höhenänderungen entlang der Strecke aufsummieren.

Methode F

Die folgenden Ansätze zur Pfadfindung unterscheiden sich maßgeblich in der Art und Weise, wie die Kosten für eine mögliche Trasse bestimmt werden. Während bei der Methode von Baek und Choi die Kosten einer Bewegung zwischen zwei Rasterzellen dynamisch während der Pfadberechnung ermittelt werden, erfolgt bei den weiteren Ansätzen eine vorherige Berechnung und Speicherung der Kosten für jede Rasterzelle in Form einer statischen Kostenfläche. Dabei werden die Kosten vorab lokal abgeschätzt und Steigungen innerhalb definierter Toleranzen berücksichtigt. Die Richtungsänderungen werden schließlich über

heuristische Strafkosten abgebildet. Hier steht weniger der exakte Bauaufwand einer konkreten Trasse im Vordergrund, sondern die relative Eignung einzelner Geländebereiche für eine mögliche Linienführung. Abbildungen 29-37 im Anhang zeigen die ermittelten Kostenoberflächen der nachfolgenden beschriebenen Varianten A und B. Die Steigungsprofile beschreiben den theoretischen Verlauf des auf Basis eines konstanten Gefälles modellierten Sollverlaufs.

Variante A (globales Gefälle)

Für die Implementierung der Methode F wird ein Python-Skript entwickelt, das sich in grundlegender Struktur an einem unveröffentlichten ArcPy-Skript von Christian Neuwirth (persönliche Mitteilung, 2024) orientiert. Das Skript wird jedoch vollständig für die QGIS-Umgebung umgeschrieben und um mehrere Funktionen erweitert. Dazu gehören eine dynamische Berechnung der Zielhöhe entlang eines historischen Gefälles, die Einführung von Toleranzbereichen für zulässige Abweichungen, eine volumenbasierte Übergangsstrafe sowie flexible Parameter zur Modellierung archäologisch belegter Kanalgefälle. Die daraus resultierende Kostenoberfläche bildet die Grundlage für die anschließende Least-Cost-Path-Analyse.

Mathematische Modellierung der Kostenoberfläche

Das DEM wird dabei als rasterbasierte Höhenfunktion definiert

$$\mathbf{z}: \Omega \subset \mathbb{Z}^2 \rightarrow \mathbb{R}, \mathbf{z}_{i,j} = \text{Geländehöhe der Rasterzelle } (i, j)$$

wobei die räumliche Auflösung durch die Zellkantenlängen Δx und Δy bestimmt ist. Ein festgelegter hydraulischer Referenzpunkt (i_0, j_0) mit der Höhe $z_0 = z_{i_0, j_0}$ dient als Ausgangspunkt der Gefälleprojektion. Davon ausgehend wird das historische Soll-Gefälle als konstanter Neigungswinkel α modelliert und der Höhenverlust ergibt sich aus:

$$\frac{\Delta h}{\Delta s} = \tan(\alpha)$$

Das dadurch beschriebene Gefälle stellt eine theoretische Idealform des Kanals dar, bei der die Kanalsole überall gleichmäßig geneigt ist und keine Rücksicht auf das tatsächliche Gelände nimmt.

Um die Grundlage der Ableitung des theoretischen Höhenverlustes entlang der idealisierten Trasse zu gewährleisten, wird für jede Rasterzelle (i,j) die euklidische Distanz zum Referenzpunkt berechnet.

$$d_{i,j} = \sqrt{((i - i_0)\Delta y)^2 + ((j - j_0)\Delta x)^2}$$

Daraus lässt sich in einem nächsten Schritt die Sollhöhe ableiten, um die Referenzfläche zu definieren, gegen die das bestehende DEM verglichen wird.

$$z_{i,j}^{\text{target}} = z_0 - d_{i,j} \cdot \tan(\alpha)$$

Die topografische Abweichung wird berechnet als:

$$\Delta z_{i,j} = z_{i,j} - z_{i,j}^{\text{target}}$$

Dabei kennzeichnen positive Werte Überhöhungen, welche abgetragen (cut) werden müssen, negative Werte kennzeichnen Unterhöhungen, welche im Folgenden aufgeschüttet (fill) werden müssen.

Da das antike vergebene Gefälle nur als Richtwert anzusehen ist, wird ein relativer Toleranzparameter t eingeführt, wodurch sich akzeptierende Abweichungsgrenzen ergeben.

$$\Delta z_{\min} = \tan(\alpha)(1 - t), \Delta z_{\max} = \tan(\alpha)(1 + t)$$

Liegt die Abweichung innerhalb dieses Intervalls,

$$\Delta z_{\min} \leq \Delta z_{i,j} \leq \Delta z_{\max}$$

wird die Zelle als hydraulisch akzeptabel eingestuft und es wird kein Erdbewegungsbedarf angenommen.

Berechnung von Cut- und Fill-Maßnahmen

Für alle Zellen außerhalb des Toleranzbereichs wird der erforderliche Erdbewegungsaufwand bestimmt. Zur Vermeidung unrealistischer Eingriffe wird eine maximale Eingriffstiefe $h_{\max}$ definiert.

Für Zellen unterhalb der Sollhöhe gilt:

$$h_{i,j}^{\text{fill}} = \min(z_{i,j}^{\text{target}} - z_{i,j}, h_{\max})$$

Für Zellen oberhalb der Soll-Höhe gilt:

$$h_{ij}^{\text{cut}} = \min (\Delta z_{ij}, h_{\text{max}})$$

Geringfügige Überschreitungen werden als „Small Cut“ mit reduziertem Kostenfaktor behandelt, um bautechnisch realistische Übergänge abzubilden.

Dabei ergibt sich das Volumen der Erdbewegung aus:

$$V_{ij} = h_{ij} \cdot A, A = \Delta x \cdot \Delta y$$

Die Kosten pro Rasterzelle werden schließlich proportional zum Erdbewegungsvolumen modelliert:

$$C_{ij} = \begin{cases} c_{\text{base}}, & \text{wenn } \Delta z_{ij} \text{ innerhalb der Toleranz liegt} \\ h_{ij} \cdot c_{\text{earth}}, & \end{cases}$$

und durch einen logarithmischen Übergangsterm geglättet, damit Volumensprünge möglichst gering bleiben:

$$P_{ij} = \log (1 + |V_{ij}|)$$

Das resultierende Kostenraster bildet eine konsistente Grundlage für anschließende Least-Cost-Path-Analysen. Die Bildung des Graphen knüpft, im Unterschied zur ursprünglichen Implementierung von Neuwirt, die auf einer statischen 8-Nachbarschaft basiert, auf die methodische Vorgehensweise von Beak and Choi (2017) an. Auch in der Methode F wird ein gleitender Moving-Window-Ansatz (3x3) verwendet.

Variante B (dynamisches Gefälle)

Variante B basiert, im Gegensatz zu einem globalen Gefälle von einem festen Ursprungspunkt (Variante A) ausgehend, auf ein dynamisches, segmentiertes Gefälle, das sich entlang des Geländes alle acht Zellen aktualisiert. Ziel dieser Anpassung ist es, die abschnittsweise Absteckung und Nivellierung römischer Wasserleitungen besser zu berücksichtigen, bei der das Gefälle nicht als durchgehend globale Größe, sondern lokal zwischen aufeinanderfolgenden Messpunkten festgelegt wird. Dadurch bildet Variante B die historische Baupraxis römischer Wasserleitungen deutlich realistischer ab. Römische Aquädukte wurden nicht mit einem durchgehenden globalen Gefälle geplant, sondern abschnittsweise

eingemessen und lokal an das Gelände angepasst (vgl. Grewe, 2014; Hodge, 1992; Vitruv, 2023). Formal sei ein Intervallparameter $k \in \mathbb{N}$ definiert, der die Segmentlänge steuert.

Für jede Rasterzelle (i, j) gilt:

$$(i_o, j_o) = \begin{cases} (i, j), \\ (i_o, j_o)_{\text{vorher}}, \end{cases} \quad \text{falls } (i + j) \bmod k = 0$$

Die zugehörige Ursprungshöhe ergibt sich zu:

$$z_o = z_{i_o, j_o}$$

Damit wird der Ursprung der Gefälleberechnung abschnittsweise entlang des potenziellen Kanalverlaufs fortgeschrieben und die Distanz relativ zum jeweils aktuellen Ursprungspunkt gemessen. Die Kanalsohle ist somit nicht global linear, sondern stückweise linear definiert und folgt einer lokal angepassten Referenzgeometrie.

$$d_{i,j} = \sqrt{((i - i_o)\Delta y)^2 + ((j - j_o)\Delta x)^2}$$

Daraus ergibt sich die neue Zielhöhe lokal aus dem aktuellen Ursprung, wodurch nicht wie in der Variante A eine globale lineare Referenzgeometrie der Kanalsohle entsteht.

$$z_{i,j}^{\text{target}} = z_o - d_{i,j} \cdot \tan(\alpha)$$

Variante B erweitert das globale Gefällemodell somit um eine segmentierte, lokal referenzierte Ursprungshöhe. Alle weiteren Modellkomponenten, insbesondere die Definition der Toleranzbereiche, die Cut-/Fill-Berechnung sowie die Kostenfunktionen, entsprechen unverändert der in Variante A beschriebenen Methodik.

Methode G

Methode G erweitert Methode F, indem sie die in Variante A (globales Gefälle) und Variante B (dynamisches Gefälle) berechneten Kostenanteile in einer gemeinsamen Kostenfunktion kombiniert. Die resultierende gewichtete Kostenfunktion integriert beide Cut- und Fill-Komponenten als Multiplikation und verknüpft diese mit richtungsabhängigen Strafkosten (Richtungswechselstrafe (turn) und Direktheitsstrafe (dir)).

$$C_{ij} = C_{ij}^A * C_{ij}^B * P_{\text{dir}}(\Delta\theta_{\text{dir}}) * P_{\text{turn}}(\Delta\theta_{\text{turn}})$$

Ziel war es, einerseits eine möglichst direkte Verbindung zwischen Start- und Zielpunkt zu bevorzugen und andererseits unrealistische Zickzack- oder Schleifenbewegungen zu

unterbinden. Grundlage hierfür ist die explizite Modellierung von Bewegungsrichtungen als Winkelgrößen. Die Wahl der endgültigen Kostenfunktion basiert auf einer Reihe systematischer Kombinationstests unterschiedlicher Komponenten-Gewichtungen und Additionsmodelle, darunter auch Varianten wie:

$$C_{ij}^{\text{test}} = (C_{ij}^A + C_{ij}^B) \cdot (0.8 P_{\text{turn}}(\Delta\theta_{\text{turn}}) + 0.2 P_{\text{dir}}(\Delta\theta_{\text{dir}}))$$

die jedoch ausschließlich auf der initialen Teststrecke 1 zufriedenstellende Ergebnisse lieferten und daher nicht in die finale Methodik übernommen werden.

Richtungsabhängige Bewegungskosten

Die Bewegungsrichtung (vgl. Dolinskaya, 2012; Zhang et al., 2025) zwischen zwei benachbarten Punkten x_i und x_j wird als Azimutwinkel θ_{ij} modelliert (Johnson, 2020; Smith et al., 2018). Für eine Bewegung zwischen zwei Punkten, einem Startpunkt und einem Zielpunkt, ergibt sich der Bewegungswinkel folgendermaßen:

$$\theta_{ij} = \left(\arctan2(y_j - y_i, x_j - x_i) * \frac{180}{\pi} + 360 \right) \bmod 360$$

wobei (x_i, y_i) und (x_j, y_j) die kartesischen Koordinaten der beiden Rasterzellzentren darstellen. Der Winkel θ_{ij} ist im Intervall $[0^\circ, 360^\circ]$ definiert.

Als globale Referenzrichtung wird zusätzlich ein Zielwinkel θ_{ziel} definiert, der die direkte Verbindung zwischen dem Startpunkt x_s und dem Zielpunkt x_z beschreibt:

$$\theta_{\text{ziel}} = \left(\arctan2(y_z - y_s, x_z - x_s) * \frac{180}{\pi} + 360 \right) \bmod 360$$

Zur Bestimmung der Abweichung zwischen zwei Richtungen wird der minimale zyklische Winkelunterschied $\Delta\theta$ verwendet wobei eine korrekte Behandlung der Winkelperiodizität, insbesondere im Übergangsbereich zwischen 0° und 360° , gewährleistet wird:

$$\Delta\theta(\theta_1, \theta_2) = \min(|\theta_1 - \theta_2|, 360^\circ - |\theta_1 - \theta_2|)$$

Die beiden winkelbasierten Strafkompontenten, Richtungswechselstrafe als auch Direktheitsstrafe, werden auf dieser Basis eingeführt, um unnötige Umwege bei der Wegfindung zu vermeiden.

Direktheitsstrafen

Die Direkttheitsstrafe (vgl. Dolinskaya, 2013) bewertet die Abweichung der aktuellen Bewegungsrichtung von der idealen Zielrichtung und basiert auf der oben beschriebenen Winkelabweichung:

$$\Delta\theta_{\text{dir}} = \Delta\theta(\theta_{ij}, \theta_{\text{ziel}})$$

Zudem werden die Strafen als konstante Kostenfunktion P_{dir} formuliert, wobei kleine Abweichungen von der Zielrichtung begünstigt und stark vom Ziel wegführende Bewegungen mit hohen Kosten belegt werden.

$$P_{\text{dir}}(\Delta\theta_{\text{dir}}) = \begin{cases} 0.8, & \Delta\theta_{\text{dir}} < 15^\circ \\ 1.0, & 15^\circ \leq \Delta\theta_{\text{dir}} < 30^\circ \\ 1.2, & 30^\circ \leq \Delta\theta_{\text{dir}} < 45^\circ \\ 1.5, & 45^\circ \leq \Delta\theta_{\text{dir}} < 75^\circ \\ 1.8, & 75^\circ \leq \Delta\theta_{\text{dir}} < 90^\circ \\ 2.0, & \Delta\theta_{\text{dir}} \geq 90^\circ \end{cases}$$

Richtungswechselstrafe

Die Richtungsbestrafung (vgl. Jan, 2009; Rodrigue, 2024; Winter, 2000; Zhang & Wang, 2014; Zhou et al., 2025) bewertet die Änderung der Bewegungsrichtung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schritten und bewirkt neben der Verringerung der Wahrscheinlichkeit eines starken Richtungswechsels auch eine lokale Glättung des Pfades bei der Modellierung. Um die Richtung zu bestrafen, wird die Winkelabweichung zwischen der aktuellen Bewegungsrichtung θ_{ij} und einer Referenzrichtung θ_{ref} berechnet:

$$\Delta\theta_{\text{turn}} = \Delta\theta(\theta_{ij}, \theta_{\text{ref}})$$

Die Referenzrichtung beschreibt dabei die bisherige Bewegungsrichtung der Trasse und wird in der vorliegenden Arbeit als Richtungswinkel vom Startpunkt zur aktuellen Position definiert. Die Richtungswechselstrafe P_{turn} ergibt sich wiederum aus einer stückweisen Kostenfunktion:

$$P_{\text{turn}}(\Delta\theta_{\text{turn}}) = \begin{cases} 0.8, & \Delta\theta_{\text{turn}} < 30^\circ \\ 1.0, & 30^\circ \leq \Delta\theta_{\text{turn}} < 45^\circ \\ 1.6, & 45^\circ \leq \Delta\theta_{\text{turn}} < 60^\circ \\ 1.8, & 60^\circ \leq \Delta\theta_{\text{turn}} < 90^\circ \\ 2.0, & \Delta\theta_{\text{turn}} \geq 90^\circ \end{cases}$$

Kleinere Abweichungen sollten niedrige Strafen erhalten und so einen geraderen Streckenverlauf forcieren. Wo hingegen größere Abweichungen, sprich auslaufende Kurven, mit höheren Strafen versehen werden.

Validierung der Ergebnisse

Zur Bewertung der Genauigkeit der mit dem Least-Cost-Path-Modell ermittelten Routen im Vergleich zu den originalen Aquädukttrassen werden alle 9 im Rahmen geophysikalischer Prospektionen gesicherten Wasserleitungen als Teststrecken herangezogen. Dabei wird ein punktwiser Distanzvergleich der Trajektorien durchgeführt (vgl. Tao et al., 2021). Die Trajektorien werden so parametrisiert, dass sie aus der gleichen Anzahl gleichabständig verteilten Stützpunkten bestehen. Als Maß für die Genauigkeit der modellierten Trassen dient die durchschnittliche euklidische Punktdistanz (Lock-Step Euclidean Distance, LSED) und die diskrete Fréchet-Distanz (DFD). Die LSED zeichnet sich als die einfachste Möglichkeit aus, zwei Trajektorien zu vergleichen (vgl. Toohey und Duckham, 2015), sofern sie räumlich synchronisiert und mit gleicher Punktzahl abgebildet sind. Sie vergleicht die räumliche Lage jeweils korrespondierender Punkte beider Trajektorien und berechnet daraus den arithmetischen Mittelwert der euklidischen Distanzen. Auf diese Weise lässt sich unmittelbar quantifizieren, wie stark der modellierte Pfad im Mittel vom tatsächlichen Verlauf abweicht.

Ergänzend wird die diskrete Fréchet-Distanz eingesetzt, um die maximale räumliche Abweichung zwischen den Pfaden zu erfassen. Während die LSED die mittlere Genauigkeit der Modellierung beschreibt, misst die DFD die größte Abweichung entlang des gesamten Verlaufs und berücksichtigt dadurch die Formähnlichkeit der Trajektorien. Sie liefert im Vergleich der Gesamtform ein intuitives Maß für die größte Abweichung zwischen zweier Trajektorien (vgl. Toohey und Duckham, 2015).

Durch die Kombination beider Methoden kann sowohl die durchschnittliche als auch maximale Abweichung bestimmt werden und ermöglicht so eine fundierte Bewertung. Zusammen liefern beide Kennzahlen eine differenzierte Beurteilung der Modellgenauigkeit. Geringe Mittelwerte bei gleichzeitig niedriger Fréchet-Distanz weisen auf eine hohe Übereinstimmung zwischen Least-Cost-Path Ergebnis und Teststrecke hin. Für jede Methode wird der Mittelwert der LSED- und DFD-Werte über alle 9 Teststrecken berechnet. Auf diese Weise lässt sich für jede Methode ein durchschnittlicher Wert für die mittlere und maximale Abweichung vom historischen Trassenverlauf bestimmen. Die so ermittelten Mittelwerte werden anschließend genutzt, um die Methoden miteinander zu vergleichen und die insgesamt am besten geeignete Methode zu identifizieren.

Die im Methodenvergleich am besten abschneidende Modellierungsvariante wird anschließend zur Überprüfung der Hypothese zum Verlauf des sogenannten „Großen Kanals“ eingesetzt.

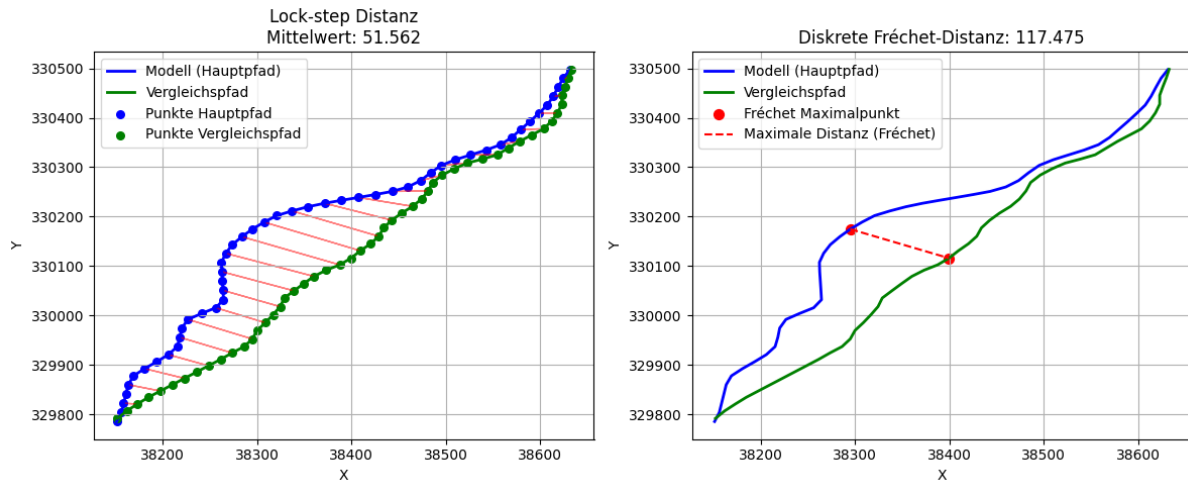


Abbildung 6 schematischen Darstellungen beider Validierungsmaße. Es werden jeweils beispielhaft zwei Strecken für Modell und Wirklichkeit gezeigt.

Sensitivitätstests

Zur Bewertung der Robustheit der Modellparameter, der „besten“ Methode, werden ergänzend Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Eingangsparameter werden dadurch auf ihre Sicherheit bezüglich der Stabilität überprüft. Untersucht werden unterschiedliche Gefällewerte, Fenstergrößen des Moving-Window-Ansatzes, Toleranzschwellen sowie Varianten der Distanzgewichtung zu modernen Straßenstrukturen, jeweils innerhalb eines plausiblen Schwankungsbereichs. Die Bewertung der resultierenden Trassen erfolgt auch hier anhand der Lock-Step-Euclidean-Distance (LSED) und der diskreten Fréchet-Distanz (DFD). Eine detaillierte Darstellung der getesteten Kombinationen und ihrer Ergebnisse erfolgt im Ergebnisteil.

Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten geoinformatischen Modellierungen und Analysen vorgestellt. Die implementierten Least-Cost-Path-Methoden zielen darauf ab, jene Modellierung zu identifizieren, welche die archäologisch nachgewiesenen Wasserleitungen unter Berücksichtigung der Distanzmaße LSED und DFD am besten reproduziert. Die Methoden, die bei der bestvalidierten Modellierung zum Einsatz kommen, werden anschließend für die weiterführende Sensitivitätsanalyse herangezogen. Zusätzlich wird auch eine weitere Anwendung mit dem zweitbesten Gesamtergebnis berücksichtigt. Abschließend werden die Ergebnisse aufgezeigt, die bei der Anwendung der ausgewählten Methode auf den bislang hypothetisch diskutierten Verlauf des Großen Kanals erstellt wurden.

Methodenvergleich

Zur Bewertung der Modellgüte werden im nachfolgenden Kapitel die modellierten Trassen der Methoden A–G mit den archäologisch nachgewiesenen Wasserleitungen verglichen. Die räumliche Übereinstimmung wird anhand der Abbildungen 17–26 dargestellt, wobei die Originaltrassen farblich nach Gefälleklassen differenziert dargestellt werden. Die jeweils berechneten Modelltrassen werden als schwarze Linie dargestellt. Dadurch wird die Verteilung der Steigungsabschnitte entlang der Strecke sichtbar. Die grafische Gegenüberstellung macht die räumlichen Differenzen über den gesamten Streckenverlauf hinweg nachvollziehbar und dokumentiert die jeweiligen Modellresultate. Abbildung 38–46 im Anhang zeigen zusätzlich eine Gegenüberstellung der mit den Methode D, E und G² erstellten LCP-Modelle im Vergleich zu den historischen Leitungstrassen. Die quantitative Überprüfung erfolgt mithilfe der Distanzmaße LSED und DFD, die in einer Tabelle gegenübergestellt werden. Beide Ansätze ergänzen einander und erlauben eine strukturierte Bewertung der Modellgenauigkeit.

² Die drei Methoden wurden aufgrund ihrer guten Validierungswerte ausgewählt. Auch visuell zeigt sich im Vergleich zu den originalen Trassen eine gute Modellgüte.

Tabelle 2 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden A-D basierend auf der Hangneigung/Steigung, aller Wasserleitungen miteinander gegenüber.

	Methode A		Methode B		Methode C		Methode D	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung a	49,92531485	93,80083716	45,72443331	100,3587846	38,56246982	54,40072708	33,28381509	76,50514816
Wasserleitung b	194,8774713	308,5013479	47,95213748	118,9042613	46,51706613	115,3916606	51,42558219	127,4996758
Wasserleitung c1	23,48611131	83,65262583	71,31009619	155,0436904	46,0131952	91,65674299	27,84681251	54,41516617
Wasserleitung c2	64,55967573	108,7220683	45,80863634	78,62530637	58,72649213	99,60864492	36,7955797	69,8835881
Wasserleitung c3	24,15795703	42,8770616	28,42217203	35,31607138	20,34284885	34,78310485	38,6920255	86,19737811
Wasserleitung d1	218,1189272	374,1844365	54,41646503	143,1264214	98,05975872	196,2945728	38,39197233	113,9985099
Wasserleitung d2	167,7654796	344,7914734	37,2586307	97,53874691	141,8858594	224,9905363	58,78880624	163,5104326
Wasserleitung e	115,9250096	189,6164163	40,26717812	69,28963977	115,507425	189,105516	124,5013505	187,6996671
Wasserleitung h	29,51669269	43,71516644	29,75898606	55,8763627	29,4028393	45,51257619	22,90193506	41,21593872
Mean	98,70362658	176,6512704	44,54652614	94,89769832	66,11310606	116,8604535	48,06976435	102,3250561

Tabelle 1 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden E-G basierend auf Abtrag- und Auffüllungsoperationen, aller Wasserleitungen miteinander gegenüber.

	Methode E		Methode F - Variante A		Methode F - Variante B		Methode G	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung a	56,85018795	78,72022572	207,7912398	250,6793997	78,64159928	147,4349433	32,70380804	50,89392931
Wasserleitung b	52,6707677	122,8159267	42,56292579	100,8491066	40,00111623	71,63338564	24,77554647	63,42362728
Wasserleitung c1	46,53427833	45,49989944	58,18517038	105,3962363	45,74637851	112,3363048	21,98499873	45,19204037
Wasserleitung c2	52,06725492	80,65340258	15,11739109	31,93330758	79,21476822	144,6848829	24,36189514	41,90983717
Wasserleitung c3	91,69159665	113,0774165	35,92822211	75,42450889	32,30221722	52,31145259	36,8247043	75,03168689
Wasserleitung d1	87,16793195	122,814308	315,6177756	570,4627919	93,12671567	275,0332012	153,3761165	216,0562362
Wasserleitung d2	60,29279383	111,0021696	34,78958212	38,88997905	285,4613352	570,7638587	28,87211345	87,34325424
Wasserleitung e	9,658684872	12,12540529	228,7699788	243,5671394	47,31140559	80,92863333	27,11986531	47,00304185
Wasserleitung h	42,57835846	52,15675404	81,22137816	179,2260538	64,89471329	124,0456914	25,5443545	53,13040604
Mean	55,50131718	82,09616755	113,3315182	177,380947	85,18891658	175,4635949	41,72926694	75,55378437

Den geringsten LSED- und DFD-Wert zeigt im Durschnitt die Methode G. Aber auch die Methoden B, D und E weisen im Durschnitt geringe LSED-Werte auf. Methode E hat dabei den zweit kleinsten DFD-Durchschnittswert von allen Methoden.

Wasserleitung a

Abbildung 7 und 8 zeigen die modellierten Trassen der Methoden A–G im Vergleich zur Originalwasserleitung a. Die modellierten Pfade verlaufen über weite Strecken parallel zur Originalleitung, weisen jedoch in einzelnen Abschnitten unterschiedliche seitliche Abweichungen auf. Die geringsten sichtbaren Abweichungen zur Originalwasserleitung zeigen die modellierten Trassen der Methoden C, D und G. Diese verlaufen über weite Strecken hinweg nahe an der Originaltrasse und weisen nur geringe seitliche Versätze auf. Die Methoden F Variante A und Variante B weisen die größten Abweichungen auf und entfernen sich in mehreren Abschnitten deutlich vom Originalverlauf.

Validierung der Ergebnisse

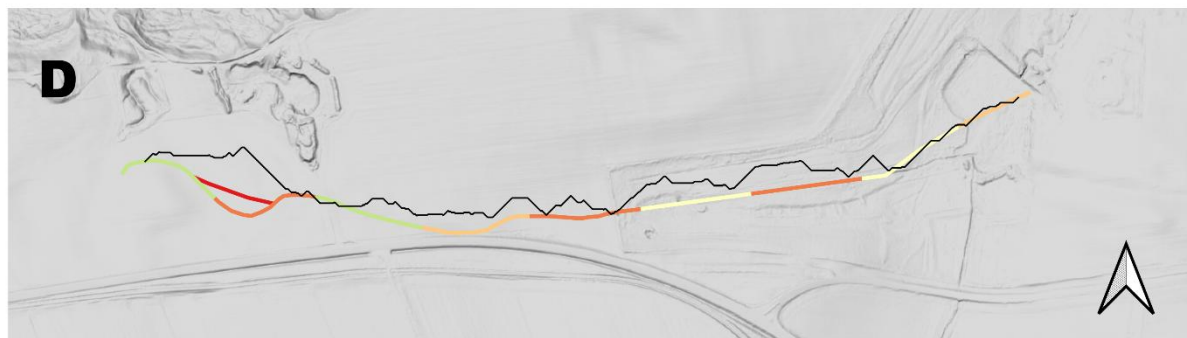
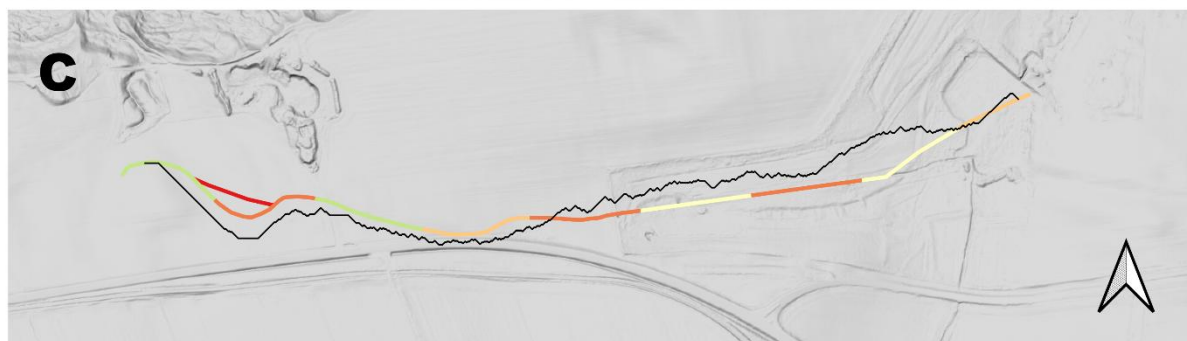
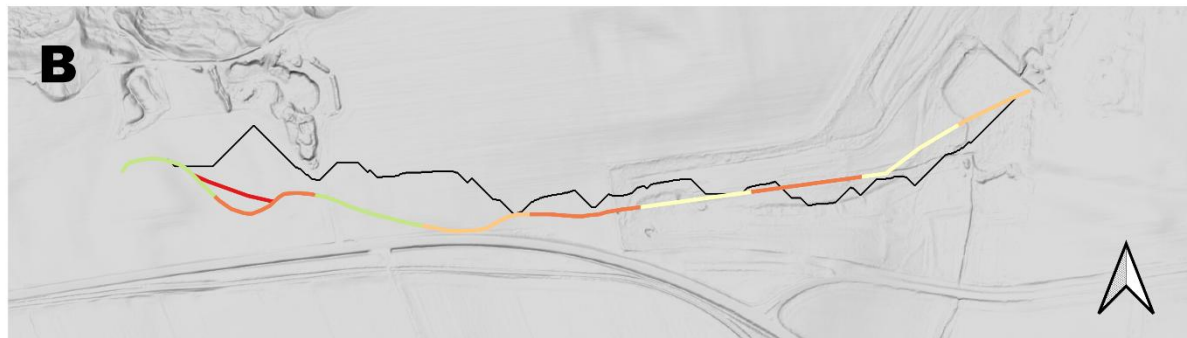
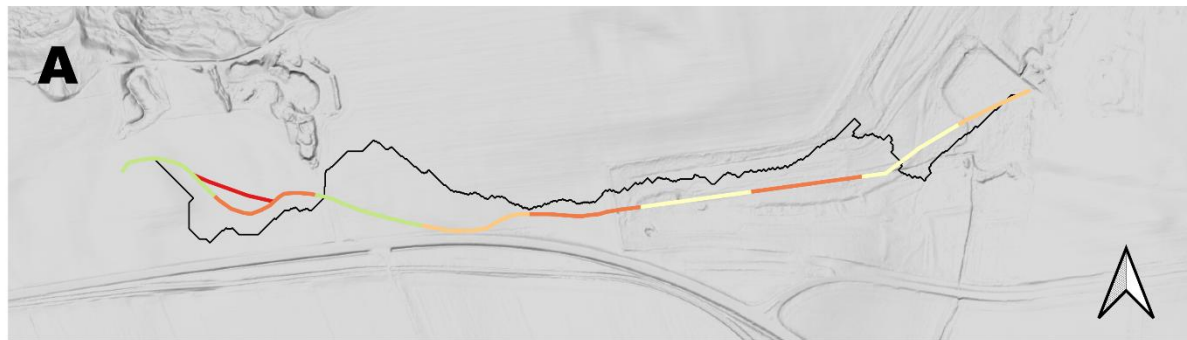
Tabelle 3 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden A-D basierend auf der Hangneigung/Steigung, der Wasserleitung a miteinander gegenüber.

	Methode A		Methode B		Methode C		Methode D	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung a	49,92531485	93,80083716	45,72443331	100,3587846	38,56246982	54,40072708	33,28381509	76,50514816

Tabelle 4 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden E-G basierend auf Abtrag- und Auffüllungsoperationen, der Wasserleitung a miteinander gegenüber.

	Methode E		Methode F - Variante A		Methode F - Variante B		Methode G	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung a	56,85018795	78,72022572	207,7912398	250,6793997	78,64159928	147,4349433	32,70380804	50,89392931

Für Wasserleitung a zeigen die Methoden G, D und C die geringsten Abweichungen, mit den niedrigsten LSED- und DFD-Werten im Vergleich zu den übrigen Methoden. Die Methoden A und B weisen moderate Abstände auf, während die Varianten F(A) und F(B) die größten Abweichungen zeigen.



Originalwasserleitung

Gefälle [%]

0.01 - 0.05

0.05 - 0.08

0,1 - 1

1 - 1,5

1,5 - 2

2 - 3

3 - 3,5

modellierte Wasserleitung

— Modellstrecke

0

300

600 m



Abbildung 7 Vergleich der unterschiedlichen Methoden am Beispiel der Wasserleitung a (Berechnung basierend auf Hangneigung/Steigung: Methode A-D).

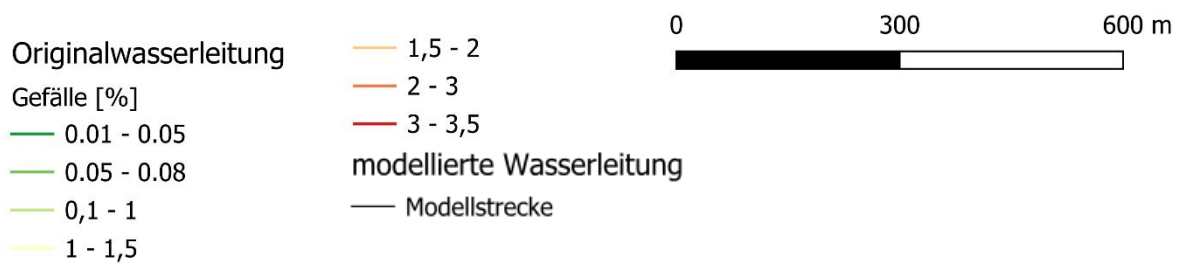
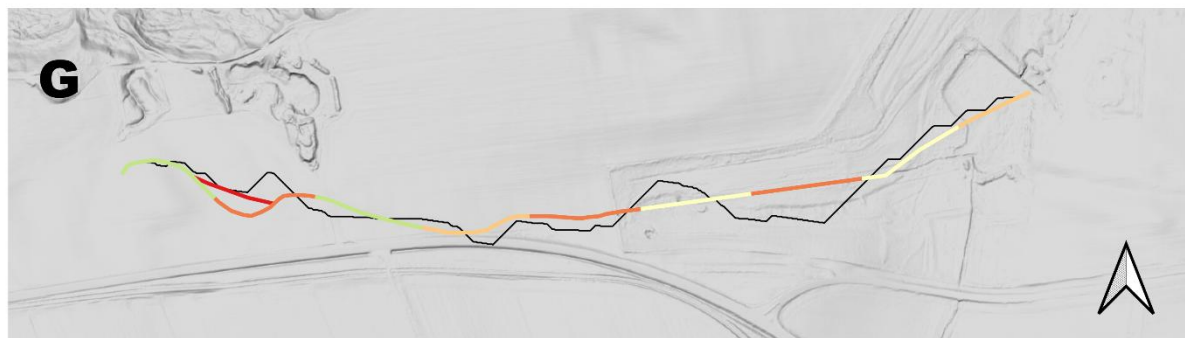
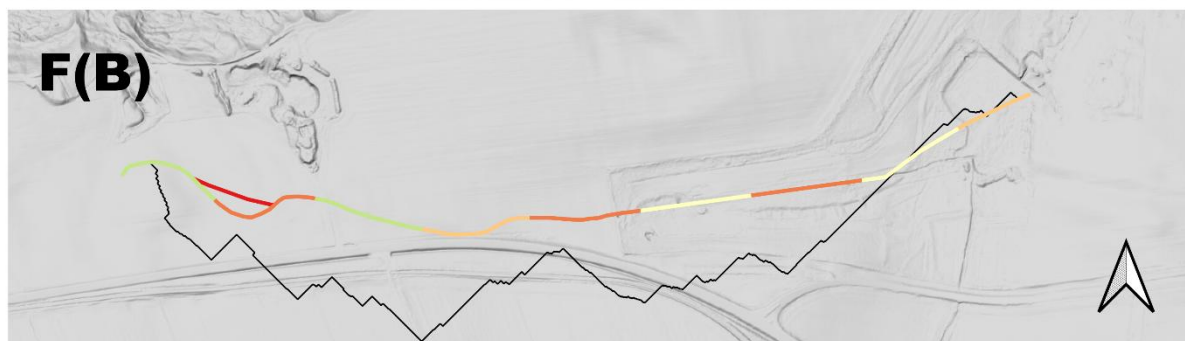
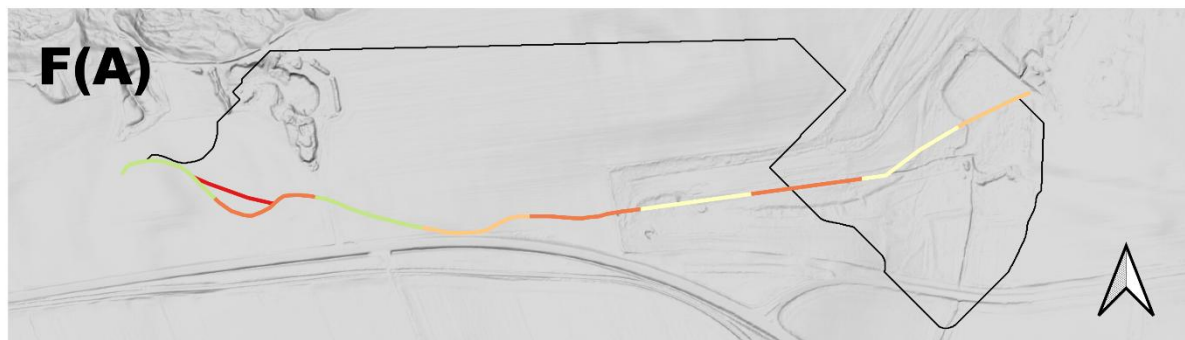
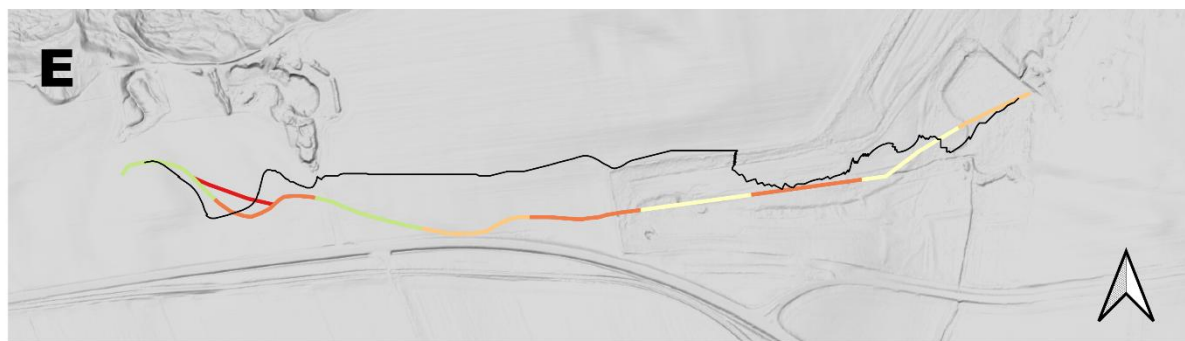


Abbildung 8 Vergleich der unterschiedlichen Methoden am Beispiel der Wasserleitung a (Berechnung basierend auf Abtrag- und Auffüllungsoperationen: Methode E-G).

Wasserleitung b

Abbildung 9 zeigt die modellierten Trassen der Methoden A–G im Vergleich zur Originalwasserleitung b, welche zu Beginn und am Ende ein flaches Gefälle aufweist. Im mittleren Abschnitt ist das Gefälle sehr steil (orange). Unterschiede in der Modellgüte zeigen sich vor allem im mittleren Abschnitt, in dem die modellierten Routen abschnittsweise seitlich vom archäologisch belegten Verlauf abweichen. Je nach Methode variieren sowohl die Lage als auch das Ausmaß dieser Abweichungen entlang der Trasse. In den meisten Fällen verläuft der modellierte Pfad zudem auf einer direkten Route zum Zielpunkt. Die geringste Gesamtabweichung vom Original weist Methode G auf, wobei lediglich im mittleren Streckenabschnitt eine leichte Differenz erkennbar ist. Methode E zeigt die größte Übereinstimmung im oberen Drittel der Trasse. Die Originalstrecke weist zudem im mittleren Abschnitt ein sehr hohes Gefälle (orange) auf.

Validierung der Ergebnisse

Tabelle 5 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden A-D basierend auf der Hangneigung/Steigung, der Wasserleitung b miteinander gegenüber.

	Methode A		Methode B		Methode C		Methode D	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung b	194,8774713	308,5013479	47,95213748	118,9042613	46,51706613	115,3916606	51,42558219	127,4996758

Tabelle 6 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden E-G basierend auf Abtrag- und Auffüllungsoperationen, der Wasserleitung b miteinander gegenüber.

	Methode E		Methode F - Variante A		Methode F - Variante B		Methode G	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung b	52,6707677	122,8159267	42,56292579	100,8491066	40,00111623	71,63338564	24,77554647	63,42362728

Bei Wasserleitung b erzielen die Methoden G und F die niedrigsten Distanzwerte und damit die engste Annäherung an die Originaltrasse. Die Methoden B, C, D und E liegen im mittleren Bereich, während die Methode A die höchsten Abweichungen aufweist.

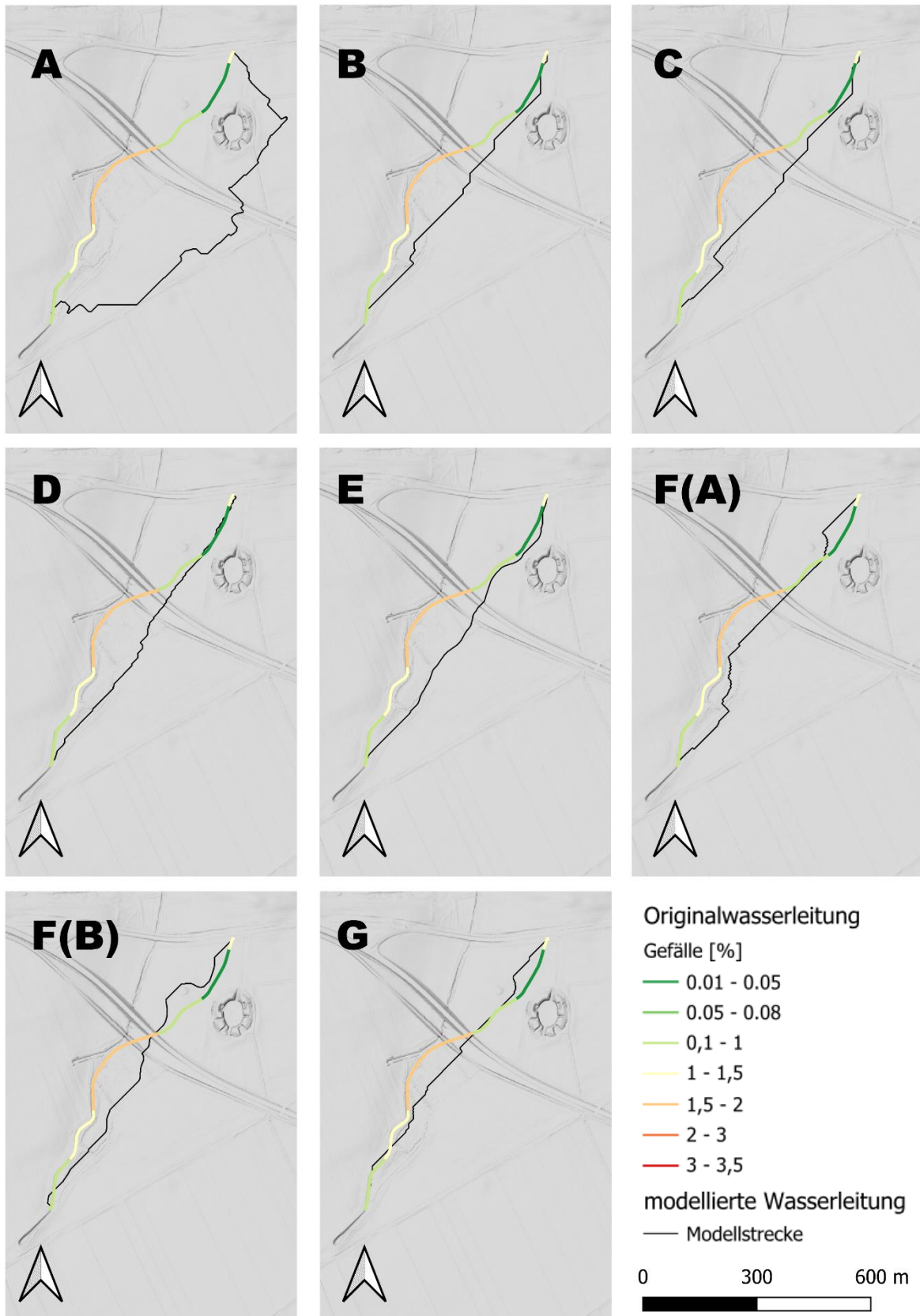


Abbildung 9 Vergleich der unterschiedlichen Methoden am Beispiel der Wasserleitung b.

Wasserleitung c1

Abbildung 10 zeigt die modellierten Trassen der Methoden A–G im Vergleich zur Originalwasserleitung c1. Die Originaltrasse weist überwiegend sehr geringe Gefällewerte (grün) auf, mit einem kurzen Abschnitt, höherer Steigung, im oberen Drittel (rot und gelb). Die modellierten Pfade verlaufen in allen Varianten grundsätzlich nahe der Originalleitung, unterscheiden sich jedoch deutlich in der räumlichen Annäherung. Die geringsten sichtbaren Abweichungen zeigen die Varianten A, D, E und G. In diesen Panels verläuft die modellierte Trasse über weite Strecken hinweg sehr nah an der Originalleitung. Besonders in den Abschnitten mit sehr geringem Gefälle liegen die modellierten Linien nahezu deckungsgleich auf der Originaltrasse.

Validierung der Ergebnisse

Tabelle 7 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden A-D basierend auf der Hangneigung/Steigung, der Wasserleitung c1 miteinander gegenüber.

	Methode A		Methode B		Methode C		Methode D	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung c1	23,48611131	83,65262583	71,31009619	155,0436904	46,0131952	91,65674299	27,84681251	54,41516617

Tabelle 8 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden E-G basierend auf Abtrag- und Auffüllungsoperationen, der Wasserleitung c1 miteinander gegenüber.

	Methode E		Methode F - Variante A		Methode F - Variante B		Methode G	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung c1	46,53427833	45,49989944	58,18517038	105,3962363	45,74637851	112,3363048	21,98499873	45,19204037

Für Wasserleitung c1 weist die Methode G die geringste Abweichung auf. Die Methoden A und D zeigen die nächstniedrigsten Abweichungen. Am weitesten entfernt von der Originalstrecke zeigt sich die Methode B.

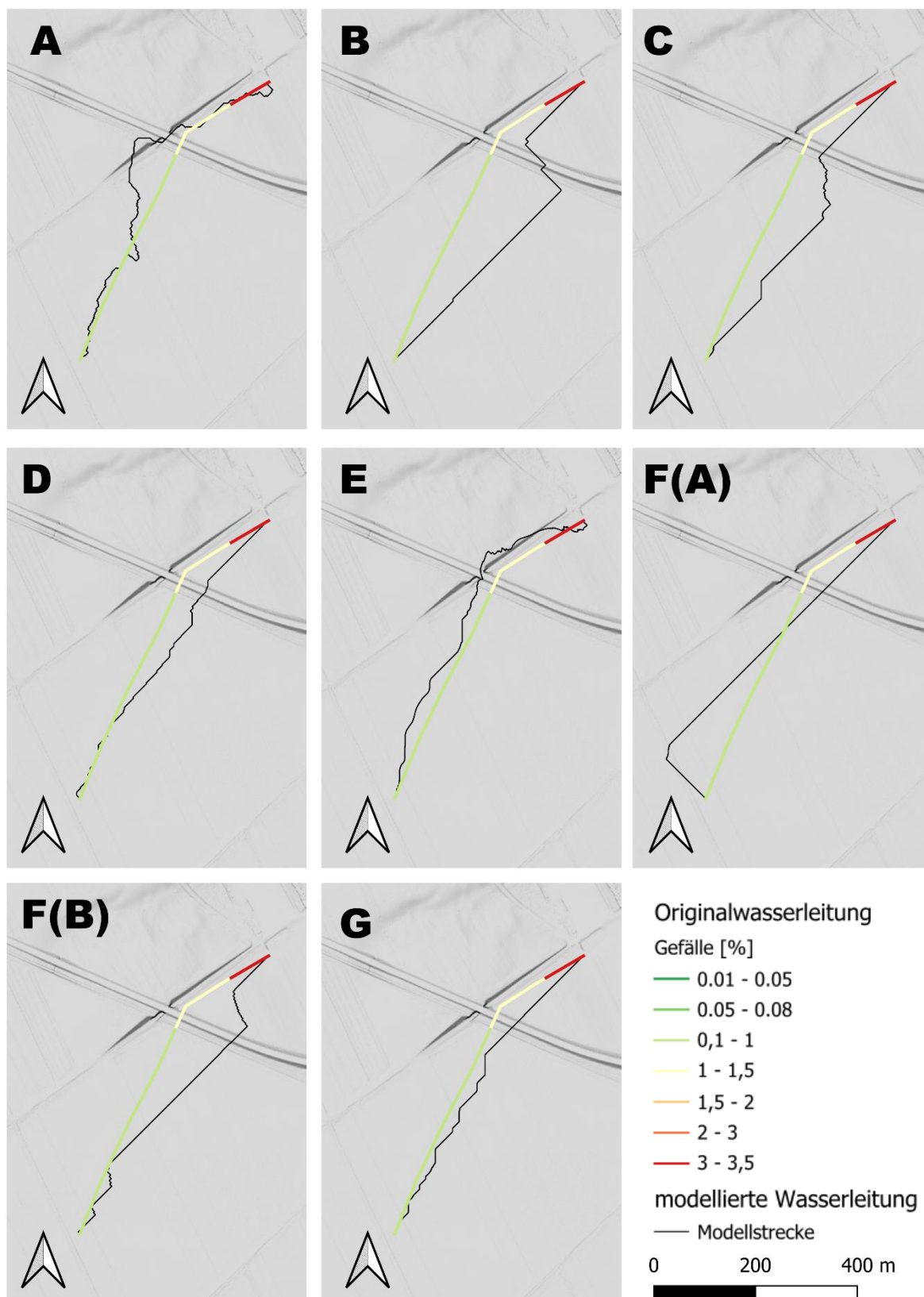


Abbildung 10 Vergleich der unterschiedlichen Methoden am Beispiel der Wasserleitung c1.

Wasserleitung c2

Abbildung 11 zeigt die modellierten Trassen der Methoden A–G im Vergleich zur Originalwasserleitung c2. Die Originaltrasse weist über weite Strecken sehr geringe Gefällewerte auf (grün), während im oberen Drittel ein kurzer Abschnitt mit deutlich höherem Gefälle sichtbar wird (rot). Dieser steilere Abschnitt wird von nahezu allen Methoden korrekt nachgezeichnet; lediglich die Methode F in Variante B weicht hier deutlicher vom Originalverlauf ab. Die modellierten Trassen zeigen insgesamt unterschiedliche räumliche Annäherungen an die Originalleitung. Die engste Übereinstimmung ist in den Methoden F (Variante A) und G erkennbar. In diesen Fällen verläuft die modellierte Leitung über weite Strecken nahezu deckungsgleich oder mit nur minimalen seitlichen Versätzen entlang der Originaltrasse. Die Methoden A, B, C und D und E folgen dem Verlauf ebenfalls, weisen jedoch größere Abstände auf.

Validierung der Ergebnisse

Tabelle 9 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden A-D basierend auf der Hangneigung/Steigung, der Wasserleitung c2 miteinander gegenüber.

	Methode A		Methode B		Methode C		Methode D	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung c2	64,55967573	108,7220683	45,80863634	78,62530637	58,72649213	99,60864492	36,7955797	69,8835881

Tabelle 10 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden E-G basierend auf Abtrag- und Auffüllungsoperationen, der Wasserleitung c2 miteinander gegenüber.

	Methode E		Methode F - Variante A		Methode F - Variante B		Methode G	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung c2	52,06725492	80,65340258	15,11739109	31,93330758	79,21476822	144,6848829	24,36189514	41,90983717

Auch hier spiegelt die LSED und die DFD-Ergebnisse die räumliche Wahrnehmung wider. Methode F Variante A und Methode G zeigen die geringste Abweichung zur Originalstrecke auf.

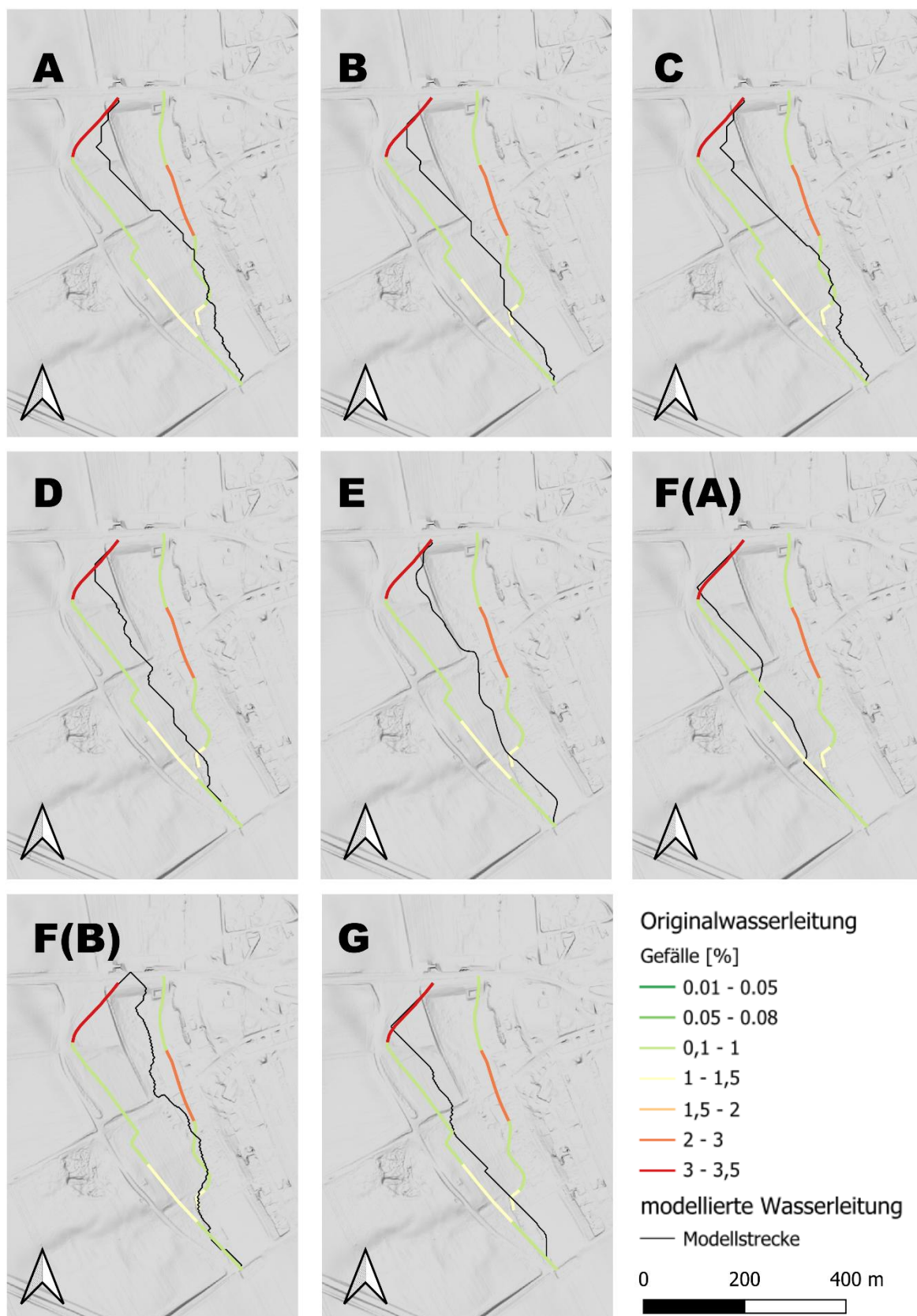


Abbildung 11 Vergleich der unterschiedlichen Methoden am Beispiel der Wasserleitung c2.

Wasserleitung c3

Abbildung 12 zeigt die modellierten Trassen der Methoden A–G im Vergleich zur Originalwasserleitung c3. Die Originaltrasse weist zu Beginn und am Ende überwiegend sehr geringe Gefällewerte auf (grün), während im mittleren Abschnitt ein deutlich steilerer Bereich erkennbar ist (orange). Die engste Übereinstimmung ist in den Varianten A, B und C sichtbar. In diesen Fällen verläuft die modellierte Leitung über weite Strecken nahe dem Original. Die Methoden F Variante A und F Variante B sowie die Methode G folgen dem Verlauf ebenfalls, weisen jedoch in einzelnen Abschnitten größere Abstände auf.

Validierung der Ergebnisse

Tabelle 11 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden A-D basierend auf der Hangneigung/Steigung, der Wasserleitung c3 miteinander gegenüber.

	Methode A		Methode B		Methode C		Methode D	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung c3	24,15795703	42,8770616	28,42217203	35,31607138	20,34284885	34,78310485	38,6920255	86,19737811

Tabelle 12 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden E-G basierend auf Abtrag- und Auffüllungsoperationen, der Wasserleitung c3 miteinander gegenüber.

	Methode E		Methode F - Variante A		Methode F - Variante B		Methode G	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung c3	91,69159665	113,0774165	35,92822211	75,42450889	32,30221722	52,31145259	36,8247043	75,03168689

Die Methode C hat die niedrigsten LSED- und DFD-Werte, dicht gefolgt von den Methoden A und B. Die höchsten Werte haben die Methode E und Methode F Variante A.

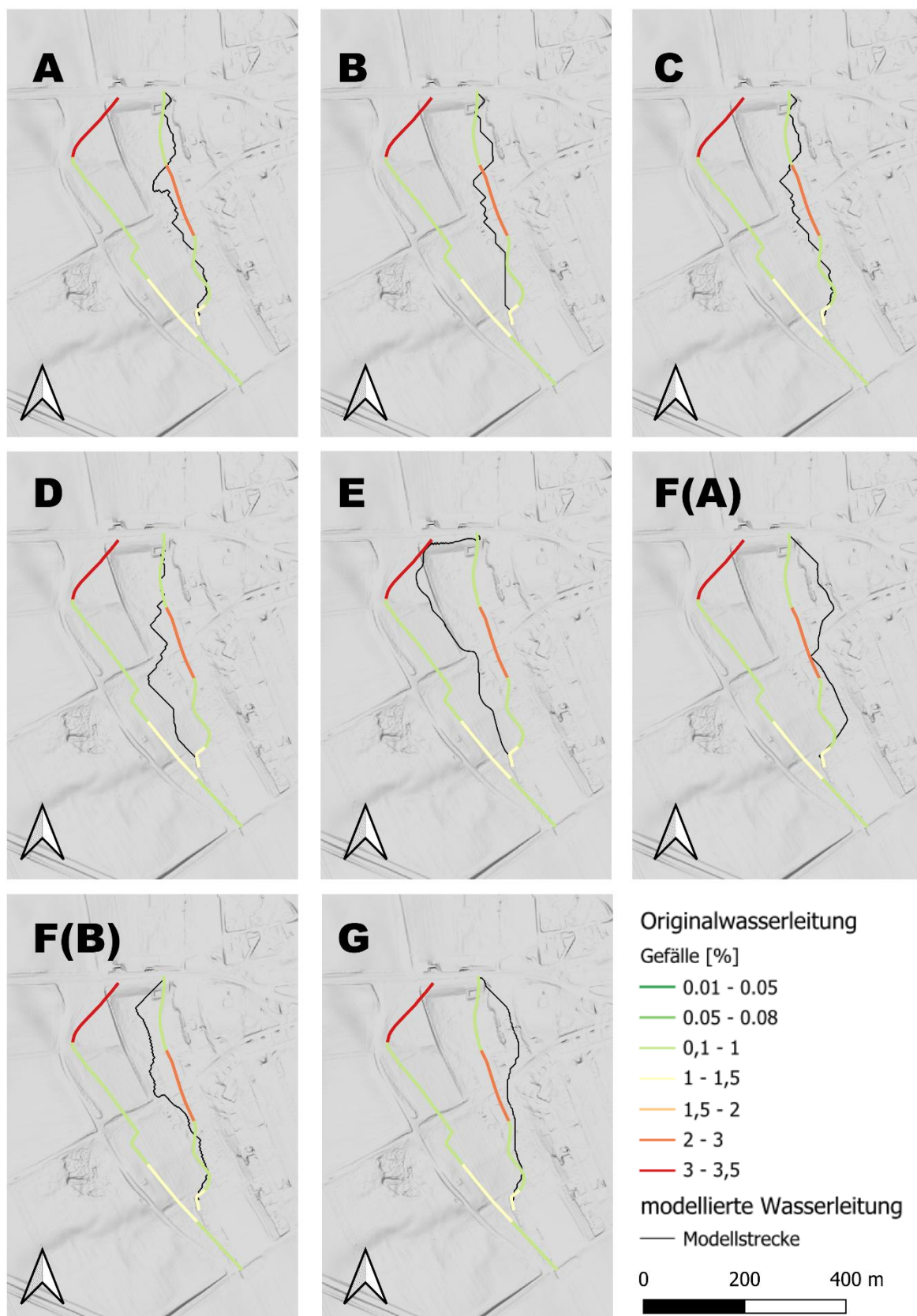


Abbildung 12 Vergleich der unterschiedlichen Methoden am Beispiel der Wasserleitung c3.

Wasserleitung d1

Abbildung 13 zeigt die modellierten Trassen der Methoden A–G im Vergleich zur Originalwasserleitung d1. Die Originaltrasse weist im oberen Abschnitt ein höheres Gefälle auf (orange), während sich im weiteren Verlauf überwiegend sehr geringe Steigungswerte (0,01–0,05 %) mit moderaten Abschnitten zwischen 1 und 1,5 % abwechseln.

Die modellierten Trassen zeigen unterschiedliche räumliche Annäherungen an die Originalleitung. In der unteren Hälfte der Strecke verlaufen die Methoden B, D, E, F(B) und G über weite Abschnitte hinweg nahe an der Originaltrasse und folgen deren Verlauf mit nur geringen seitlichen Abweichungen. In der oberen Hälfte zeigt die Methode C und D die engste Übereinstimmung und überlagert den Originalverlauf dort am deutlichsten. Über die gesamte Strecke hinweg weist die Methode D die geringsten sichtbaren Abweichungen auf und folgt der Originalleitung am konsistentesten.

Insgesamt wird sichtbar, dass die Methode C (oberer Abschnitt) sowie B, D, E, F(B) und G (unterer Abschnitt) jeweils Teilbereiche der Originaltrasse gut nachzeichnen, während die Methode D über die gesamte Strecke hinweg die engste räumliche Übereinstimmung zeigt.

Validierung der Ergebnisse

Tabelle 13 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden A-D basierend auf der Hangneigung/Steigung, der Wasserleitung d1 miteinander gegenüber.

	Methode A		Methode B		Methode C		Methode D	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung d1	218,1189272	374,1844365	54,41646503	143,1264214	98,05975872	196,2945728	38,39197233	113,9985099

Tabelle 14 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden E-G basierend auf Abtrag- und Auffüllungsoperationen, der Wasserleitung d1 miteinander gegenüber.

	Methode E		Methode F - Variante A		Methode F - Variante B		Methode G	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung d1	87,16793195	122,814308	315,6177756	570,4627919	93,12671567	275,0332012	153,3761165	216,0562362

Hier spiegelt sich die räumliche Wahrnehmung auch in den Validierungsergebnissen wider. Die Methode D zeigt deutlich die geringste Abweichung vom Original. Die höchste Abweichung weist Methode F Variante A auf. Die Methoden A, B, C und E liegen im mittleren Bereich.

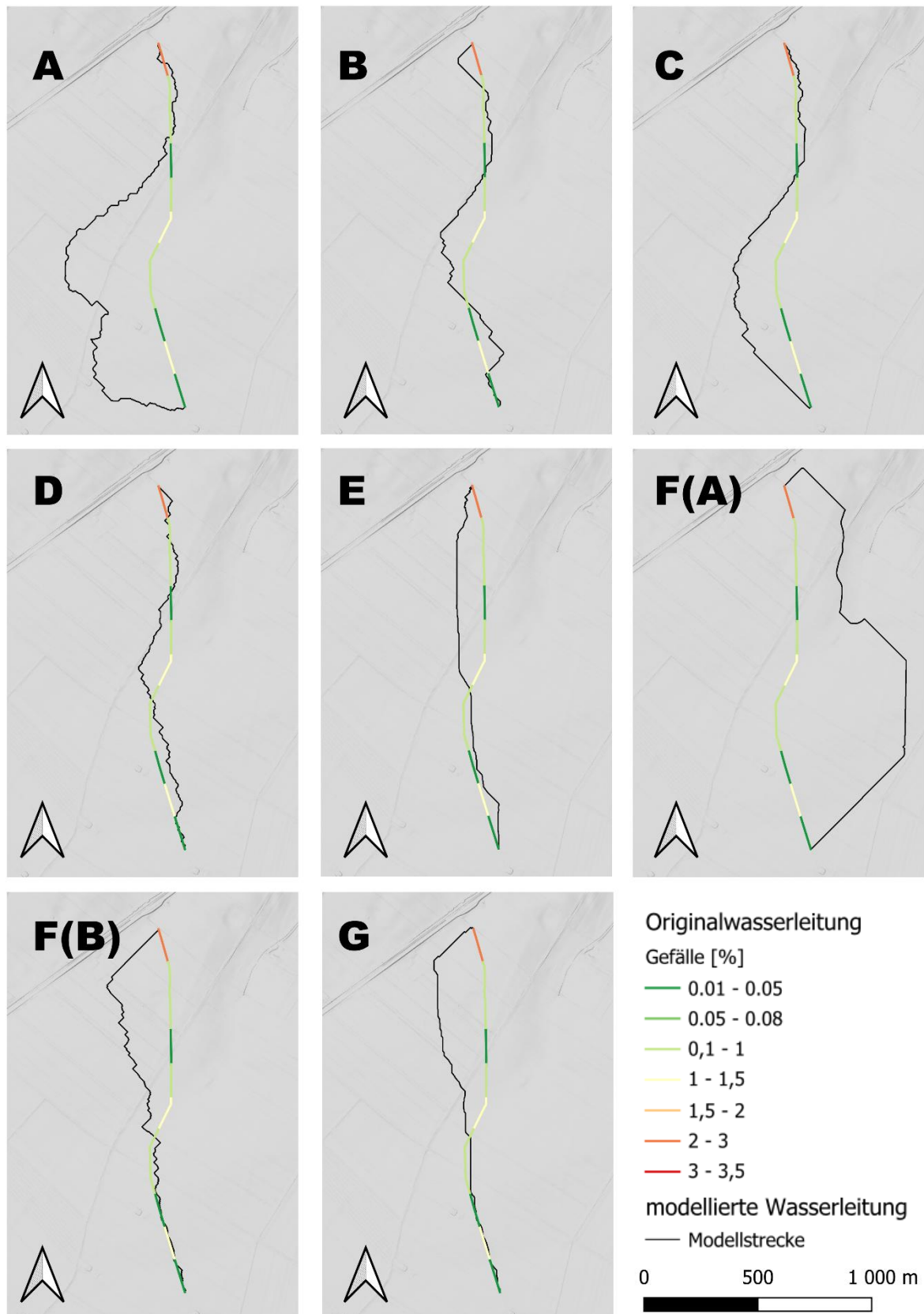


Abbildung 13 Vergleich der unterschiedlichen Methoden am Beispiel der Wasserleitung d1.

Wasserleitung d2

Abbildung 14 zeigt die modellierten Trassen der Methoden A–G im Vergleich zur Originalwasserleitung d2. Die Originalleitung weist ein durchgehend ähnliches Gefälle auf. Die modellierten Trassen zeigen unterschiedliche räumliche Annäherungen an die Originalleitung. Die engste Übereinstimmung ist in den Methoden F (Variante A) und G sichtbar. In beiden Fällen verläuft die modellierte Leitung über weite Strecken hinweg nahezu deckungsgleich oder mit nur minimalen seitlichen Versätzen entlang der Originaltrasse. Auch die Methoden D und E folgen dem Verlauf über große Abschnitte hinweg eng, weisen jedoch im unteren Bereich etwas größere Abstände auf.

Validierung der Ergebnisse

Tabelle 15 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden A-D basierend auf der Hangneigung/Steigung, der Wasserleitung d2 miteinander gegenüber.

	Methode E		Methode F - Variante A		Methode F - Variante B		Methode G	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung d2	60,29279383	111,0021696	34,78958212	38,88997905	285,4613352	570,7638587	28,87211345	87,34325424

Tabelle 16 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden E-G basierend auf Abtrag- und Auffüllungsoperationen, der Wasserleitung d2 miteinander gegenüber.

	Methode A		Methode B		Methode C		Methode D	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung d2	167,7654796	344,7914734	37,2586307	97,53874691	141,8858594	224,9905363	58,78880624	163,5104326

Die kleinsten Werte weist die Methode G auf. Methode F Variante B und Methode E, D und B liegen im mittleren Bereich, während die Methode F Variante A die höchsten Distanzwerte zeigt.

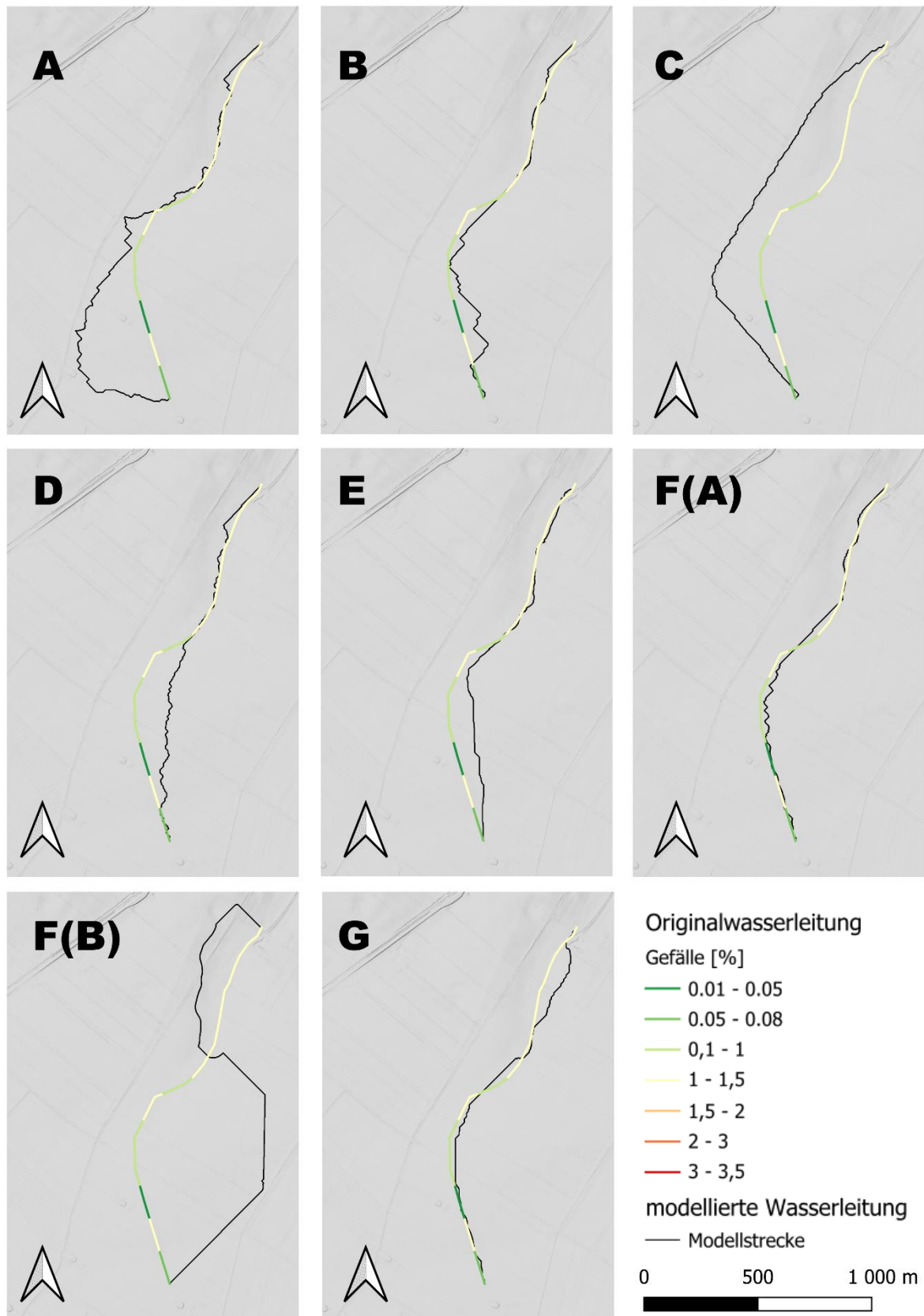


Abbildung 14 Vergleich der unterschiedlichen Methoden am Beispiel der Wasserleitung d2.

Wasserleitung e

Abbildung 15 zeigt die modellierten Trassen der Methoden A–G im Vergleich zur Originalwasserleitung e. Die Originaltrasse weist über die gesamte Strecke hinweg ein weitgehend gleichmäßiges Gefälle auf, das überwiegend im Bereich sehr geringer Steigungswerte liegt (0,01–0,05 % und 0,05–0,08 %). Die engste Übereinstimmung ist in der Methode E sichtbar, wobei die Strecke weitgehend deckungsgleich mit dem Original verläuft. Auch die Methode G zeigt über weite Abschnitte hinweg eine nahe Annäherung, weicht jedoch in der zweiten Hälfte der Strecke leicht seitlich vom Originalverlauf ab.

Validierung der Ergebnisse

Tabelle 17 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden A-D basierend auf der Hangneigung/Steigung, der Wasserleitung e miteinander gegenüber.

	Methode A		Methode B		Methode C		Methode D	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung e	115,9250096	189,6164163	40,26717812	69,28963977	115,507425	189,105516	124,5013505	187,6996671

Tabelle 18 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden E-G basierend auf Abtrag- und Auffüllungsoperationen, der Wasserleitung e miteinander gegenüber.

	Methode E		Methode F - Variante A		Methode F - Variante B		Methode G	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung e	9,658684872	12,12540529	228,7699788	243,5671394	47,31140559	80,92863333	27,11986531	47,00304185

Bei Wasserleitung e zeigt die Methode E die niedrigsten LSED- und DFD-Werte und ist damit die engste Annäherung an die Originaltrasse. Die Methoden G und B liegen im mittleren Bereich, während die Methoden A, C, D und F Variante A die größten Abweichungen aufweisen.

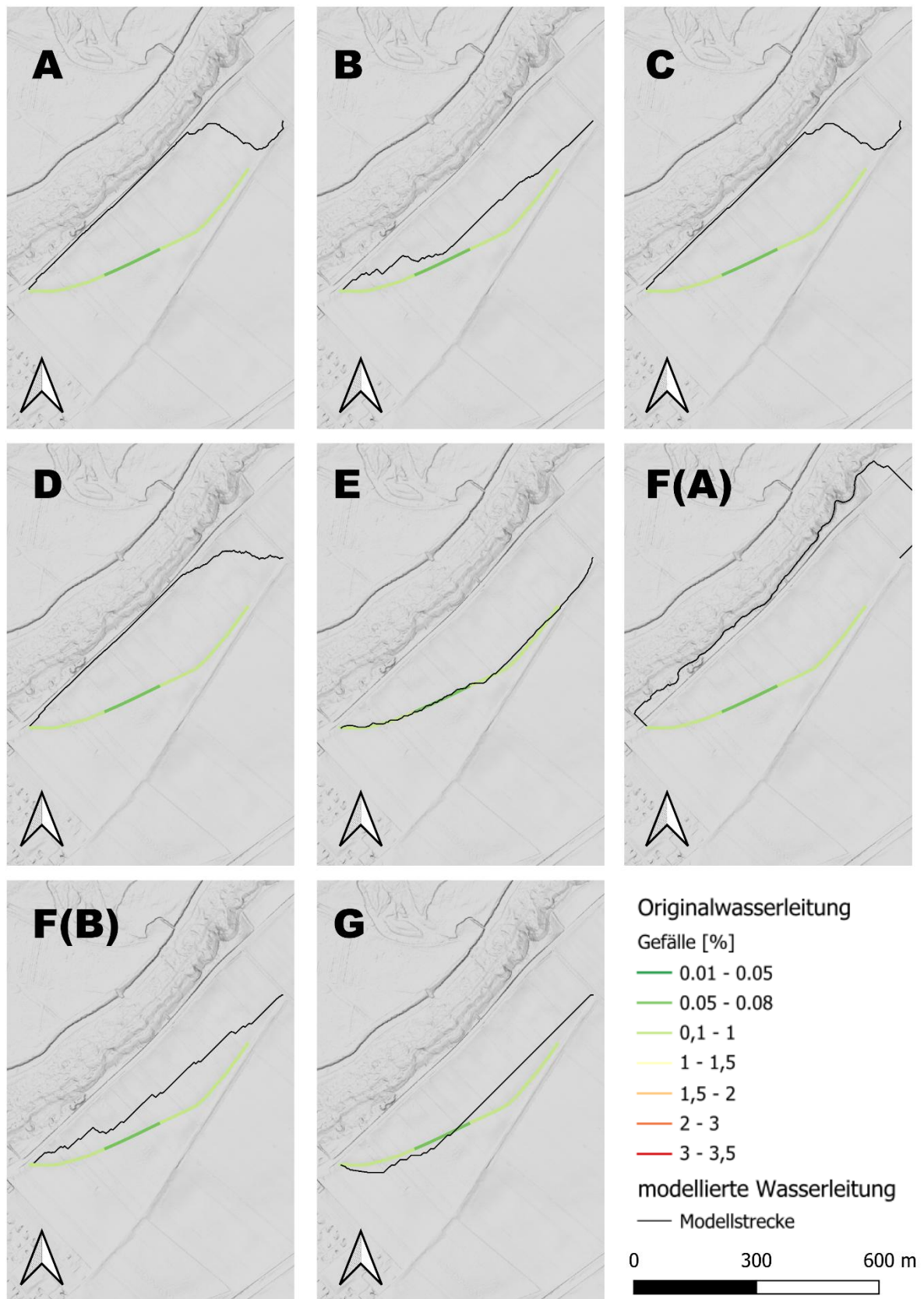


Abbildung 15 Vergleich der unterschiedlichen Methoden am Beispiel der Wasserleitung e.

Wasserleitung h

Abbildung 16 zeigt die modellierten Trassen der Methoden A–G im Vergleich zur Originalwasserleitung h. Die Originalstrecke zeigt einen sehr unterschiedlichen Verlauf im Gefälle von 0,1 – 3,5 %. Die modellierten Trassen zeigen insgesamt eine ähnliche räumliche Annäherung an die Originalleitung. In den meisten Varianten verlaufen die modellierten Linien über weite Strecken hinweg nahe an der Originaltrasse, wobei die seitlichen Abweichungen überwiegend gering bleiben. Besonders in den Abschnitten mit sehr geringem Gefälle zeigen mehrere Methoden eine nahezu deckungsgleiche Lage. Die Methoden F Variante A und B weichen hingegen in mehreren Bereichen sichtbar seitlich vom Originalverlauf ab. Diese Abweichungen treten sowohl in Abschnitten mit geringem als auch mit höherem Gefälle auf und sind im Vergleich zu den übrigen Methoden deutlicher ausgeprägt.

Validierung der Ergebnisse

Tabelle 19 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden A-D basierend auf der Hangneigung/Steigung, der Wasserleitung h miteinander gegenüber.

	Methode A		Methode B		Methode C		Methode D	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung h	29,51669269	43,71516644	29,75898606	55,8763627	29,4028393	45,51257619	22,90193506	41,21593872

Tabelle 20 stellt die LSED- und DFD-Ergebnisse, der Methoden E-G basierend auf Abtrag- und Auffüllungsoperationen, der Wasserleitung h miteinander gegenüber.

	Methode E		Methode F - Variante A		Methode F - Variante B		Methode G	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung h	42,57835846	52,15675404	81,22137816	179,2260538	64,89471329	124,0456914	25,5443545	53,13040604

Für Wasserleitung h erzielen die Methoden G und D die geringsten Abweichungen. Die Methoden A, B und C liegen mit sehr ähnlichen Werten im mittleren Bereich, während die Methode F Variante A und B die höchsten Distanzwerte aufweisen.

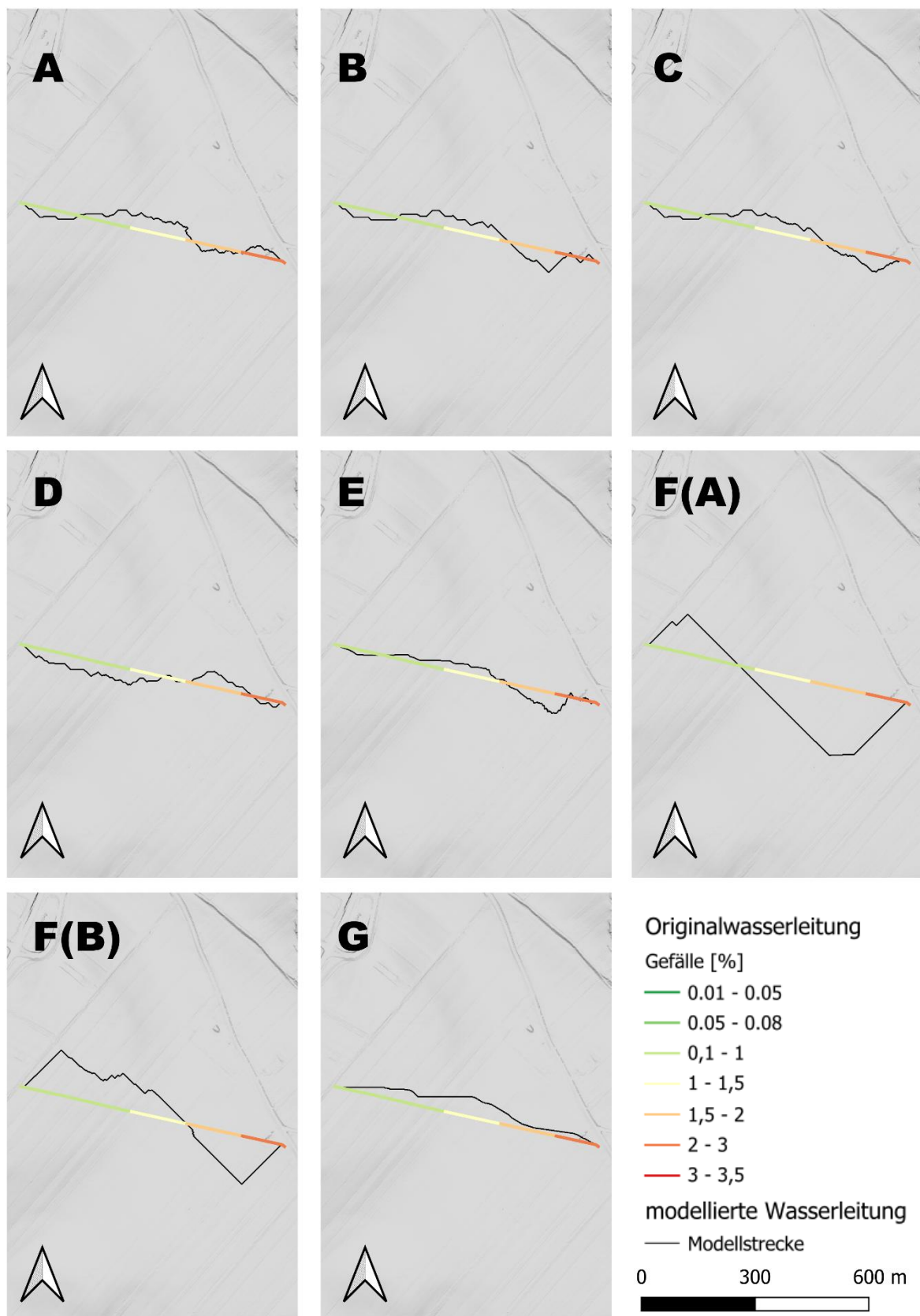


Abbildung 16 Vergleich der unterschiedlichen Methoden am Beispiel der Wasserleitung h.

Zusammenfassung des Methodenvergleichs

Zusammenfassend zeigen die visuellen Abweichungsmuster der Abbildungen 17–26 eine klare Übereinstimmung mit den numerischen Validierungsergebnissen. Methoden, die in mehreren Strecken deutliche seitliche Verlagerungen aufweisen, erzielen entsprechend höhere LSED- und DFD-Werte. Umgekehrt bestätigen die geringen Abweichungen der Methode G deren insgesamt beste Modellgüte. Das Ergebnis bildet die Grundlage für die anschließende Diskussion sowie für die Auswahl des Modells, das in der Sensitivitätsanalyse weiter untersucht wird. Methode E hat den zweitniedrigsten DFD-Wert, auch wenn er im Durchschnitt im LSED-Wert von den Methoden B und D übertroffen wird.

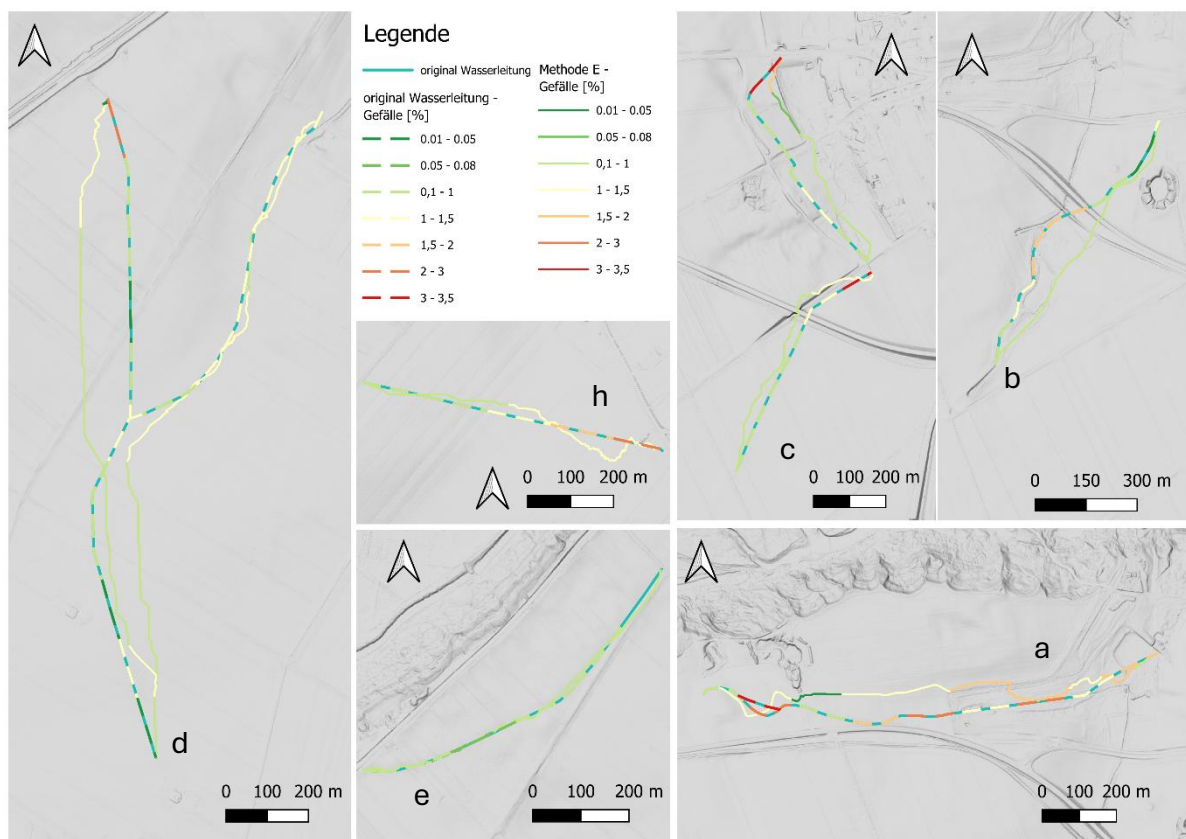


Abbildung 17 modellierte Routen der Methode E, im Gefälle dargestellt, der Originalstrecken, ebenfalls im Gefälle dargestellt, gegenübergestellt

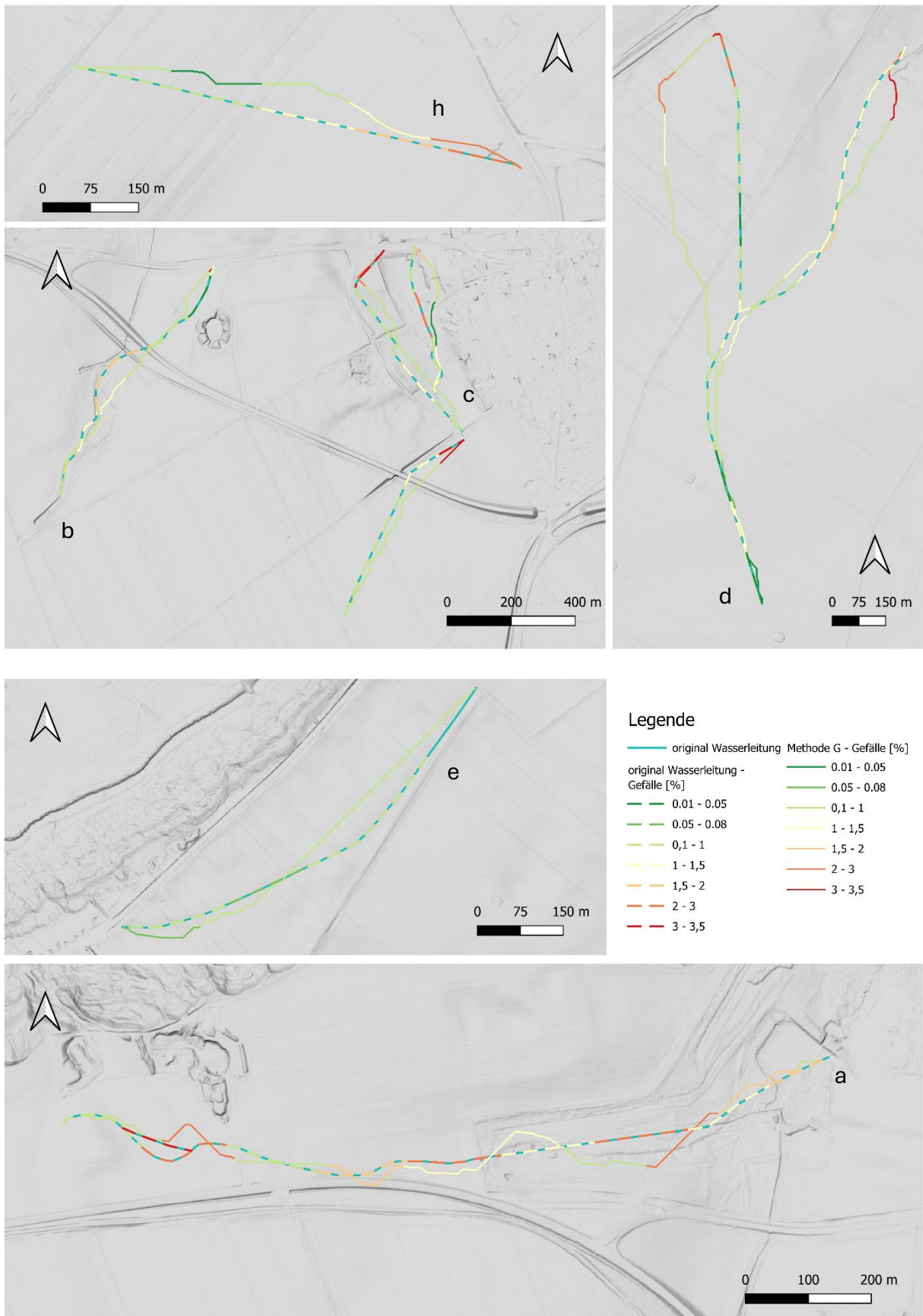


Abbildung 18 modellierte Routen der Methode G, im Gefälle dargestellt, der Originalstrecken, ebenfalls im Gefälle dargestellt, gegenübergestellt

Höhen- und Steigungsprofile der Methoden D, E und G im Vergleich zu den ursprünglichen Wasserleitungen

Um Abweichungen in den LCP-Ergebnissen gegenüber den originalen Wasserleitungen besser interpretieren zu können, werden die ursprünglichen Leitungstrassen den durch die Methoden D, E und G modellierten LCP-Routen gegenübergestellt. Methode G wurde gewählt, weil sie die besten durchschnittlichen Ergebnisse (vgl. Tabelle 1 und 2) erzielt. Methode E zeigt, wie schon erwähnt, das zweitbeste DFD-Ergebnis. Methode D wurde als dritte Methode, aufgrund ihres eher einfachen Ansatzes, mittels einer Klassifizierung der Hangneigung aufgenommen. Die graphischen Gegenüberstellungen unterstützen dabei zu beurteilen, inwieweit die einzelnen Methoden zu günstigeren oder ungünstigen Gefälleverläufen beitragen. Auf diese Weise können auch geringe Unterschiede, wie zum Beispiel eine Annäherung an das Mindestgefälle von 0,5 % oder eine Reduktion bei steilen Abschnitten, deutlicher erkennbar werden. Die Gegenüberstellung der einzelnen Profile ermöglicht es zudem, Muster und methodenbedingte Verzerrungen besser zu verstehen.

Tabelle 21 vergleicht die Profile der ursprünglichen Wasserleitungen a und b mit den durch die Methoden D, E und G erzeugten Profilen, die in der Validierung besonders gute Ergebnisse erzielt haben.

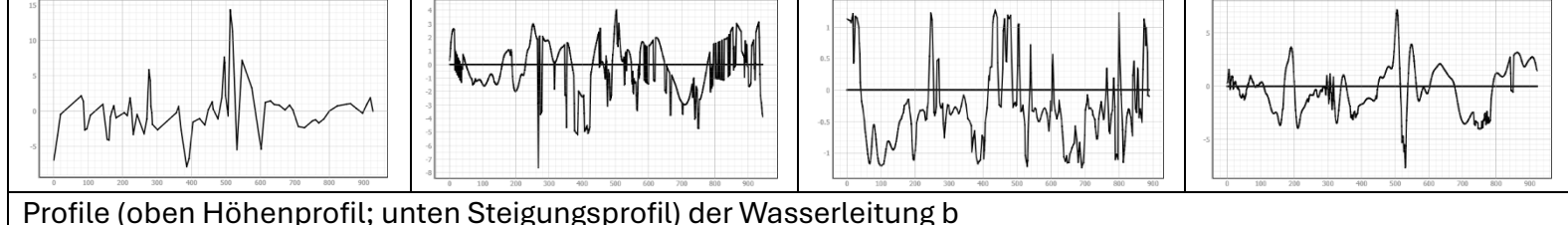
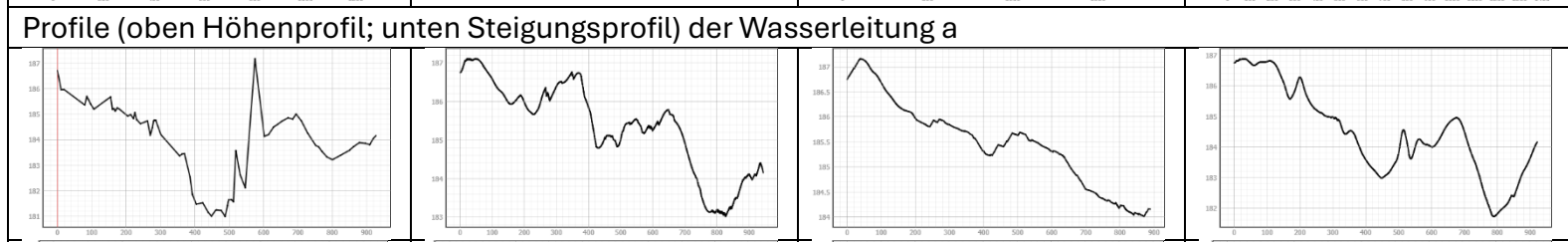
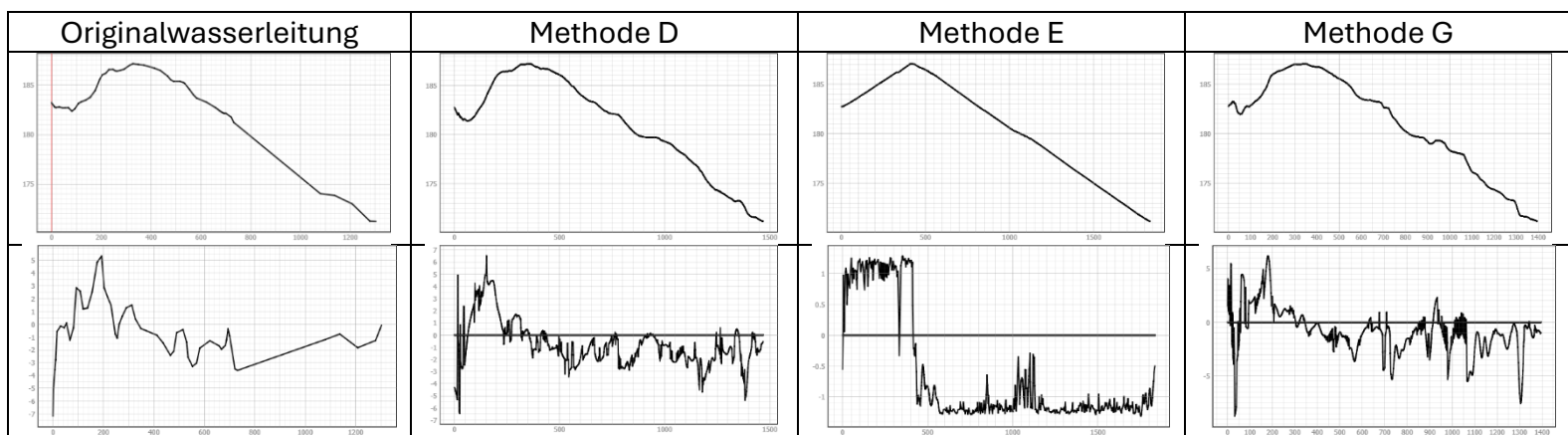
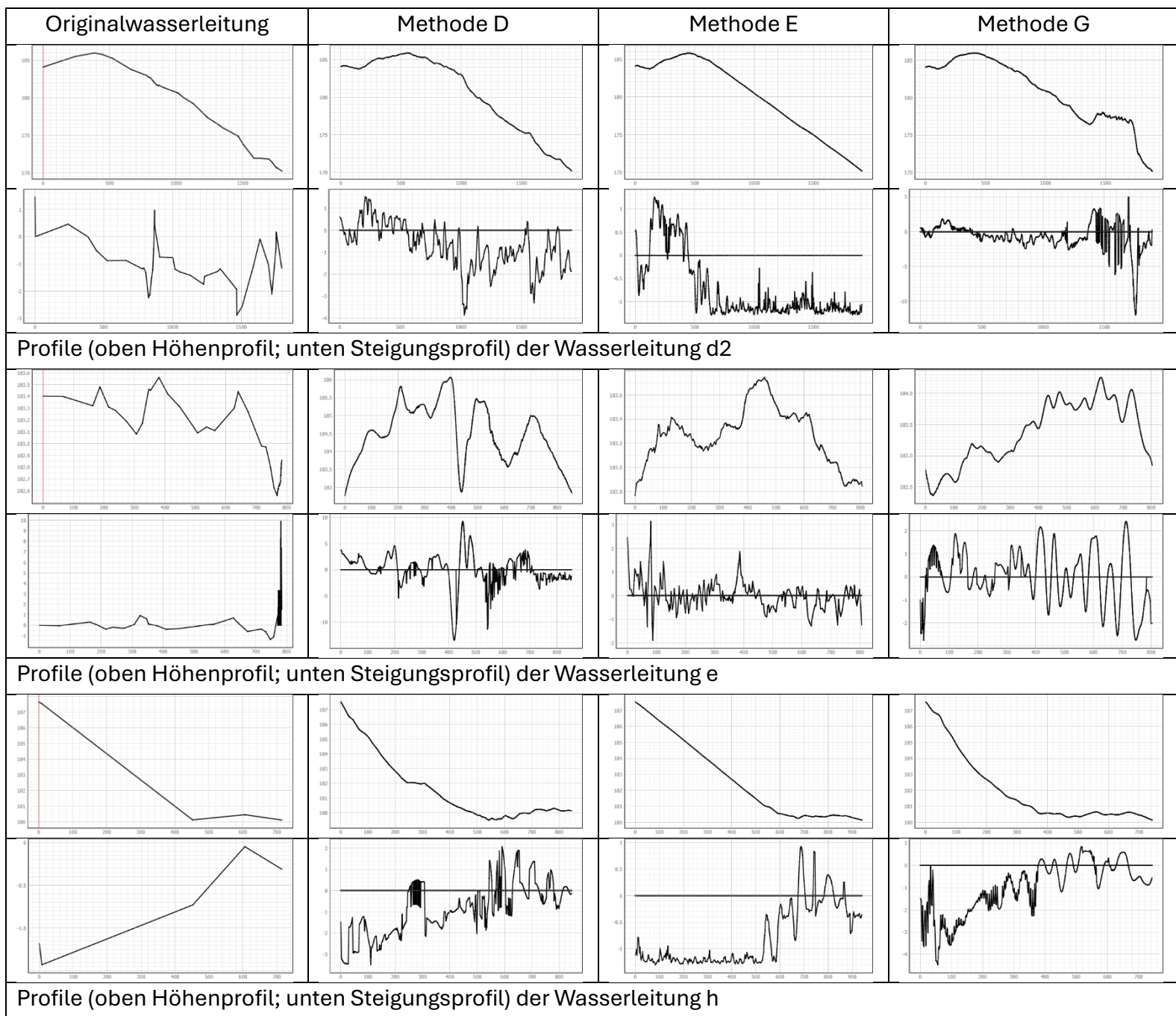


Tabelle 23 vergleicht die Profile der ursprünglichen Wasserleitungen d2, e und h mit den durch die Methoden D, E und G erzeugten Profilen, die in der Validierung besonders gute Ergebnisse erzielt haben.



Sensitivitätstests

Um die Robustheit der besten Methode, nämlich Methode G, zu bewerten werden Sensitivitätsanalysen der zentralen Modellparameter durchgeführt. Die für die Untersuchung gewählten Parameter repräsentieren Annahmen über technische, hydraulische und algorithmische Rahmenbedingungen und stellen zugleich Unsicherheitsfaktoren der Rekonstruktion dar. Um eine mögliche methodische Verzerrung zu vermeiden, werden Sensitivitätsanalysen auch auf die von Baek und Choi (2017) vorgeschlagene Methode E angewendet.

Für Methode G werden folgende Parameter überprüft:

- (1) die Größe des Nachbarschaftsfensters zur Bestimmung möglicher Bewegungsrichtungen (Moving Window),
- (2) das angenommene Kanalgefälle (channel_incl),
- (3) die zulässige Gefälletoleranz (tol) sowie
- (4) das Intervall der lokalen Ursprungspunkte (origin_interval), welche die abschnittsweise Planung und Vermessung eines Bauwerks simulieren, wird validiert.

Zusätzlich wird überprüft, welchen Einfluss eine Straße trotz der Interpolation im digitalen Geländemodell auf die Modellierung hat.

Bei Methode E werden ebenfalls die Fenstergröße und das angenommene Kanalgefälle untersucht. Zusätzlich fließen die maximale und minimale Hangneigung in die Analyse ein.

Methode G

Fenstergröße

Das Moving Window bestimmt die lokale Nachbarschaft, die innerhalb der Bewegungen erlaubt ist und beeinflusst die Richtungsfreiheit, die Glättung des Pfades und wie stark der berechnete Pfad auf kleine Geländestrukturen reagiert. Gleichzeitig wirkt sich die Größe des Fensters unmittelbar auf die Rechenkomplexität des Modells aus. Bei einem größeren Fenster kann die Berechnung mehrere Stunden betragen. Da diese Faktoren einen direkten Einfluss auf den Verlauf des berechneten Pfades haben können, wird die Fenstergröße im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse systematisch variiert.

Tabelle 24 stellt die validierten Ergebnisse der unterschiedlichen Fenstergrößen den Ursprungsrouten der Methode G gegenüber.

	Methode G (3x3)		Fenstergröße 9x9		Fenstergröße 11x11	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung a	32,70380804	50,89392931	163,1397559	250,3742042	170,1758823	250,3438614
Wasserleitung b	24,77554647	63,42362728	32,37091629	97,00054527	31,86253836	96,98712381
Wasserleitung c1	21,98499873	45,19204037	22,46048166	45,17612211	21,98343752	45,16196906
Wasserleitung c2	24,36189514	41,90983717	21,5364096	35,71700229	25,30181899	48,00182996
Wasserleitung c3	36,8247043	75,03168689	43,97590493	88,35811765	40,31059166	79,62057152
Wasserleitung d1	153,3761165	216,0562362	167,6897448	213,4567933	106,7159719	205,577624
Wasserleitung d2	28,87211345	87,34325424	60,54560559	85,89605046	47,78900478	87,04173864
Wasserleitung e	27,11986531	47,00304185	27,49498145	46,98652394	24,06062112	47,01253187
Wasserleitung h	25,5443545	53,13040604	33,57405045	70,42463637	30,58191621	75,37278962
Mean	41,72926694	75,55378437	63,64309452	103,7099995	55,42019809	103,9022267

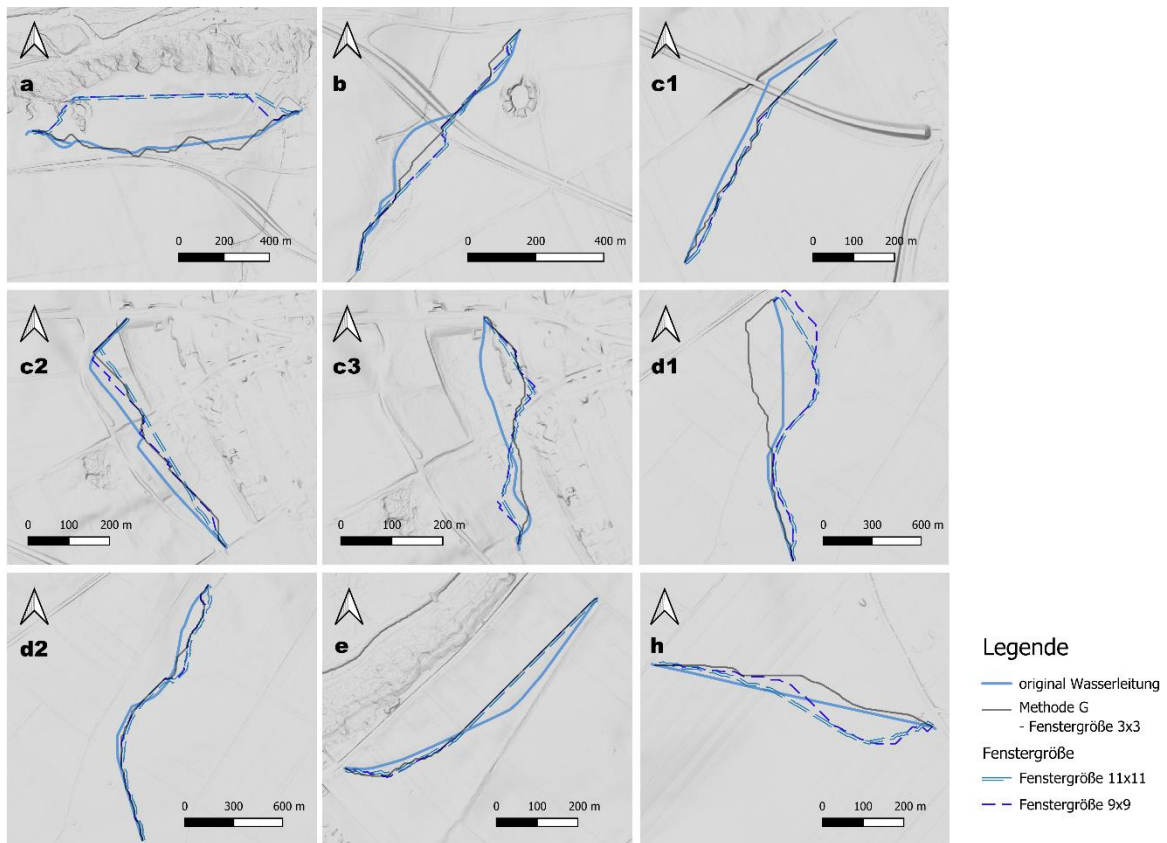


Abbildung 19 Einfluss der Fenstergröße auf die modellierte Route.

Kanalgefälle

Die Parameter des Kanalgefälles definieren das angenommene hydraulische Gefälle der zu modellierenden Wasserleitungen und beeinflussen das Verhältnis von Abtrag und Auffüllung entlang der berechneten Route. Dieses Gefälle wird in der Literatur meist nur als Richtwert

angegeben und kann je nach Leitung, Bauphase und lokalen topografischen Bedingungen variieren.

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird neben dem von Vitruv überlieferten Richtwert von 0,5 % auch das von Plinius beschriebene sehr geringe Gefälle von 0,02083 % berücksichtigt, um zu prüfen, wie sich eine flachere hydraulische Annahme auf die Modellierung auswirkt. Darüber hinaus wird ein steileres Gefälle von 0,8 % getestet, welches sich an archäologischen Befunden der Wasserleitung in der Flur, Gstettenbreite, bei Carnuntum orientiert, wo ein entsprechender Wert nachgewiesen werden konnte. Durch den Vergleich dieser Gefällewerte kann untersucht werden, inwieweit unterschiedliche hydraulische Annahmen den Verlauf der modellierten Trasse beeinflussen.

Tabelle 25 stellt die validierten Ergebnisse der unterschiedlichen Sollgefällen den Ursprungsrouten der Methode G gegenüber.

	Methode G (Vitruv)		Gefälle nach Plinius		Gefälle nach Flur Gstettenbreite	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung a	32,70380804	50,89392931	78,76729511	140,6054088	33,93126365	90,03579841
Wasserleitung b	24,77554647	63,42362728	68,81646661	147,9051009	27,3772229	54,33896437
Wasserleitung c1	21,98499873	45,19204037	20,59779867	45,19204037	19,2684426	45,19204037
Wasserleitung c2	24,36189514	41,90983717	17,13574506	33,44247952	55,35490893	105,8718764
Wasserleitung c3	36,8247043	75,03168689	27,32553147	45,44549948	35,04552714	72,33668592
Wasserleitung d1	153,3761165	216,0562362	52,23857152	167,7721283	29,24594864	67,26112168
Wasserleitung d2	28,87211345	87,34325424	221,2503118	430,3786557	19,63083655	36,43676488
Wasserleitung e	27,11986531	47,00304185	23,6828026	41,4069509	29,65528523	46,98176836
Wasserleitung h	25,5443545	53,13040604	20,22089297	47,8450803	38,16673832	74,88926701
Mean	41,72926694	75,55378437	58,89282397	122,2214827	31,96401933	65,92714304

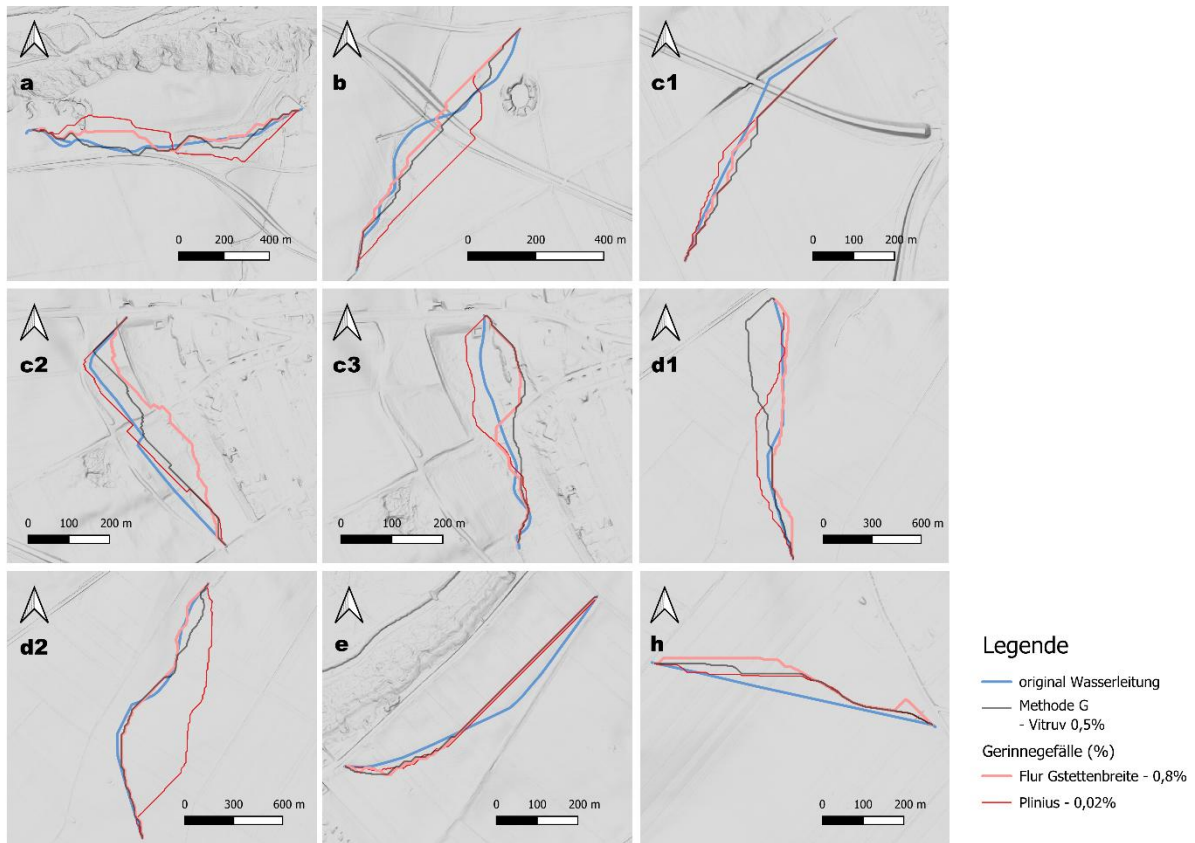


Abbildung 20 Einfluss des Sollgefälle-Wertes auf die modellierte Route.

Toleranz des Kanalgefälles

Der gewählte Parameter erlaubt Abweichungen vom idealen Gefälle, da das in der Literatur häufig zitierte Sollgefälle von etwa 0,5 % nach Vitruv nicht als starre Mindestanforderung implementiert wird. Reale antike Wasserleitungen weisen keine vollständige Baugenaugigkeit auf und zeigen lokale Anpassungen an das Gelände. Zudem belegt die Literatur eine große Variation unterschiedlicher Gefällesteigungen, abhängig von Bauabschnitt und Streckenverlauf. Ein strikt fixes Gefälle wäre daher unrealistisch. Um zu untersuchen, wie stark diese technischen Imperfektionen den modellierten Routenverlauf beeinflussen, werden auch für diesen Parameter Sensitivitätstests durchgeführt.

Tabelle 26 stellt die validierten Ergebnisse der unterschiedlichen Toleranzschwellen den Ursprungsrouten der Methode G gegenüber.

	Methode G ($\pm 20\%$)		Toleranzschwelle $\pm 40\%$		Toleranzschwelle $\pm 60\%$	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung a	32,70380804	50,89392931	33,1418461	54,1324156	32,04603193	53,8635036
Wasserleitung b	24,77554647	63,42362728	24,55412518	63,44049539	24,67577852	63,08697008
Wasserleitung c1	21,98499873	45,19204037	21,57760647	45,19204037	21,58763232	44,4974129
Wasserleitung c2	24,36189514	41,90983717	24,29268609	42,41691955	23,94040902	42,46697938
Wasserleitung c3	36,8247043	75,03168689	36,82245338	75,03168689	36,91278585	75,03168689
Wasserleitung d1	153,3761165	216,0562362	100,752094	214,6584639	102,2660151	214,6936242
Wasserleitung d2	28,87211345	87,34325424	30,06705179	85,57353027	30,38690208	85,5299147
Wasserleitung e	27,11986531	47,00304185	29,36534137	46,97735589	29,98359333	46,98176836
Wasserleitung h	25,5443545	53,13040604	25,5443545	53,13040604	25,53716774	53,13040604
Mean	41,72926694	75,55378437	36,23528432	75,61703488	36,37070177	75,47580735

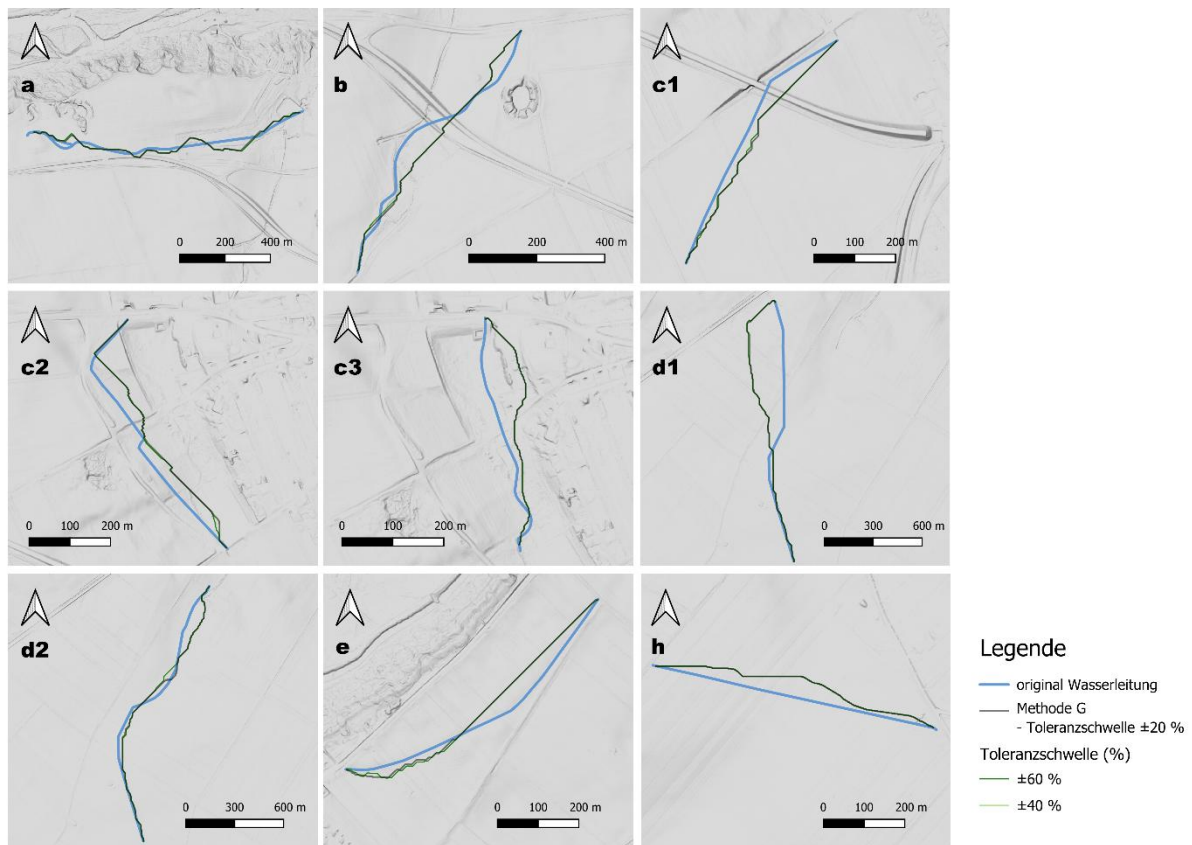


Abbildung 21 Einfluss einer höheren Toleranzschwelle auf die modellierte Route.

Ursprungsintervall

Die dynamische Wahl eines Ursprungsintervalls zur Modellierung eines fließenden Kanalverlaufs sorgt dafür, dass das Gefälle stets lokal berechnet wird. Würde das Gefälle stattdessen von einem festen Ursprungspunkt aus über die gesamte Distanz berechnet, könnte dies zu unrealistischen Zielhöhen führen, da sich Abweichungen über große Entfernungen stark aufsummieren. Der Parameter des Ursprungsintervalls bestimmt dabei, in welchen

Abständen ein neuer lokaler Ursprungspunkt gesetzt wird. Im Ausgangsparameter wird ein lokaler Ursprungspunkt alle 8 m neu gesetzt. Von diesem Punkt aus wird das Sollgefälle erneut berechnet. Dadurch entsteht ein abschnittsweises Referenzsystem für die Zielhöhe. Diese Vorgehensweise kann auch das historische, abschnittsweise Errichten einer Wasserleitung simulieren. Bei antiken Bauprojekten erfolgte die Vermessung oft lokal entlang einzelner Bauabschnitte, anstatt die gesamte Trasse gleichzeitig zu berechnen.

Tabelle 27 stellt die validierten Ergebnisse der unterschiedlichen Ursprungsintervalle den Ursprungsrouten der Methode G gegenüber.

	Methode G (8)		Ursprungsintervall 6		Ursprungsintervall 7		Ursprungsintervall 10		Ursprungsintervall 11		Ursprungsintervall 12	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung a	32,70380804	50,89392931	175,3585708	249,1070644	32,25034453	51,87507737	32,4511041	52,47560201	32,77494024	53,11526013	32,03791876	51,9902257
Wasserleitung b	24,77554647	63,42362728	24,59837593	63,37798175	25,05564068	65,17358924	24,91937251	61,96148369	24,46253816	65,16577262	24,93070858	63,37580097
Wasserleitung c1	21,98499873	45,19204037	21,97153699	46,58794638	20,06531128	42,34295405	20,59987084	42,34295405	22,16095815	45,88891853	20,36744388	42,34295405
Wasserleitung c2	24,36189514	41,90983717	24,03085701	41,02922123	23,88077581	40,58967688	24,56801311	41,78208141	24,22738802	40,29700567	24,71992459	41,38507154
Wasserleitung c3	36,82477043	75,03168689	36,38640575	74,35276895	37,24645812	74,44508253	37,07989245	74,78821588	37,44838047	75,22464555	37,20309568	75,03168689
Wasserleitung d1	153,37611165	216,0562362	100,738579	215,4961853	101,2620425	216,15808	100,9762175	214,3209842	101,4460389	214,1578901	100,0674308	213,944092
Wasserleitung d2	28,87211345	87,34325424	29,03226384	85,9607139	29,98007585	84,95290559	30,08419511	84,82112518	31,86229684	89,24425062	30,52911357	86,83016704
Wasserleitung e	27,11986531	47,00304185	28,6575949	44,16513737	28,91770181	45,56346788	30,76907995	48,39092685	30,87350381	48,39092685	28,04758738	44,16513737
Wasserleitung h	25,5443545	53,13040604	25,16870995	53,13040604	25,28276644	52,06949044	25,20003916	52,07705489	26,28698795	55,26095935	26,33868695	56,07794025
Mean	41,72926694	75,55378437	51,77143269	97,02304725	35,99345744	74,79670266	36,2941983	74,77338091	36,83811472	76,30506994	36,02687891	75,01589731

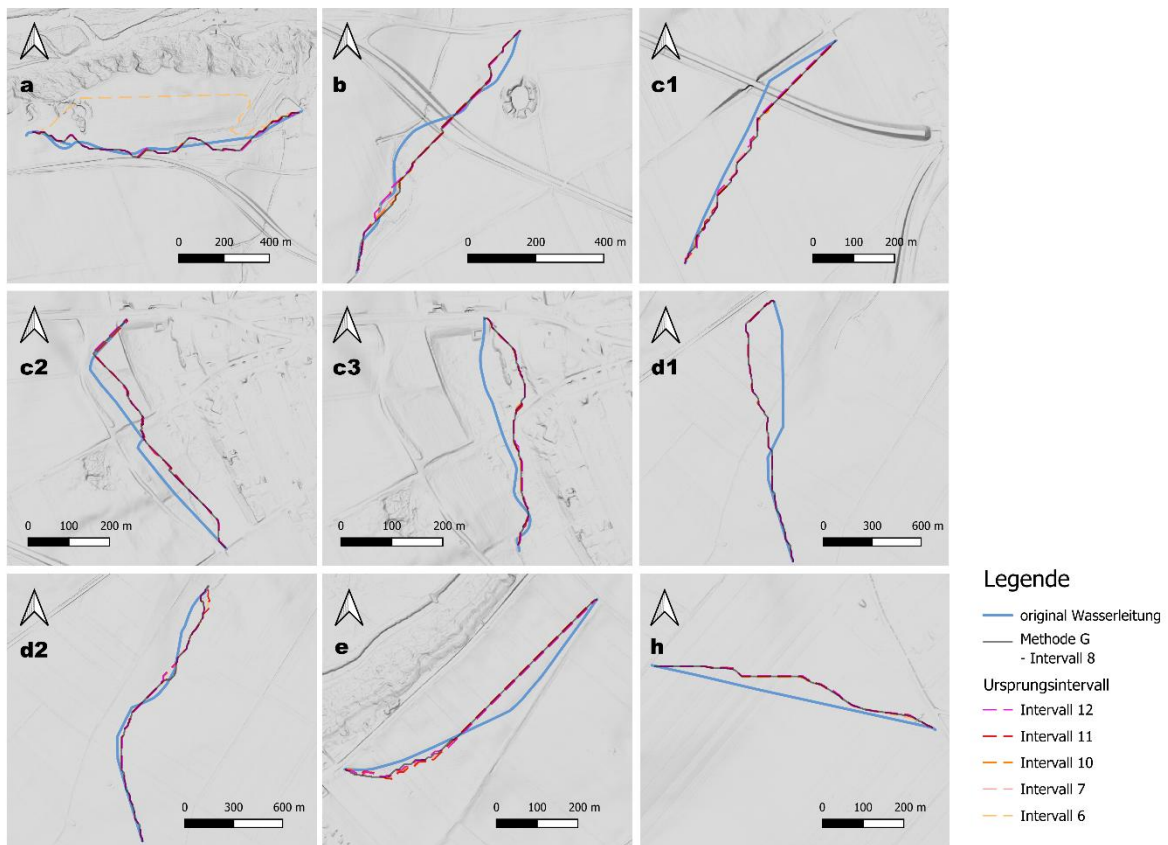


Abbildung 22 Einfluss einer Änderung des Ursprungsintervall-Wertes auf die modellierte Route.

Richtungsänderung

Um Pfade mit geringeren Richtungsabweichungen in Grad (d) zu bevorzugen, werden in der Methode G die Richtungsänderungen zwischen aufeinanderfolgenden Rasterzellen je nach Schwelle unterschiedlich betrafft.

$$f(d) = \begin{cases} 0.8 & \text{für } d < 30^\circ \\ 1.0 & \text{für } 30^\circ \leq d < 45^\circ \\ 1.6 & \text{für } 45^\circ \leq d < 60^\circ \\ 1.8 & \text{für } 60^\circ \leq d < 90^\circ \\ 2.0 & \text{für } d > 90^\circ \end{cases}$$

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse der Richtungsänderung wird untersucht, welchen Einfluss unterschiedliche Schwellenwerte für Richtungswechsel auf das Modellergebnis haben. Zusätzlich zur bestehenden Schwelle bei 30° wird eine weitere Stufe bereits bei 15° Richtungsabweichung eingeführt, um zu prüfen, ob eine frühere Bestrafung den berechneten Routenverlauf beeinflusst.

$$f(d) = \begin{cases} 0.6 & \text{für } d < 15^\circ \\ 0.8 & \text{für } 15^\circ \leq d < 30^\circ \\ 1.0 & \text{für } 30^\circ \leq d < 45^\circ \\ 1.6 & \text{für } 45^\circ \leq d < 60^\circ \\ 1.8 & \text{für } 60^\circ \leq d < 90^\circ \\ 2.0 & \text{für } d > 90^\circ \end{cases}$$

Tabelle 28 stellt die validierten Ergebnisse, bei denen die Richtungsänderung ab einer Schwelle von 15% bestraft wird, den Ursprungsrouten der Methode G gegenüber.

	Methode G (Schwelle bei $\Delta\Theta$ bei $<30\%$)		zus. Stufe $\Delta\Theta$ bei $<15\%$	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung a	32,70380804	50,89392931	47,54614335	94,94523986
Wasserleitung b	24,77554647	63,42362728	25,42764063	68,70909148
Wasserleitung c1	21,98499873	45,19204037	23,91900524	50,82227073
Wasserleitung c2	24,36189514	41,90983717	21,45127709	42,4226404
Wasserleitung c3	36,8247043	75,03168689	36,78835522	75,06329368
Wasserleitung d1	153,3761165	216,0562362	104,8217951	209,5272822
Wasserleitung d2	28,87211345	87,34325424	111,3159772	229,7407295
Wasserleitung e	27,11986531	47,00304185	24,66071079	46,98825811
Wasserleitung h	25,5443545	53,13040604	19,92849332	52,6924751
Mean	41,72926694	75,55378437	46,20659977	96,76792012

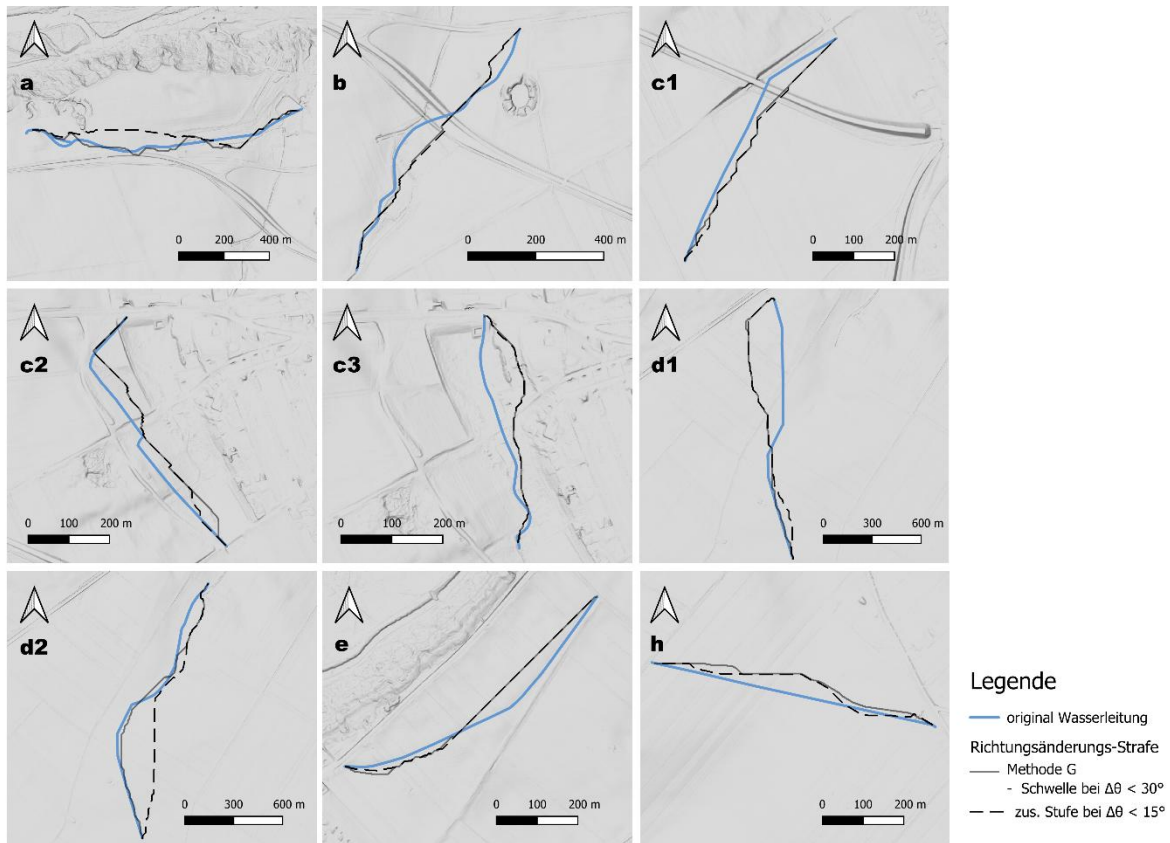


Abbildung 23 Einfluss einer zusätzlichen Schwelle bei $< 15^\circ$ auf die Route.

Einfluss der Straße auf die modellierte Strecke

Obwohl das digitale Höhenmodell durch Interpolation- und Glättungsverfahren möglichst an die antike Landschaft angepasst wurde, könnten Einschnitte moderner Straßen oder Gleise dennoch einen Einfluss auf die Modellierung haben.

Um diesen möglichen Effekt zu überprüfen, wird die modellierte Strecke in zwei Abschnitte unterteilt. Zunächst wird der Abschnitt vom Startpunkt bis zur modernen Infrastruktur berechnet, anschließend der Abschnitt von der Infrastruktur bis zum Zielpunkt. Auf diese Weise lässt sich prüfen, ob und in welchem Ausmaß die moderne Geländeänderung den berechneten Verlauf beeinflusst.

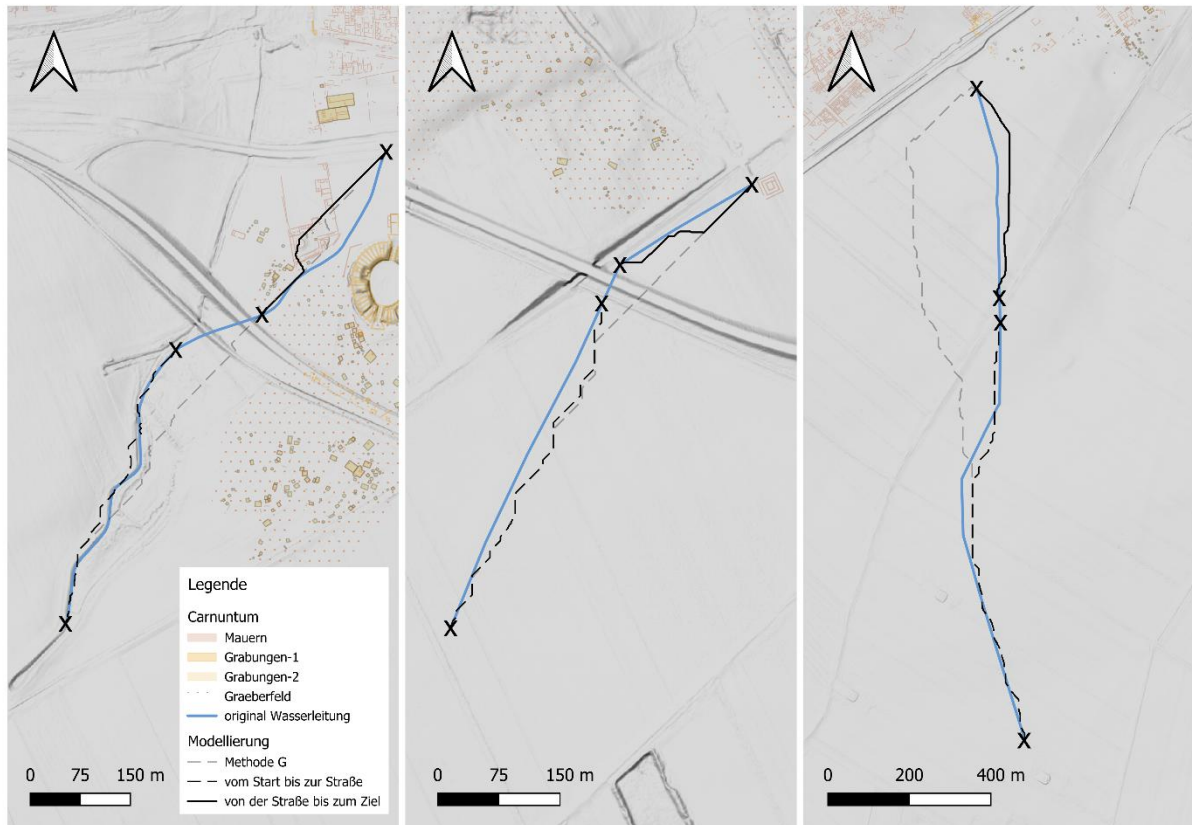


Abbildung 24 Die Abbildung zeigt, wie sich der Routenverlauf ändert, wenn die Strecke jeweils vom Start zur modernen Infrastruktur und von dieser zum Ziel modelliert wird. (Links: Wasserleitung b; Mitte: Wasserleitung c1; Rechts: Wasserleitung d1).

Methode E

Fenstergröße

Dass die Fenstergröße bei Methode E einen erheblichen Einfluss auf die Modellierung hat, wurde bereits von Beck und Choi (2017) diskutiert. In dieser Arbeit wird daher mittels einer Sensitivitätsanalyse untersucht, inwieweit sich die Modellgüte durch unterschiedliche Fenstergrößen beeinflussen lässt.

Tabelle 29 stellt die validierten Ergebnisse der unterschiedlichen Fenstergrößen den Ursprungsrouten der Methode E gegenüber.

	Methode E (9x9)		Fenstergröße 3x3		Fenstergröße 5x5	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung a	56,85018795	78,72022572	68,18233918	96,56721633	51,50095054	93,41747335
Wasserleitung b	52,6707677	122,8159267	169,8212302	214,206554	49,26067836	114,9537822
Wasserleitung c1	46,53427833	45,49989944	254,005669	354,0607571	64,765159	66,00603828
Wasserleitung c2	52,06725492	80,65340258	65,40320696	104,7031488	56,373788	51,92417886
Wasserleitung c3	91,69159665	113,0774165	20,77192489	35,42729321	127,1780677	127,5599529
Wasserleitung d1	87,16793195	122,814308	57,3343599	136,2704991	106,2941198	113,685046
Wasserleitung d2	60,29279383	111,0021696	108,9392045	288,4807472	75,03181149	108,1911137
Wasserleitung e	9,658684872	12,12540529	71,68776102	141,8852135	10,10724839	14,8057718
Wasserleitung h	42,57835846	52,15675404	95,55104412	86,18398757	83,46119942	78,808313
Mean	55,50131718	82,09616755	101,2996378	161,9761574	69,33033585	85,48351891

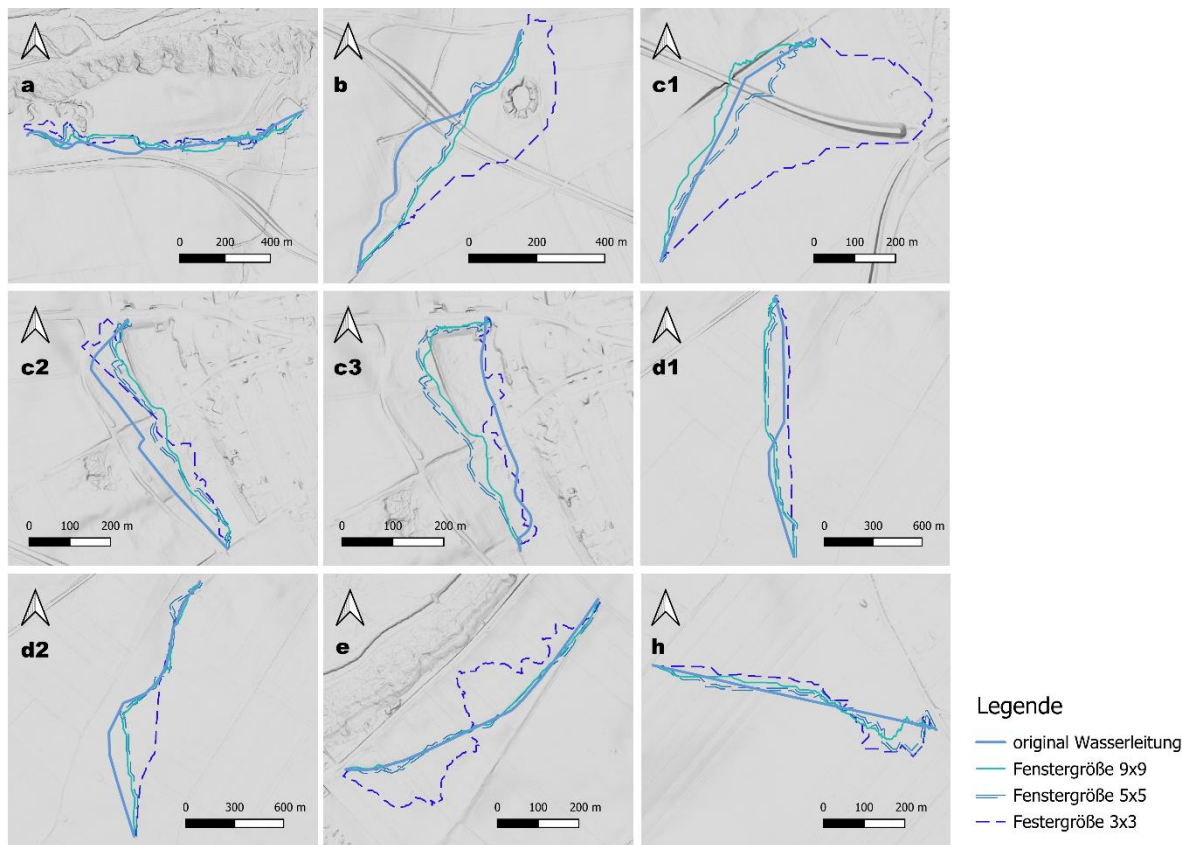


Abbildung 25 Einfluss der Fenstergröße auf die modellierte Route der Methode E.

Übrige Parameter

Um den Einfluss der Parameterwahl bezogen auf Kanalgefälle und der Toleranz zu überprüfen, werden auch jene Parameter einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. In der implementierten Kostenfunktion wird ein Sollgefälle verwendet, um für jede Verbindung zwischen zwei Rasterzellen eine theoretische Trassenhöhe zu berechnen. Dieses Sollgefälle entspricht einer

angenommenen Entwurfsneigung des Kanals und dient als Referenz für die Berechnung von Abtrags- und Aufschüttungsvolumina entlang einer potenziellen Trasse. Die zulässige Abweichung wird durch ein minimales und ein maximales zulässiges Gefälle definiert. Der minimale Hangneigungsparameter stellt die Untergrenze für den kontinuierlichen Wasserfluss dar. In der Methode E wird der Wert (0,05 %) bewusst niedrig angesetzt, um archäologisch nachgewiesene sehr flache Leitungsabschnitte als auch Unsicherheiten des heutigen Geländes zu berücksichtigen. Die Obergrenze wird durch den Parameter der maximalen Hangneigung festgelegt. Der Wert (1.2 %) ist bewusst nicht zu einschränkend gewählt worden, da archäologische Befunde zeigen, dass Wasserleitungen lokal auch deutlich steilere Gefälle aufweisen können.

Tabelle 30 stellt die validierten Ergebnisse der unterschiedlichen Gefälle (%) den Ursprungsrouten der Methode E gegenüber. Bei der Wasserleitung c3 wird, im Gegensatz zu den übrigen Leitungen, mit einer Fenstergröße von 3x3 die Route modelliert.

	Methode E (Vitruv)		Gefälle nach Plinius		Gefälle nach Flur Gstettenbreite	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung a	56,85018795	78,72022572	56,33973522	78,67874353	56,43363633	78,70303239
Wasserleitung b	52,6707677	122,8159267	52,5372498	122,8137683	52,6707249	122,8162458
Wasserleitung c1	46,53427833	45,49989944	46,4362539	45,4367148	46,45115646	43,66376928
Wasserleitung c2	52,06725492	80,65340258	52,004017	80,16615452	52,04502787	80,6332504
Wasserleitung c3 (3x3)	91,69159665	113,0774165	20,79570887	36,29782999	20,77163487	35,42729321
Wasserleitung d1	87,16793195	122,814308	87,15666242	122,8132706	87,17315662	122,8119513
Wasserleitung d2	60,29279383	111,0021696	60,36425331	111,0055223	60,20704766	111,0028339
Wasserleitung e	9,658684872	12,12540529	6,165755971	12,05005245	6,265371667	12,12337994
Wasserleitung h	42,57835846	52,15675404	62,47560254	52,13161297	62,51537421	49,68912775
Mean	55,50131718	82,09616755	49,36391545	73,4881855	49,39257006	72,98565377

Tabelle 31 stellt die validierten Ergebnisse bei einer Änderung der Parameter max. Hangneigung bzw. min Hangneigung den Ursprungsrouten der Methode E gegenüber. Bei der Wasserleitung c3 wird, im Gegensatz zu den übrigen Leitungen, mit einer Fenstergröße von 3x3 die Route modelliert.

	Methode E (max. 1,2% min. 0,05%)		Max. Hangneigung 1,0%		Max. Hangneigung 0,8%		Min. Hangneigung 0,2%		Min. Hangneigung 0,1%	
	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]	LSED [m]	DFD [m]
Wasserleitung a	56,85018795	78,72022572	64,22169156	80,80894201	65,04629824	83,50623171	56,92941422	78,82857441	56,83674224	78,74198086
Wasserleitung b	52,6707677	122,8159267	53,05938818	123,5162142	52,65802449	124,8931756	52,59647871	121,3365905	52,5670635	122,822546
Wasserleitung c1	46,53427833	45,49989944	61,7013877	46,69788852	81,47150708	58,6341664	48,60916835	51,23506012	46,29968987	45,46636624
Wasserleitung c2	52,06725492	80,65340258	43,41129116	73,5485919	52,06876645	68,82424465	52,12820898	80,5205364	52,06294965	80,64873703
Wasserleitung c3 (3x3)	91,69159665	113,0774165	23,87322165	39,75792029	22,46799098	38,5757802	18,93838903	35,55468472	20,39068376	35,49276585
Wasserleitung d1	87,16793195	122,814308	111,4797793	121,8889871	137,8466856	130,633309	86,16154425	117,3977572	86,52573374	117,2953324
Wasserleitung d2	60,29279383	111,0021696	76,76419067	77,42404472	100,3944914	71,77115382	61,27157037	108,1338492	60,52929879	111,0566174
Wasserleitung e	9,658684872	12,12540529	5,563790283	10,04864305	5,329187225	9,027140291	5,875814449	12,33723543	6,42549557	12,08541072
Wasserleitung h	42,57835846	52,15675404	80,08859313	70,0506676	97,64482189	79,95444907	62,39402081	52,05994618	61,34402773	52,61190608
Mean	55,50131718	82,09616755	57,79592596	71,52687771	68,32530815	73,97996119	49,43384546	73,04491491	49,22018721	72,91351807

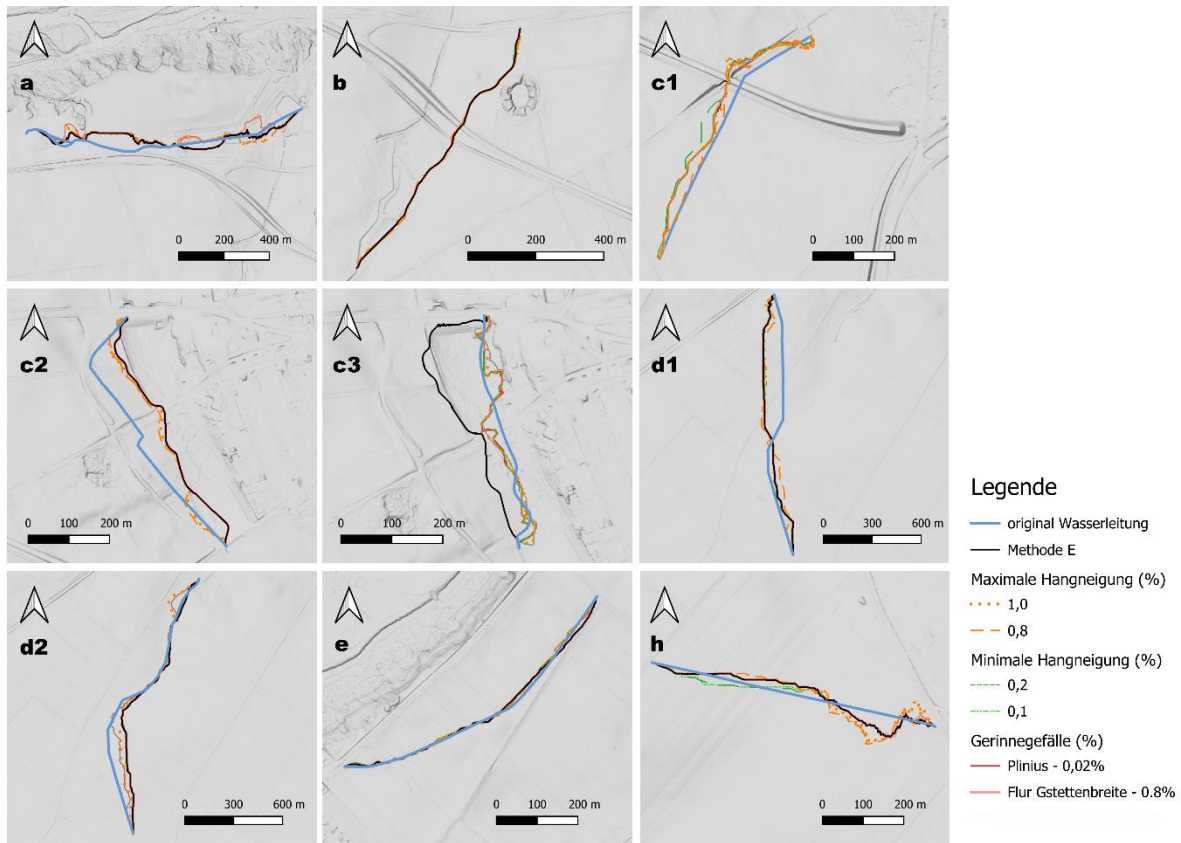


Abbildung 26 Einfluss der übrigen Parameter auf die modellierte Route der Methode E.

Zusammenfassung der Sensitivitätsanalysen (Methode G und Methode E)

Die Sensitivitätsanalysen zeigen, dass sowohl Methode G als auch Methode E in einem breiten Variationsbereich der Parameter robuste und konsistente Trassen modellieren. Gleichzeitig zeigt sich, dass bei beiden Ansätzen sich die Fenstergröße am stärksten auf den modellierten Routenverlauf auswirkt. Bei Methode G zeigt sich zudem ein deutlicher Einfluss der Wahl des Kanalgefälles auf den resultierenden Pfadverlauf. Die Toleranz des Sollgefälles (Methode G), die minimalen und maximalen Hangneigungen (Methode E) sowie das Sollgefälle (Methode E) führen hingegen nur zu geringfügigen Veränderungen, ohne die grundlegende Linienführung wesentlich zu verändern. Das Ursprungsintervall und die Variation der Richtungsänderungsschwelle (beides bei Methode G) beeinflussen den Pfadverlauf lediglich auf einzelnen Streckenabschnitten.

Fallbeispiel – Der „Große Kanal“

Aufgrund der Länge der untersuchten hypothetischen Wasserleitung sowie wiederholter Speicher- bzw. Laufzeitprobleme des Python-Skripts der Methode G konnte die Least-Cost-Path-Berechnung für den Großen Kanal nicht in einem einzigen Durchlauf durchgeführt werden. Daher wurde die Strecke in Teilabschnitte unterteilt. Für die Teilabschnitte wurden die von Nedelik und Petznek (2017) beschriebenen Trassenpunkte herangezogen. Die Berechnung der kostengünstigen Routen erfolgte jeweils vom Startpunkt bis zu einem Trassenpunkt (1–k) sowie vom jeweiligen Trassenpunkt bis zum Zielpunkt (k–12). Insgesamt wurden auf diese Weise 10 Segmentkombinationen berechnet. Die resultierenden Trassen sind in Abbildung 28 dargestellt. Die Validierung der Ergebnisse erfolgt auf Grundlage der Lock-Step Euclidean Distance (LSED) zwischen der modellierten Trasse und der hypothetischen Kanalachse. Die daraus abgeleiteten statistischen Kennwerte basieren auf allen Segmentkombinationen und erlauben eine Annäherung an die Frage, ob ein solcher Großkanal grundsätzlich plausibel oder unwahrscheinlich ist. Die mittlere Abweichung zwischen modellierter Trasse und Referenzlinie beträgt 59,65 m. Die Standardabweichung liegt bei 13,44 m. Das 95-%-Quantil beträgt 79,13 m. Die minimale Abweichung liegt bei 41,37 m, während die maximale Abweichung 80,61 m erreicht.

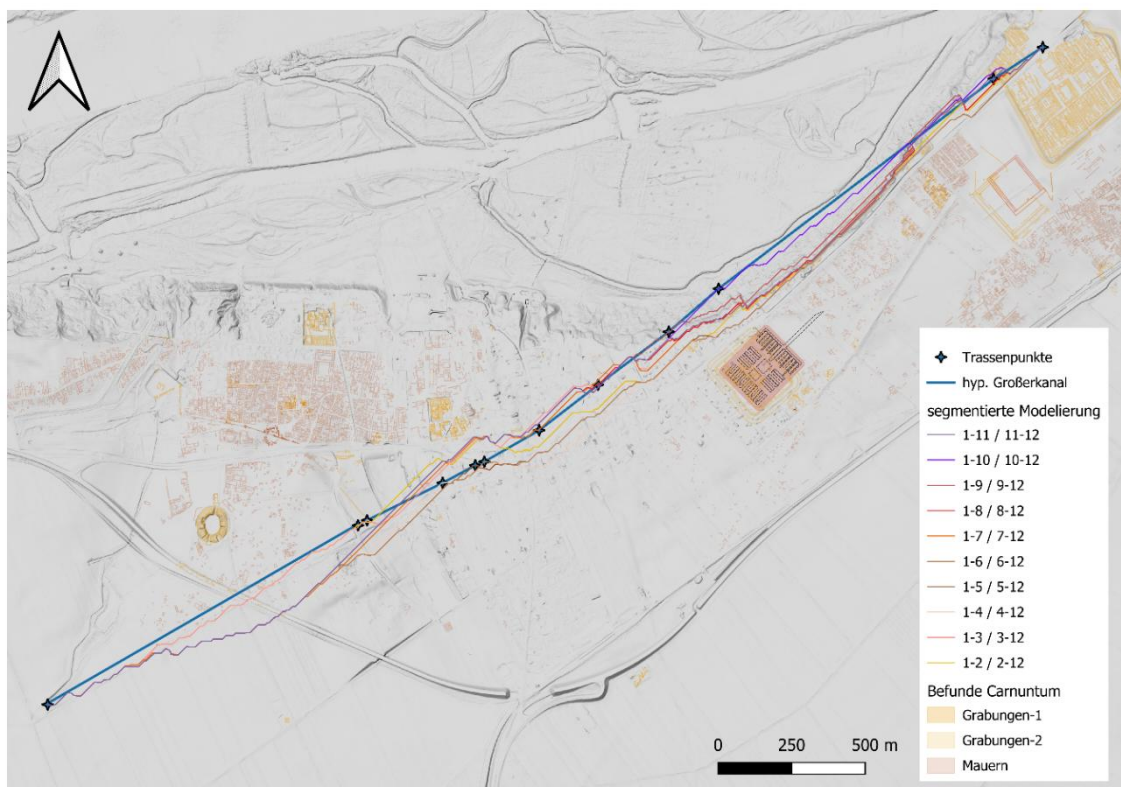


Abbildung 27 Überlagerte Darstellung aller berechneten Teilabschnitte zur visuellen Beurteilung der Abweichungen entlang des gesamten Trassenverlaufs.

Tabelle 32 Statistische Kennwerte der LSED-Ergebnisse basierend auf der Methode G.

Kennwert	Mittelwert	Standardabweichung	95%-Quantil	Minimum	Maximum
Wert (m)	59,65	13,44	79,13	41,37	80,61

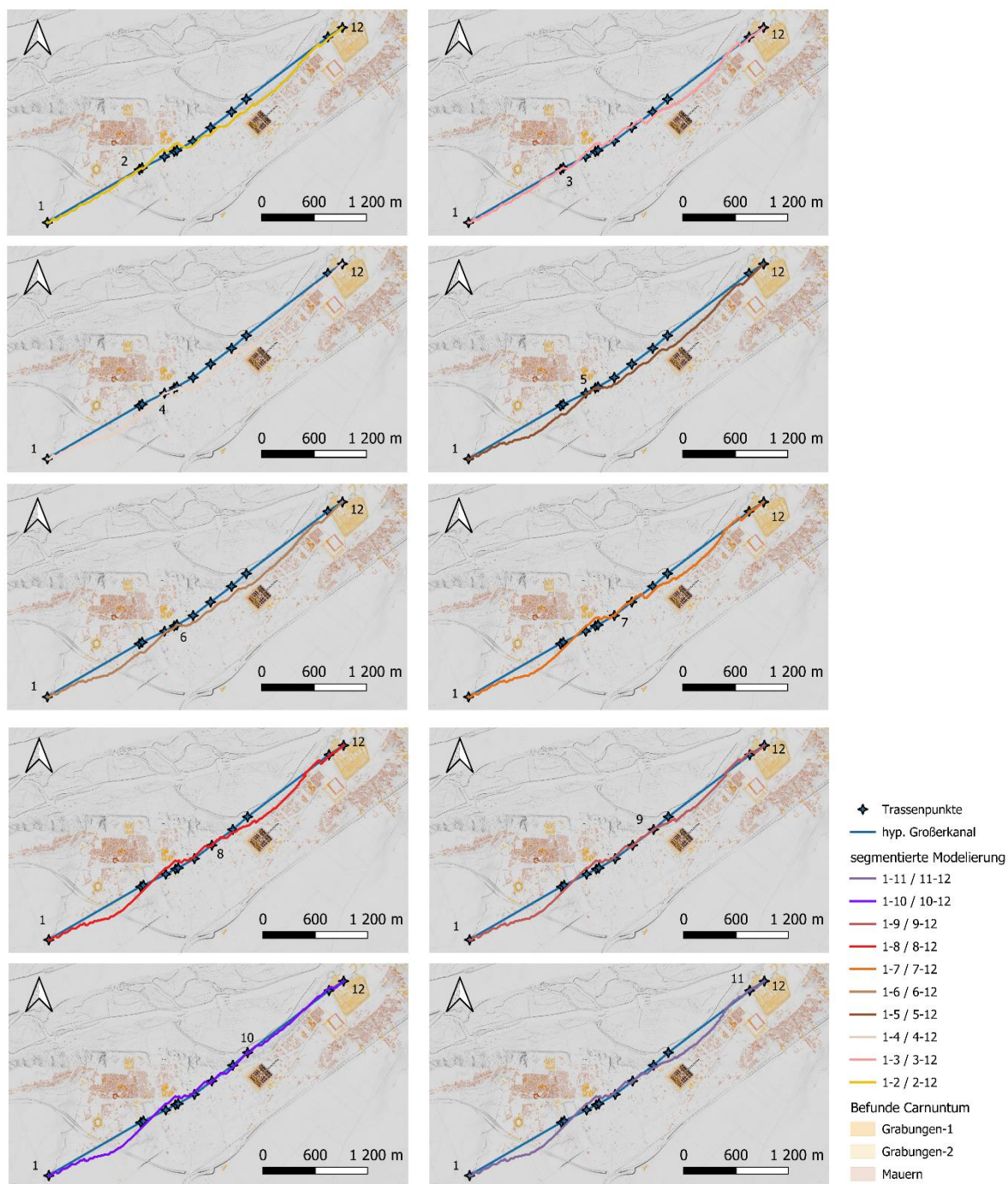


Abbildung 28 Gegenüberstellung der einzelnen berechneten Teilstrecken zur visuellen Analyse der jeweiligen Trassenverläufe.

Diskussion

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen deutlich auf, dass sich Least-Cost-Path-Methoden zur Modellierung des Verlaufs römischer Wasserleitungen auf Basis der Topografie eignen. Die Ergebnisse sind aber, wie sich zeigt, auch stark von der Wahl der Parameter abhängig. Dennoch kann, auf Basis dieser Annahme, die aufgestellte Hypothese, dass römische Wasserversorgungsleitungen nach dem Prinzip der Kostenminimierung konstruiert wurden, eindeutig gestützt werden. Vor allem, auch weil moderne LCP-Modelle für Pipelines verdeutlichen, dass der Verlauf wasserführender Infrastrukturen durch das Zusammenspiel von Gefälle, topografischen Hindernissen und bautechnischen Eingriffen bestimmt wird (vgl. Ponnathota & Rajan, 2023; Raj & Bansal, 2024; Sarmiento, 2022). Diese Zusammenhänge lassen sich auch für römische Wasserleitungen annehmen.

Grenzen der Topografie und historische Veränderungen

Abweichungen einzelner modellierter Routen könnten teilweise auf historische Geländeänderungen zurückzuführen sein, wie sie durch ein starkes Erdbeben in Carnuntum verursacht wurden (Nedelik & Petznek, 2017). Solche durch Erdbeben entstandene Veränderungen werden in den LCP-Algorithmen nicht berücksichtigt, könnten jedoch eine mögliche Erklärung, für die in einigen Teststrecken beobachteten Abweichungen liefern. Es wurde versucht über Interpolation das Gelände etwas an die historischen Gegebenheiten anzupassen. Für eine exakte Anpassung der antiken Höhenverhältnisse wären jedoch historische Höhenangaben erforderlich gewesen. Zudem beeinflussten auch nach der Interpolation moderne Strukturen wie Straßen oder Gebäude die Geländeoberfläche. Darüber hinaus verliefen viele römische Wasserleitungen unterirdisch, sodass sie nicht zwangsläufig der Oberflächentopografie folgten. Über Cut/Fill-Algorithmen wurde versucht die „Kanalstruktur“ möglichst abzubilden. Außerdem weist der Gefälleverlauf in den originalen Wasserleitungen Ungleichmäßigkeiten auf. Dieser Verlauf entstand womöglich aufgrund moderner Eingriffe sowie moderner Gegebenheiten im Gelände. Leitungen müssen konstante Fließgeschwindigkeiten gewährleisten, unerwünschte Sedimentation vermeiden und eine Zugänglichkeit für Wartungsarbeiten ermöglichen. Die Planung von Infrastrukturen gehen weit über ein rein topografisches Kriterium hinaus und muss immer als komplexer, mehrdimensionaler Prozess von Entscheidungen gesehen werden (vgl. Hodza & Butler, 2022; Makrakis et al., 2024). Daher sind Abweichungen zwischen LCP-Route und real

nachgewiesener Leitungsverläufe nicht als Fehler zu interpretieren, sondern viel mehr als methodische Grenze eines rein der Topografie folgenden Ansatzes zu verstehen (Amini et al., 2024).

Allgemeine Grenzen von LCP-Modellen

Ergebnisse von LCP-Studien sind häufig durch Unsicherheiten im digitalen Geländemodell geprägt (Lewis, 2021). Darüber hinaus weist Lewis (2024) darauf hin, dass LCP-Ergebnisse häufig mehrere Interpretationen zulassen. Unterschiedliche Kostenfunktionen, die eigentlich verschiedene Hypothesen repräsentieren (z. B. Minimierung von Energie vs. Minimierung von Zeit), können dennoch nahezu identische Pfade erzeugen. Umgekehrt können aber auch gleiche Hypothesen wiederum zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Dieses Muster spiegelt sich auch in den Ergebnissen wider. Obwohl mehrere Methoden ähnliche Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel die Hangneigung als primären Kostenparameter aufweisen, liefern sie doch sehr unterschiedliche Resultate.

Die Modellgüte hängt nämlich entscheidend von der Parametrisierung ab (vgl. Chen et al., 2020; Herzog, 2020). Die richtigen Kostenparameter auszuwählen ist entscheidend für die Genauigkeit von LCP-Modellen (vgl. Canosa-Betés, 2016; Güimil-Fariña & Parcero-Oubiña, 2015; Rademaker et al., 2012). Schon kleine Änderungen in Randbedingungen führen häufig zu völlig anderen optimalen Routen (vgl. Medrano, 2021; Sarmiento, 2022). Auch Verhagen (2013) betont, dass LCP-Modelle stark von Modellannahmen abhängig sind. Zum Beispiel führt die Wahl der Rasterrepräsentation zu erheblichen Pfadunterschieden (Medrano, 2021), was sich in den Sensitivitätstests (vgl. Fenstergröße und Kanalgefälle) der vorliegenden Studie, teilweise widerspiegelt. Aufgrund der Bevorzugung von niedrigerem Gelände. Klassische LCP-Modelle liefern oft vereinfachte Routen, die nicht immer mit realen Trassen übereinstimmen (vgl. Durmaz et al., 2019; Amini et al., 2024), weil sie niedrigere Abschnitte im Gelände mit möglichst wenigen Unterschieden in der Höhe bevorzugen. LCP-Modelle folgen häufig sanften Hängen, Bergrücken und flachen Geländebereichen, wohingegen bei realen Trassen auch andere Faktoren berücksichtigt wurden (Durmaz et al., 2019). Jene Modelle versagen nämlich häufig dort, wo bautechnische oder geotechnische Faktoren nicht berücksichtigt werden (Fernández, 2021; Tirmizi et al., 2024). Zusätzlich neigen LCP-Algorithmen dazu, möglichst eine direkte Route vom Start- bis zum Zielpunkt zu modellieren. Im Vergleich sind die Modelle dadurch oft gradliniger im Verlauf als historische Routen (Herzog, 2020). Cut/Fill-Algorithmen

versuchen bautechnische Faktoren zumindest etwas nachzubilden. So könnte die hohe Modellgüte der Methode G und E, im Vergleich zu den anderen Methoden, auf diese bautechnische Optimierung zurückzuführen sein. Außerdem führen traditionelle, rasterbasierte LCP-Algorithmen zu systematischen Verzerrungen, indem sie Distanzen und damit verbundene Kosten überhöhen (vgl. Chen et al., 2020; Herzog, 2010). Häufig entstehen künstlich verlängerte Wege durch Zickzack Bewegungen. Eine individuelle Parametrisierung über Hangneigung, Gefälle und Erdbewegung ist daher zwingend notwendig. Auch kann die Wahl der technischen Parameter, so zum Beispiel Steigungsschwellen, Fenstergrößen und andere Kostenfunktionen, Zellen im Suchraum ausschließen und die Modelle verfälschen (Amini et al., 2024). Die vorliegende Arbeit verwendet zum Beispiel Toleranzschwellen, um einen möglichen Ausschluss über strikte Barrieren zu vermeiden. Die Abweichungen zwischen den Methoden A–G bestätigen aber auch, dass LCP-Ergebnisse stark von Modellannahmen abhängen (vgl. Polla, 2009; Verhagen, 2013). Die besonders guten Ergebnisse der Methode G und E, bedeuten noch lange nicht, dass sie „richtig“ sind. Vielmehr liefern die gewählten Parameter nur die plausibelsten Rekonstruktionen im Vergleich zu den anderen Methoden. Eine verbesserte Anpassung der Parameter könnte gegebenenfalls sogar noch bessere Ergebnisse liefern als jene dieser Untersuchung.

Abschließend ist festzuhalten, dass in der Archäologie GIS-basierte Modelle häufig nur ein heuristisches Werkzeug darstellen und reale Wege sowie ihre Zielpunkte meistens unbekannt sind (Quirós et al., 2024). Entsprechend vergleichen diese Studien ausschließlich unterschiedliche Modellierungsansätze miteinander, ohne diese gegen archäologische Strukturen zu validieren. Im Gegensatz dazu ermöglicht die vorliegende Arbeit durch den Abgleich der modellierten Trassen mit den tatsächlich erhaltenen römischen Wasserleitungen (LSED/DFD) eine direkte Bewertung der Modellgüte und damit eine deutlich robustere Aussage über die Eignung verschiedener LCP Methoden zur Rekonstruktion antiker Infrastruktur. Die Verlässlichkeit der Wasserleitungsmodelle wird in dieser Studie, abgesehen durch die Validierung, auch durch die Gegenüberstellung mehrerer Methoden erhöht. Dort wo Modelle voneinander abweichen, entstehen alternative Hypothesen, die archäologisch überprüft werden könnten (vgl. Murekatete & Shirabe, 2021).

Vergleich der Methoden A–G

Die LCP-Routen der vorliegenden Studie folgen über große Strecken hinweg dem archäologisch nachgewiesenen Leitungsverläufen, was darauf hinweist, dass die tatsächlichen Trassen stark durch topografische Kostenfaktoren beeinflusst waren. Besonders deutlich wird dies bei den Methoden D, E und G, die im Durchschnitt die geringsten Abweichungen aufweisen und somit die beste Annäherung an die Originalleitungen erreichen.

Methode G erzielt im Gesamtvergleich die geringsten durchschnittlichen Abweichungen in ihren LSED- und DFD-Ergebnissen. Methode E erreichte den zweitbesten DFD-Wert, was auf eine kleinste maximale Abweichung verweist. Die Methode B weist zwar im Vergleich zu Methode D geringere durchschnittliche LSED- und DFD-Werte sowie im Vergleich zu Methode E einen geringeren durchschnittlichen LSED-Wert auf, dennoch erscheint sie in der visuellen Übereinstimmung insgesamt weniger deckungsgleich mit den originalen Wasserleitungen.

Dies deutet darauf hin, dass aggregierte Kennwerte die tatsächliche Übereinstimmung nur eingeschränkt widerspiegeln. Neben der Betrachtung durchschnittlicher LSED- und DFD-Werte ist daher sowohl eine visuelle Analyse der modellierten Trassen als auch eine Auswertung der Validierungsergebnisse auf Einzelfallebene erforderlich. Die Durchschnittswerte bei der Validierung mehrerer Teststrecken können auffällige Abweichungen nicht genau wiedergeben. Um ein besseres Bild über die bestehenden Methoden zu bekommen, sollten die Ergebnisse auch immer einzeln interpretiert werden. Vor allem, weil Methoden mit insgesamt guten Ergebnissen, insbesondere die Methode G, auf einzelnen Strecken zum Teil deutliche Abweichungen aufweisen, die sowohl in den Messgrößen als auch in der visuellen Übereinstimmung sichtbar werden.

Beim Betrachten der einzelnen archäologisch nachgewiesenen Wasserleitungen ist auffällig, dass auf Basis der heutigen Topografie keine davon ein durchgehend gleichmäßiges Gefälle aufweist. Stattdessen treten Steigungs- bzw. Gefällewerte zwischen 0,01 % und 3,5 % auf. Da viele Strecken unterirdisch verlaufen, ist eine Bestimmung des tatsächlichen Gefälles allein auf Grundlage der Topografie jedoch nur eingeschränkt möglich. Hier zeigt sich auch eines der zentralen Probleme der vorliegenden Modellierung, da die verwendeten Ansätze die Hangneigung teilweise direkt als Parameter für die Berechnungen berücksichtigen. Auch der Einsatz von Cut-/Fill- Algorithmen konnte dieses Problem nur bedingt kompensieren. Insgesamt zeigen die modellierten Strecken ein deutlich gleichmäßigeres Gefälle von etwa

0,1 % bis 1,5 %. Dadurch verdeutlicht sich die Tendenz, dass LCP-Methoden kostengünstigere Routen modellieren. Dies ist für die Optimierung moderner Infrastrukturen zwar wünschenswert aber nicht für die Rekonstruktion historischen Wasserleitungen.

Methoden basierend auf Hangneigung/Steigung

Hervorzuheben ist, dass die auf einem Klassifikationsschema basierende Methode D gute Ergebnisse liefert. Die erstellten LCP-Pfade verlaufen sehr nahe an den Originaltrassen, weisen aber eine geringere Glättung und zahlreiche Richtungsänderungen auf, was zu einem charakteristischen Zickzackmuster führt. Diese zickzackförmigen Richtungsänderungen lassen sich vermutlich auf rasterbasierte Effekte der LCP-Berechnung zurückführen und stellen ein bekanntes Problem dar (vgl. Amini et al., 2024; Chen et al., 2020; Kang & Lee, 2017). Der hohe DFD-Wert bei der Validierung von der Wasserleitung b (127,5 m) und e (187,7 m), lässt sich bei der Methode D plausibel anhand im Geländemodell deutlich sichtbaren Vertiefungen erklären. Bei der Wasserleitung c3 erkennt der Algorithmus den geraderen Verlauf der Wasserleitung c2 als kostengünstiger.

Bemerkenswert ist zudem, dass auch die Methoden A-C, die ursprünglich zur Modellierung römischer Wegstrukturen entwickelt wurden, im visuellen Vergleich gute Ergebnisse erzielen. Insbesondere die Methoden A und C rekonstruieren bei der Wasserleitung a sehr präzise die anfängliche Krümmung in südlicher Richtung. Methode A folgt darüber hinaus der Leitung c1 abschnittsweise nahezu deckungsgleich, wenn auch weniger geglättet. Alle drei Methoden zeigen zudem eine überraschend hohe Modellgüte bei der Wasserleitung c3. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Trassenführung der LCP-Pfade unter Berücksichtigung der Kostenparameter teilweise Ähnlichkeiten mit römischen Straßen aufweist, insbesondere in Bezug auf die Vermeidung hoher Steigungen.

Die von den Methoden A-C modellierten LCP-Pfade weisen im Vergleich zu den archäologisch nachgewiesenen Leitungen größere Distanzen auf, bei denen ausgreifende Kurven und Umwege zur Reduktion von Steigungskosten in Kauf genommen werden. Während dies für die Abbildung menschlicher Wegwahl realistisch ist, erweist sich dieser Ansatz für die Planung von Wasserleitungen als nur eingeschränkt geeignet, da längere und weniger direkte Trassenführungen die Aufrechterhaltung eines gleichmäßigen Wasserflusses erschweren.

Zusammenfassend wird deutlich, dass bereits einfache, auf Steigungsklassen basierende Modelle (insbesondere Methode D) eine überraschend hohe räumliche Übereinstimmung mit den archäologisch belegten Wasserleitungen erzielen. Dies entspricht den Annahmen von Murekatete und Shirabe (2021), wonach selbst einfache Modelle robuste Pfade erzeugen können, obwohl die Kostenwerte eher vereinfachte Abstufungen sind und sich daher nur eingeschränkt addieren lassen.

Methoden basierend auf Abtrag- und Auffüllungsoperationen

Im Vergleich zu den rein hangneigungsbasierenden Methoden, insbesondere D, zeigt Methode E teilweise eine bessere visuelle Überlappung mit den Originalstrecken und weicht weniger stark ab. Dadurch ist der DFD-Wert deutlich geringer. Der leicht erhöhte durchschnittliche LESD-Wert lässt sich aufgrund der geringen Übereinstimmung zwischen Modell und den Wasserleitungen a und d1 erklären. Zu beobachten ist auch eine deutlich stärkere Glättung der Pfade. Dadurch sind zwar Zickzackbewegungen reduziert, kleinere topografische Details und Abzweigungen, wie im Fall der Wasserleitung d1, werden jedoch vernachlässigt. Methode E erfasst nicht die Abzweigung im mittleren Streckenverlauf und verläuft stattdessen nahezu gerade von Startpunkt bis zum Zielpunkt. Im Vergleich dazu schafft es Methode D diese Abbiegung zumindest teilweise zu berücksichtigen, indem der Pfad weiter nördlich entlang der modernen Straße verläuft. Allerdings wird wiederum die Wasserleitung c1 in einem geringen Abstand überraschend gut wiedergegeben. Die Leitung e wird zudem nahezu vollständig im realen Verlauf modelliert und stellt somit die beste Modellierung dieser Leitung dar.

Die Ergebnisse der Methoden F(A) und F(B) zeigen, dass sie häufig deutlich von den Originalwasserleitungen abweichen. Die modellierten Pfade verlaufen teilweise in großer Distanz zu den archäologisch nachgewiesenen Leitungstrassen. Zu beobachten lässt sich dabei eine auffällige gegengleiche Abweichung der beiden Methoden. In bestimmten Abschnitten liegt die Methode F(A) näher an der Originalleitung in anderen Fällen zeigt sich eine bessere Übereinstimmung bei F(B). Vor allem wird das deutlich auf den Trassen der Leitung d. Während F(A) bei der Leitung d1 weiter abweicht, weicht F(B) bei der Leitung d2 deutlich ab. Bei der Leitung c3 verlaufen die durch die Methoden F(A) und F(B) modellierten LCP-Pfade jeweils spiegelbildlich zur Originaltrasse. Während der Pfad von F(A) überwiegend östlich der Leitung verläuft, folgt der durch F(B) berechnete Pfad einer westlichen Parallelführung.

Dadurch entsteht der Eindruck, dass jeweils nur ein Teilaspekt der archäologischen Leitungen korrekt erfasst wird, während andere Abschnitte deutlich verfehlt werden.

Die hohe Modellgüte von Methode G erklärt sich aus der Multiplikation der Methoden F(A) und F(B), wodurch extreme Abweichungen deutlich abgeschwächt werden. Der resultierende LCP-Pfad der Methode G folgt somit einem „Mittelwert“ und vermeidet starke Ausreißer. Infolgedessen zeigt Methode G sowohl visuell als auch in der Validierung die beste Annäherung an die Trassen der originalen Wasserleitungen.

Die modellierten Trassen verlaufen, mit Ausnahme der Wasserleitung d1, weitgehend sehr nah an den Originalverläufen, wenn auch teilweise zu stark geradlinig zum Zielpunkt. Ob der Verlauf durch moderne Straßen im interpolierten Geländemodell beeinflusst wird, kann über eine Trennung des Pfades bis zur Straße und von dieser weiter zum Zielpunkt überprüft werden. Das Ergebnis kann den möglichen Einfluss dabei nicht eindeutig ausschließen, da in diesen Fällen teilweise eine höhere Übereinstimmung mit den Originaltrassen erreicht wird.

Beim direkten Vergleich der Methodenergebnisse wird allerdings deutlich, dass die ideale Methodenwahl je nach Teststrecke variiert und keine Methode sich als perfekt herausstellt. Methode G liefert aber im Durchschnitt die besten Ergebnisse. Abgesehen von der Wasserleitung d1 liegt der höchste LESD-Wert bei 36,8 m (Leitung c3). Das höchste DFD-Ergebnis von 87,3 m ergibt sich bei d2, ohne Berücksichtigung von d1. Hier weicht der LCP-Pfad im oberen Abschnitt leicht von dem Originalverlauf ab und folgt teilweise einen steileren Bereich. Möglicherweise bewertet die Methode die Abweichung insgesamt als kostengünstiger, da großteils das Gefälle unter 1 % liegt, während im Vergleich die Originalwasserleitung auf diesem Stück überwiegend ein Gefälle zwischen 1 % und 1,5 % aufweist. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich auch bei der Wasserleitung h, bei der die Methode G, sofern man das Gefälle als Kostenfaktor berücksichtigt, eine leicht abweichende, jedoch topografisch günstigere Trasse wählt. Am besten konnten die Trassen der Leitung a und d2 durch die Methode G rekonstruiert werden.

Als eine mögliche Anpassung für eine effizientere Modellierung der Leitung h könnte sich eine zusätzliche Bestrafung von Richtungsänderungen bereits bei sehr kleinen Winkeln ($< 5^\circ$) anbieten. Dadurch lässt sich der LCP-Pfad geradliniger modellieren, würde aber die Genauigkeit der anderen Streckenabschnitte negativ beeinflussen.

Ergebnisse der Validierung

Eine Betrachtung der Validierungsergebnisse auf Einzelfallebene verdeutlicht, dass die Modellgüte stark streckenabhängig ist. So zeigt sich, dass Methode D insbesondere bei den Wasserleitungen a, c1 und c2 sehr geringe Abweichungen erzielt. Bei den Strecken d1 und h erbrachte die Methode D sogar die besten Ergebnisse. Methode C erzielt besonders bei der Wasserleitung c3 die geringsten Werte und bildet dort die Trasse am präzisesten nach. Methode E sticht bei der Wasserleitung e besonders hervor, bei der beide Validierungswerte mit Abstand die niedrigsten Werte aller Methoden erreichen. Die starke Glättung des Pfades kann somit in bestimmten Fällen zu besonders realitätsnahen Modellierungen führen.

Die Methoden F(A) und F(B) zeigen ein stark uneinheitliches Bild. Zwar erzielt F(A) bei der Wasserleitung c2 das beste Einzelergebnis aller untersuchten Methoden, jedoch weisen beide Ansätze über die übrigen Strecken hinweg überwiegend hohe Abweichungen auf. Dies bestätigt die zuvor getroffenen Beobachtungen, dass beide Methoden jeweils nur Teilaspekte der realen Trassenführung erfassen.

Methode G erreicht schließlich bei einem Großteil der Leitungen (a, b, c1, c2, d2 und h) die besten oder zweitbesten Ergebnisse und zeigt damit eine hohe Robustheit gegenüber streckenspezifischen Unterschieden. Aber es treten auch hier, vor allem bei der Leitung d1, deutliche Abweichungen auf. Dies zeigt sehr gut, dass auch die beste Methode nicht alle Trassen gleichermaßen präzise rekonstruieren kann. Die Tatsache, dass die Methoden G, E und D ähnliche, aber nicht identische Ergebnisse liefern, deckt sich mit Lewis' Befunde (Lewis, 2021; Lewis, 2024), wobei häufig mehrere plausible Routen auftreten. Auch die Abweichungen in steileren Abschnitten der Teststrecken spiegeln die Sensitivität gegenüber einer Variation in den Höhenwerte wider.

Höhen- und Steigungsprofile

Für die Bewertung der topografischen Plausibilität von modellierten LCP-Pfaden ist neben einer Betrachtung visueller Gegenüberstellungen und der Validierungsergebnisse ergänzend auch eine Interpretation von Höhen- und Steigungsprofil sinnvoll. Der Vergleich der originalen Wasserleitungen mit den durch die Methoden D, E und G modellierten Pfade erlaubt dadurch eine bessere Interpretation der räumlichen Abweichungen.

Die Höhenprofile der originalen Wasserleitungen weisen über die gesamte Strecke einen überwiegenden kontinuierlichen Abfall auf, wobei lokale Anstiege oder flachere Abschnitte möglich sind. Die Profile entsprechen, durch dieses Muster, dem zu erwartenden Bild von antiken Wasserleitungen, bei dem das Wasser allein durch die Schwerkraft von der Quelle bis zum Ziel gleichmäßig floss. Die Steigungsprofile verdeutlichen jedoch gleichzeitig, dass die Topografie der Leitungen kein konstantes Gefälle aufweist. Die Unterschiede in den Profilen können durch verschiedene Bauphasen oder Anpassungen an das lokale Gelände durch römische Ingenieure erklärt werden.

Im Vergleich zu den Profilen der Originalleitungen folgen die Trassen der Methode D häufig stärker der vorhandenen Topografie. Dadurch werden sie auch negativer durch Geländeschwankungen beeinflusst, wodurch deutlich größere Ausschläge im Steigungsprofil erkenntlich sind. Auch wenn die Höhenprofile eine ähnliche Struktur haben, erscheinen die Steigungsprofile oft unregelmäßiger in ihrem Verlauf. Es ist anzunehmen, dass die originalen Wasserleitungen, im Vergleich zur Methode D, durch Erdarbeiten stärker beeinflusst wurden. Auch spielen hier sicher Geländeänderungen, wie zum Beispiel ein Erdbeben oder moderne Eingriffe, eine Rolle.

Die Höhenprofile der Methode E zeigen hingegen, aufgrund des Auftrags- und Aufschüttungsalgorithmus, glattere gleichmäßigere Verläufe als die Pfade der Methode D beziehungsweise der archäologisch nachgewiesenen Wasserleitungen. Letztere wurden wohlmöglich deutlich stärker an die vorhandene Geländeform angepasst, als die Methode E annimmt. Die LCP-Pfade der Methode E folgen bevorzugt einen Verlauf mit möglichst geringem Bauaufwand. In einigen Fällen entstehen dadurch stark idealisiert wirkende Pfade. Die Steigungsprofile weisen dementsprechend auch geringere Schwankungen auf als bei der Methode D und extreme Ausschläge kommen selten vor wobei sich die Steigungswerte häufig auf einen relativ gleichmäßigen linearen Gefälleverlauf konzentrieren.

Die Höhenprofile der Methode G weisen eine Kombination der Eigenschaften von Methode D und E auf und können als ein Mittelweg angesehen werden. Der Gefälletrend ähnelt zu einem dem der originalen Wasserleitungen zum anderen sind extreme Schwankungen im Profil reduziert. Dadurch wirkt sie im Vergleich zur Methode D meist deutlich stabiler und im Vergleich zur Methode E weniger idealisiert. Obwohl in den Steigungsprofile lokale kleine Schwankungen auftreten können, zeigen sich häufig eine Konzentration um einen stabilen

Bereich und ähneln im Muster den originalen Wasserleitungen. Methode G lässt sich als eine mittlere Lösung, bei der größere Geländestrukturen berücksichtigt werden, kleinere Variationen jedoch geglättet werden interpretieren.

Sensitivität und Parametrisierung

Die Sensitivitätstests Ergebnisse stellen sich als erstaunlich robust dar. Abweichungen durch das Verändern des Sollgefälles oder der Fenstergröße waren zu erwarten und verdeutlichen, dass die Wahl der Nachbarschaftsstruktur entscheidend für die Modellgüte ist.

Baek und Choi (2017) berichten das eine Erweiterung des Fensters eine notwendige Anpassung ist, um Steigungsrestriktionen in hügeligem Gelände überhaupt modellieren zu können. Die Topografie Carnuntums ist insgesamt sehr flach, wodurch extreme Steigungswechsel kaum auftreten. Ein kleineres Moving-Window von 3x3 zeigt sich bei der Methode G daher als sinnvollere Wahl. Auch wenn zu kleine Fenster zu einem Verlust des Suchraums (Amini et al., 2024) führen können. Methode E erzielt, mit Ausnahme der Wasserleitung c3, mit einer Fensterauflösung von 9x9 die besten Ergebnisse und bestätigt die Annahme von Baek und Choi (2017). Auch können die LCP-Pfade bei einer kleineren Fenstergröße deutlich schneller modelliert werden. Die Wahl des Fensters ist daher häufig ein Kompromiss zwischen Richtungsfreiheit und erhöhter Rechenzeit (vgl. Amini et al., 2024). Bei einer Rasterauflösung von 1x1 m führen Fenstergrößen oberhalb von 11x11 sogar regelmäßig zu Speicherüberläufen und Programmabstürzen.

Das Sollgefälle erweist sich ausschließlich bei der Methode G als entscheidend sensibler Parameter. Die getesteten Gefälle liefern dabei unterschiedlich gute Ergebnisse und zeigen sich nur bei der Wasserleitung e als wenig empfindlich. Überraschend zeigt sich ein Gefälle von 0,8 % bei der Solafeldleitung (Wasserleitung d) als optimal für die Modellgüte. Das Gefälle von 0,8 % ist über archäologische Untersuchungen bei der Flur Gstettenbreite entlang der Limesstraße (Konecny et al., 2021) auf freigelegten Stellen der Wasserleitung a dokumentiert. Tatsächlich lässt sich die Wasserleitung a im zweiten Abschnitt des Verlaufs, dort wo die Grabung dieses Gefälle bestätigt, mit einem Gefälle von 0,8 % am besten modellieren. Im ersten Abschnitt hingegen erweist sich ein Gefälle von 0,5 % als deutlich besser. Für die Wasserleitung c liefert ein sehr geringes Gefälle von 0,02 % die besten Ergebnisse.

Insgesamt bestätigen die Sensitivitätstests die hohe Robustheit des Modells und verdeutlichen die Zuverlässigkeit der Algorithmen. Abgesehen von den erwartbaren Effekten durch Sollgefälle und Moving-Window-Größe zeigen die übrigen Parameter nur minimale Auswirkungen auf den modellierten Pfad. Dies ist insofern bemerkenswert, da Savary et al. (2022) in einer umfassenden Sensitivitätsanalyse zeigten, dass Least Cost Path Modelle grundsätzlich sehr empfindlich auf Variationen der Kostenparameter reagieren. Bereits geringe Änderungen der Kostenfunktion können die räumliche Lage der Pfade deutlich verschieben. Eine Ausnahme zeigt sich lediglich bei Wasserleitung a, bei der das Ursprungsintervall 6 zu einer deutlichen Änderung des von der Methode G modellierten Pfads führte. Leichte Änderungen im Pfad zeigen sich auch bei der Anpassung der Schwelle in den Richtungsänderungsstrafen. Letztlich führt der Ausschluss moderner Straßen, wobei die Modellierung hin zu den Straßen als auch von den Straßen weg erstellt wird, zu deutlich besseren Ergebnissen. Ein Einfluss der modernen Straße lässt sich aber dadurch nicht bestätigen, da auch eine Bevorzugung der Modelle für geradlinigerer Routen vom Start bis zum Zielpunkt für die bessere Übereinstimmung sprechen.

Vergleich mit anderen Studien

Die beste durchschnittliche LSED-Abweichung von 41,7 m liegt dabei weitgehend in dem Bereich, der auch von anderen Studien erzielt wurde. Die Abweichung bei der Rekonstruktion des Karlsgraben (Schmidt et al., 2018) lag ebenfalls im Bereich weniger dutzend Meter (ca. 10 - 90 m). Allerdings wird die Übereinstimmung zwischen modellierter und realer Trasse ausschließlich visuell dargestellt. Auch Orengo und Miró (2011) berichten bei der Modellierung des Aquädukts von Barcelona von leichten Abweichungen zum Original. Obwohl Teile der LCP-Modellierung deckungsgleich verlaufen, zeigt der modellierte Pfad insgesamt eine geradlinigere Trassenführung als die Vergleichsroute, die allerdings ins Mittelalter datiert wird. Die Autoren erklären die Abweichung durch mittelalterliche Nutzungsanforderungen (z. B. Mühlenstandorte) und betonen, dass LCR-Analysen besonders dann zuverlässig sind, wenn sie als exploratives Werkzeug eingesetzt und mit archäologischen sowie historischen Daten kombiniert werden. Generell ist eine Validierung von LCP-Studien in der Archäologie eher eine Seltenheit (Verhagen et al., 2019). Klassische Validierungen von Wegstrukturen erfolgen in der Forschung oft auch durch die Überprüfung ihrer Existenz von im Relief erhaltenen Wegstrukturen oder die kalkulierten Trassen werden mit bekanntem

archäologischem Quellen aus dem Untersuchungsgebiet verglichen, um sie auf ihre Zeitstellung hin zu überprüfen (vgl. Klammer, 2023; Quirós et al., 2024; Taylor et al., 2022). Supernant (2017) modelliert in ihrer Studie über 300 LCP-Linien (mit und ohne Wasser als Barriere) und vergleicht diese direkt mit georektifizierten historischen Métis-Trails. Dabei liefert die Studie aber keine numerischen Distanzmaße, sondern beschreibt die Abweichungen allgemein als häufig nicht mit den historischen Trails übereinstimmend. Darüber hinaus erfolgt die Validierung in der archäologischen LCP-Forschung häufig über die Bewertung der Modellgüte anhand von Pufferzonen um rekonstruierte oder historisch überlieferte Routen (vgl. Goodchild & Hunter 1997), die je nach Fall auf kartografischen Quellen, archäologischen Befunden oder anderen Rekonstruktionsansätzen beruhen und somit keine vollständig unabhängige Referenz darstellen. Herzog (2021) definiert hierfür zum Beispiel Standardwerte von 200 m und 500 m und erreicht je nach Modell Überlagerungswerte von rund 68 % (200 m) bzw. 83 % (500 m). Güimil-Fariña und Parcero-Oubiña (2015) überprüfen, wie viele rekonstruierte römische Straßenlinien innerhalb eines 500- und 1000-m-Puffers liegen, wobei sie in situ erhaltene römische Meilensteine berücksichtigen. Je nach verwendeter Kostenfunktion erreichen die LCPs eine Überlagerung von 47,73 % bis 74,72 % (500-m-Puffer) bzw. 67,89 % bis 88,22 % (1000-m-Puffer). Vletter und van Lanen (2018) berichten in ihrer Studie sogar von lediglich 7-33 % Überlappung in einem 100 m Puffer und führen diese geringe Übereinstimmung auf kulturelle, soziale und landschaftshistorische Faktoren zurück. Ponnathota und Rajan (2023) validieren ihre LCP-Modelle, indem die berechneten Routen mit realen DCW-Kanalverläufen überlagert werden. Die Übereinstimmung wird hierbei auch als Prozentwert angegeben (ca. 82 %). Hodza und Butler (2022) vergleichen in ihrer Studie LCP-Modelle mit archäologisch kartierter Route und quantifizieren die Abweichungen anhand verschiedener Metriken, darunter Längenunterschiede, Höhenprofilabweichungen, durchschnittliche Steigungen. Die Differenzen fallen dabei mit einer Abweichung von bis zu 30 km erheblich aus (z. B. 11–34 km Längendifferenz, bis zu 65 m Reliefabweichung). Bei einer Straßenlänge von etwa 400 km entspricht die von Hodza und Butler (2022) berichtete maximale Abweichung von 30 km einer relativen Differenz von rund 7,5 %. Die Abweichungen der Methode G liegen mit 2,28 % (a) bis 7,6 % (d1) in einem vergleichbaren Bereich. Besonders die Wasserleitung d1 erreicht mit 7,6 % nahezu genau jene Größenordnung, die Hodza und Butler als erheblich beschreiben, bewegt sich jedoch im Gesamtvergleich der genannten Studien weiterhin im plausiblen Rahmen.

Im Gegensatz zu den herkömmlichen Validierungsverfahren geht die vorliegende Masterarbeit einen Schritt weiter und erfasst über LSED und DFD die tatsächliche geometrische Distanz zwischen zwei Linien. Während Puffer-Analysen nur eine ungefähre Näheinformation liefern, ermöglichen LSED und DFD eine objektive Bewertung der Unterschiede. Allerdings ist anzumerken, dass eine außergewöhnlich gute Befundlage, wie im Raum Carnuntum, eine Seltenheit in der archäologischen Forschung darstellt. LSED und DFD setzen das Vorhandensein präzise dokumentierter Referenzlinien voraus, die in vielen Studien aufgrund fragmentarischer Befundlage und unsicherer Rekonstruktionen nicht verfügbar sind. In solchen Fällen bleibt die Validierung zwangsläufig auf Puffer-Überlagerungen oder anderen qualitativen Vergleichen beschränkt.

Einordnung in moderne Infrastrukturplanung

Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich auch im Kontext moderner Infrastrukturplanung interpretieren. Studien zur Trassenoptimierung von Pipelines (vgl. Durmaz et al, 2019; Gyabeng, 2020; Kang & Lee, 2017; Makrakis et al., 2024; Macharia & Mundia, 2018; Morakinyo & Summonu, 2025; Raj & Bansal, 2024; Sarmento, 2022; Tirmizi et al., 2024) zeigen, dass GIS-basierte Analysen ein effektives Instrument darstellen, um kostenminimierte Routen unter Berücksichtigung topografischer und umweltbezogener Faktoren zu bestimmen. Auch hier treten Abweichungen zwischen modellierten LCP-Routen und den realen, zum Vergleich herangezogenen Pipelines auf. Diese Abweichungen sind allerdings im Unterschied zur vorliegenden Arbeit aufgrund eines Optimierungsfokus erwünscht. Zum Beispiel berichten Tirmizi et al. (2024) in ihrer Studie von einer Reduktion der Gesamtlänge um rund 46 %. Gyabeng und Bernard (2020) vergleichen ihre LCP-Pipelines Modelle mit existierenden Straßen und kommen auf eine Abweichung von bis zu 11 km Länge. Während in der archäologischen Forschung Abweichungen zwischen Modell und Befund ein zentrales Qualitätskriterium darstellen, sind sie in der modernen Infrastrukturplanung häufig das Ergebnis bewusster Entscheidungen zugunsten kostenminimierender oder technischer Rahmenbedingungen. LCP-Modellierungen fallen gegenüber bestehenden Netzwerken oft deutlich kürzer und damit potenziell kosteneffizienter aus.

Fallbeispiel – Großer Kanal

Die Modellierung des hypothetischen Großen Kanals ist grundsätzlich mit der Methode G möglich zwischen Quellgebiet der Petroneller „Remise“ und dem Legionslager, wenn auch nur

in Segmente. Um ein statistisch plausibles Ergebnis zu bekommen, wird für jeden von Nedelik und Petznek (2017) vorgeschlagenen Trassenpunkt eine eigene Verbindung berechnet, jeweils vom Start bis zum Punkt X und vom Punkt X bis zum Ziel. Die resultierenden Ergebnisse bilden eine Serie von segmentierten Pfaden, die unabhängig voneinander modelliert werden. Diese Vorgehensweise erlaubt es, die Hypothese des Großen Kanals trotz der technischen Einschränkungen zu überprüfen. Eine durchgehende Modellierung vom Startpunkt bis zum Endpunkt war nicht möglich, da bei vollständigen Berechnungen der Arbeitsspeicher überlastet wurde und der Rechner wiederholt abstürzte. Eine stabile Verarbeitung wäre nur mit einer deutlich reduzierten DEM-Auflösung von 5×5 m möglich gewesen.

Die statistischen Kennwerte sprechen dennoch für eine insgesamt plausible Rekonstruktion. Die mittlere Abweichung von 59,65 m und die geringe Standardabweichung von 13,44 m zeigen, dass die modellierten LCP-Trassen insgesamt eine plausible Annäherung an den angenommenen Verlauf des Kanals darstellen. Auch das 95-%-Quantil von 79,13 m macht deutlich, dass größere Abweichungen eher die Ausnahme sind. Gleichzeitig zeigen die minimalen und maximalen Abweichungen von 41,37 m bzw. 80,61 m, dass einzelne Bereiche stärker durch lokale Geländeformen beeinflusst wurden. Diese Abweichungen sind bei LCP-Modellen über eine so große Strecke zu erwarten und ähneln zudem den bereits festgestellten Ungenauigkeiten der Methode. Zudem kann infolge eines schweren Erdbebens (vgl. Kandler, 1989; Nedelik & Petznek, 2017) oder moderner Eingriffe, das Gelände verändert worden sein und das könnte das Modellierungsergebnis beeinflusst haben.

Zusammen mit dem visuellen Vergleich ergibt sich damit ein stimmiges Bild, in dem trotz der Segmentierung und der voneinander getrennten Berechnungen, die modellierten Linien über weite Strecken nahezu deckungsgleich verlaufen. Besonders auffällig ist diese Übereinstimmung, da nur die Trassenpunkte vorgegeben waren und die dazwischenliegenden Abschnitte allein durch das Geländemodell bestimmt wurden.

Insgesamt sprechen die Ergebnisse dafür, dass die Hypothese eines Großen Kanals aus topografischer Sicht über eine derart große Strecke quer durch Carnuntum realisierbar gewesen war. Die Modellierung kann die Existenz eines solchen Bauwerks zwar nicht 100% belegen, liefert aber ebenso wenig Anhaltspunkte, die klar dagegensprechen würden. Für eine vollständige Bestätigung des Großen Kanals benötigt es weitere Untersuchungen der historischen und archäologischen Befunde. Die notwendige Unterteilung der Strecke in

Teilabschnitte zeigt zugleich, dass die Modellierung sehr langer Infrastrukturen mit hohen Datenaufösungen technisch anspruchsvoll bleibt.

Fazit

Ausgehend der eindeutigen Forschungslücke, dass kaum Least-Cost-Path-Methoden im Kontext der Modellierung von römischen Wasserleitungen verwendet werden, zielt die vorliegende Arbeit darauf ab, zu untersuchen, inwieweit sich diese für solche Trassen eignen. Dabei wurde die Hypothese aufgestellt, dass römische Wasserleitungen nach dem Prinzip der Kostenminimierung unter Berücksichtigung von Gefälle und Erdbewegungsaufwand geplant wurden.

Die durchgeführten LCP-Analysen verdeutlichen, dass Least-Cost-Path-Modelle grundsätzlich geeignet sind, den Verlauf römischer Wasserleitungen auf Basis topografischer Parameter zu rekonstruieren. In vielen Fällen stimmen die modellierten Trassen räumlich gut mit den archäologisch nachgewiesenen Verläufen überein. Das deutet darauf hin, dass topografische Faktoren bei der historischen Trassenwahl eine wichtige Rolle gespielt haben. Besonders die Methoden D, E und G erreichen über mehrere Teststrecken hinweg eine gute Annäherung an die Originalleitungen und sprechen für eine Planung von Wasserleitungen nach dem Prinzip von möglichst günstigen Gefälle- bzw. Kostenverläufen.

Deutlich zeigt sich jedoch auch, dass diese Annahme nur eingeschränkt unter spezifischer Parameterwahl gilt. Die Abhängigkeit von Parametrisierung macht LCP-Modelle anfällig für Abweichungen in den Pfaden, wenn auch nur geringfügige Anpassungen an Kostenfunktionen vorgenommen werden – insbesondere bei Fenstergrößen oder Sollgefälle. Die Aussagekraft der Modelle wird durch die Sensitivität gegenüber topografischen Details, Rastereffekten und modernen Geländeänderungen sowie durch die Tatsache, dass römische Wasserleitungen häufig unterirdisch verliefen und nicht ausschließlich der Oberflächentopografie folgten, eingeschränkt. Die aufgezeigten Abweichungen sind aber nicht als Fehler zu interpretieren, sondern als methodische Grenze einer auf topografischen Ansatz basierenden LCP-Studie.

Erweiterte Kostenmodelle, die Gefälle, Abtrag und Auffüllung berücksichtigen, bilden historische Infrastrukturen am realistischsten ab, wie die Ergebnisse der Methode G zeigen. Die Validierung anhand LSED und DFD zeigt, dass Methode G im Durchschnitt die geringsten Abweichungen aufweist, während einzelne Wasserleitungstrassen wie d1 weiterhin deutlich

abweichen, was die Differenz zwischen Trassenführung und Originalwasserleitung verdeutlicht. Die beobachteten Abweichungen entsprechen dabei in etwa den zu erwarteten Größenordnungen anderer Publikationen. Gleichzeitig zeigt der Vergleich der Methoden A–G, dass keine einzelne Methode alle Leitungen gleichermaßen präzise rekonstruieren kann. Die Übereinstimmung der Modelle ist je nach Strecke unterschiedlich. Teilweise können die erstellten LCP-Modelle als kostengünstigere Routen interpretiert werden, die aber nicht den römischen Wasserleitungen entsprechen. Daran wird deutlich, dass die Entscheidungen der römischen Ingenieure bei der Wahl der Trassen von vielen Faktoren beeinflusst wurden. Diese antiken Entscheidungen können die LCP-Modelle aber nur begrenzt erfassen. Eine universelle Parametrisierung ist zwar wünschenswert, erscheint jedoch, wie die Sensitivitätsanalyse des Sollgefälles zeigt, kaum realistisch. Zudem zeigt sich, dass Methoden basierend auf Hangneigung tendenziell Zickzackpfade und längere Routen erzeugen, während Cut-/Fill-Methoden geglättete, realistischere Linien erzeugen, aber kleinere topografische Details vernachlässigen.

Gängige LCP-Programme, wie sie in GIS-Software (z. B. ArcGIS) verwendet werden, wurden in der vorliegenden Untersuchung nicht in den Vergleich einbezogen. Eine Überprüfung der Modellgüte dieser Software könnte jedoch eine sinnvolle Ergänzung für zukünftige Arbeiten sein. Auch hydrologische Parameter sowie potenzielle Pumpsysteme, die beim Überqueren von Anhöhen relevant sind, fanden keine Berücksichtigung in der vorliegenden Arbeit. Brücken- und Tunnelsysteme antiker Aquädukte wurden ebenfalls nicht explizit berücksichtigt. Eine Einbindung dieser genannten Faktoren könnte die Aussagekraft und Interpretation zukünftiger Modellierungen deutlich verbessern und zu präziseren Rekonstruktionsvorschlägen beitragen.

Am Fallbeispiel des Großen Kanals wird deutlich, dass auch komplexe Trassen grundsätzlich modellierbar sind und eine Wasserversorgung über große Distanzen, zwischen Quellgebiet der Petroneller „Remise“ und dem Legionslager, möglich erscheint. Die Hypothese kann daher nicht widerlegt werden, ist aber weiterhin nicht eindeutig belegt und erfordert zusätzliche Forschung.

Archäologische Least Cost Path Modellen müssen stets in Kombination mit weiteren Studien, zum Beispiel Grabungen und Geoprospektion, interpretiert werden. Erst eine Kombination mehrerer Datenquellen kann mögliche Leitungsverläufe gesichert rekonstruieren.

Modellierungen, wie in der vorliegenden Studie, können aber den Untersuchungsraum zumindest zuverlässig eingrenzen und besonders geeignete Korridore identifizieren und dienen vor allem als Entscheidungshilfe und Unterstützung bei der Strukturierung von Hypothesen bezüglich wahrscheinlicher Wasserleitungen.

Literatur

1. Amini, M., Mirbagheri, B., Matkan, A. A., & Alimohammadi, A. (2024). Enhanced least-cost path analysis for infrastructure planning: Achieving a comprehensive search space with civil engineering structures. *International Journal of Geographical Information Science*, 38(6), 1091–1108. <https://doi.org/10.1080/13658816.2024.2333922>
2. Baek, J., & Choi, Y. (2017). A new algorithm to find raster-based least-cost paths using cut and fill operations. *International journal of geographical information science*, 31(11), 2234-2254.
3. Bruker. (2011). *Gaussian*. Bruker AFM Software Guide. <https://www.nanophys.kth.se/nanolab/afm/icon/bruker-help/Content/SoftwareGuide/Offline/ModifyCommands/Gaussian.htm>
4. Canosa-Betés, J. (2016). Border surveillance: Testing the territorial control of the Andalusian defense network in center-south Iberia through GIS. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 9, 416–426.
5. Cech, B. (2011). *Technik in der Antike*. Stuttgart: Theiss.
6. Chen, Y., She, J., Li, X., Zhang, S., & Tan, J. (2020). Accurate and efficient calculation of three-dimensional cost distance. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(6), 353.
7. Conyers, L. B. (2023). *Ground-penetrating radar for archaeology*. Rowman & Littlefield.
8. Cowen, D. J., Jensen, J. R., Hendrix, C., Hodgson, M., Schill, S. R., & Macchiaverna, F. (2000). A GIS-assisted rail construction econometric model that incorporates LIDAR data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(11), 1323–1328.
9. Crapper, M., Motta, D., Keenan-Jones, D., & others. (2022). Hydraulic engineering analysis of Roman water infrastructure: A review of practice and possibilities. *Water History*, 14, 5–19. <https://doi.org/10.1007/s12685-021-00285-5>
10. Dastrup, R. A. (2020). *Introduction to geographic information systems*. Pressbooks. <https://pressbooks.pub/gist/>

11. Deming, D. (2020). The Aqueducts and Water Supply of Ancient Rome. *Groundwater*, 58(1), 152–161. <https://doi.org/10.1111/gwat.12958>
12. Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1, 269–271.
13. Dolinskaya, I. S. (2012). Optimal path finding in direction-, location-, and time-dependent environments. *Naval Research Logistics*, 59(5), 325–339.
14. Dolinskaya, I. S. (2013). Dynamic navigation in direction-dependent environments. In S. Ukkusuri & K. Ozbay (Eds.), *Advances in dynamic network modeling in complex transportation systems* (pp. 235–260). Springer.
15. Doneus, M. (2013). *Die hinterlassene Landschaft: Prospektion und Interpretation in der Landschaftsarchäologie* (MPK, Band 78). Wien.
16. Doneus, M., Gugl, C., & Doneus, N. (2013). *Die Canabae von Carnuntum: Eine Modellstudie der Erforschung römischer Lagervorstädte*. Wien.
17. Durmaz, A. İ., Ünal, E. Ö., & Aydın, C. C. (2019). Automatic pipeline route design with multi-criteria evaluation based on least-cost path analysis and line-based cartographic simplification: A case study of the Mus project in Turkey. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(4), 173.
18. Ertl, R. F., & Leitner, H. (2023). *Wasser für Carnuntum: Versorgung, Entsorgung, Badekultur im Römischen Reich und in der Stadt an der Donau. Band II: Carnuntum*. Hollitzer Wissenschaftsverlag.
19. Esri. (2025). *How the filter works*. ArcGIS Pro documentation. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.4/tool-reference/spatial-analyst/how-filter-works.htm>
20. Fernández, P. T. (2021). Mobility in Ancient Times: Combining land and water costs. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 22, e00192.
21. Gaffney, C., & Gater, J. (2003). *Revealing the buried past. Geophysics for archaeologists*. Stroud: Tempus.
22. Gajghate, P. W., & Mirajkar, A. (2020). Irrigation Pipe Network Planning at Tertiary Level: An Indian Case Study. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(1), 322–335. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0272-2>
23. Goodchild, M. F., & Hunter, G. J. (1997). A simple positional accuracy measure for linear features. *International Journal of Geographical Information Science*, 11, 299–306.

24. Grewe, K. (2016). *Aquädukte: Wasser für Roms Städte*. Rheinbach: Regionalia Verlag.
25. Güimil-Fariña, A., & Parceró-Oubiña, C. (2015). "Dotting the joins": A non-reconstructive use of Least Cost Paths to approach ancient roads. *Journal of Archaeological Science*, 54, 31–44.
26. Gyabeng, B. A., & Bernard, A. (2020). Selection of optimum petroleum pipeline routes using a multi-criteria decision analysis and GIS least-cost path approach. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 10(06), 572-579.
27. Herzog, I. (2025). Least-cost networks. In *Archaeology in the digital era* (pp. 237-248). Routledge.
28. Herzog, I. (2021). Issues in replication and stability of least-cost path calculations. *Studies in Digital Heritage*, 5(2), 131-155.
29. Herzog, I. (2020). Spatial analysis based on cost functions. In P. Hacıgüzeller, M. Gillings, & G. Lock (Eds.), *Archaeological spatial analysis: A methodological guide to GIS* (pp. 333–358). London: Routledge.
30. Herzog, I. (2016). The potential and limits of optimal path analysis. In *Computational approaches to archaeological spaces* (pp. 179-211). Routledge.
31. Herzog, I. (2014). Least-cost Paths–Some Methodological Issues [Internet Archaeology 2014]. *Internet Archaeology*, 36(36).
32. Herzog, I. (2010). Theory and practice of cost functions. In *Fusion of cultures. Proceedings of the 38th annual conference on computer applications and quantitative methods in archaeology, Granada, Spain* (pp. 375-382).
33. Hodza, P., & Butler, K. A. (2022). Juxtaposing GIS and archaeologically mapped ancient road routes. *Geographies*, 2(1), 48–67.
34. Humer, F. (Ed.). (2014). *Carnuntum: wiedergeborene Stadt der Kaiser*. Verlag Philipp von Zabern.
35. Ismail, M. H., & Kamaruzaman, J. H. (2009). Planning of access road using satellite technology and best path modeling. *Modern Applied Science*, 3(1), 83–90.
36. Jain, V., Bhamra, R. S., Mishra, M., & Gupta, R. (2021). Water pipeline routing using GIS. In *Water Security and Sustainability* (pp. 101–111). Singapore: Springer.
37. Jan, G. (2009). Transportation network navigation with turn penalties. In *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*.

38. Johnson, E. (2020). *Azimuth. Physical Geology Laboratory*.
<https://viva.pressbooks.pub/>
39. Kamarudin, N., Ismail, M. H., & Jusoff, K. (2014). Quantification of least cost path analysis for best forest road planning. *The Malaysian Forester*, 77(2), 101–110.
40. Kandler M. (1989). Eine Erdbebenkatastrophe in Carnuntum? *Acta Arch. Hung.* 41, 313–336.
41. Kang, J. Y., & Lee, B. S. (2017). Optimisation of pipeline route in the presence of obstacles based on a least cost path algorithm and laplacian smoothing. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9(5), 492–498.
42. Kantner, J. (2012). Realism, reality, and routes: Evaluating cost-surface and cost-path algorithms. In D. A. White & S. Surface-Evans (Eds.), *Least cost analysis of social landscapes: Archaeological case studies* (pp. 225–238). University of Utah Press.
43. Kelly, A., & O'Neill, B. (2023). The Roman aqueduct of Knossos, a model for nineteenth-century aqueduct design. *Annual of the British School at Athens*, 118, 349–397.
44. Kessener, P. M. (2022). Roman Water Transport: Pressure Lines. *Water*, 14(1), 28.
<https://doi.org/10.3390/w14010028>
45. Klammer, J. (2023). Verbindungswege zwischen Kastell und Burgi – eine Kostenpfadanalyse aus dem Hinterland von Mautern/Favianis. *Carnuntum Jahrbuch*, 2022, 11–22.
46. Konecny, A., Humer, F., Radbauer, S., Gugl, C., Igl, R., & Fuchshuber, N. (2021). Zwei Infrastruktureinrichtungen des römischen Carnuntum: der Aquädukt in der Flur Gstettenbreite und die Limesstraße. *Carnuntum Jahrbuch*, 2020, 11–36.
47. Kramer, N. (2025, März). Reconstructing the routes of the aqueducts of Roman Sparta using GIS Least-Cost Path Analysis.
<https://camws.org/sites/default/files/29241%20Reconstructing%20the%20Routes%20of%20the%20Aqueducts.pdf>
48. Lewis, J. (2021). Probabilistic modelling for incorporating uncertainty in least cost path results: A postdictive Roman road case study. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 28(3), 911–924.
49. Lewis, J. (2024). Explaining known past routes, underdetermination, and the use of multiple cost functions. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 31(3), 854–874.

50. Lock, G., & Pouncett, J. (2010). Walking the Ridgeway revisited: Scale dependency and least-cost pathways. In *Making history interactive: CAA 2009 proceedings* (pp. 192–203). Archaeopress.
51. Macharia, P. M., & Mundia, C. N. (2018). GIS analysis and spatial modelling for optimal oil pipeline route location. A case study of proposed Isiolo–Nakuru pipeline route.
52. Makrakis, N., Psarropoulos, P. N., & Tsompanakis, Y. (2024). Optimal routing of gas pipelines in seismic regions using an efficient decision-support tool: A case study in Northern Greece. *Applied Sciences*, 14(23), 10970.
53. Maktav, D., Crow, J., Kolay, C., Yegen, B., Onoz, B., Sunar, F., ... Ince, G. (2009). Integration of remote sensing and GIS for archaeological investigations. *International Journal of Remote Sensing*, 30(7), 1663–1673.
54. Margeta, J. (2023). Lead was an acceptable material for Roman water supply systems. *Water History*, 15(3), 393–410. <https://doi.org/10.1007/s12685-023-00335-0>
55. Maucher, H. (2024). *Gaussian derivatives*. Orbook: Image preprocessing. <https://maucher.pages.mi.hdm-stuttgart.de/orbook/preprocessing/04gaussianDerivatives.html>
56. Medrano, F. A. (2021). Effects of raster terrain representation on GIS shortest path analysis. *PLOS ONE*, 16(4), e0250106.
57. Murekatete, R. M., & Shirabe, T. (2021). An experimental analysis of least-cost path models on ordinal-scaled raster surfaces. *International Journal of Geographical Information Science*, 35(8), 1545–1569.
58. Nedelik, A. H., & Petznek, B. (2017). Die Fernwasserleitung zum Legionslager Carnuntum. *Römisches Österreich*, 40, 1–88.
59. NetworkX. (2025). *networkx.algorithms.shortest_paths.weighted.dijkstra_path*. https://networkx.org/documentation/stable/reference/algorithms/generated/networkx.algorithms.shortest_paths.weighted.dijkstra_path.html
60. Neubauer, W. (2016). *Die zerstörungsfreie Vermessung der römischen Provinzhauptstadt Carnuntum*. ScienceBlog. <https://scienceblog.at/die-zerst%C3%B6rungsfreie-vermessung-der-r%C3%B6mischen-provinzhauptstadt-carnuntum>

61. Neubauer, W., Wallner, M., Gugl, C., Löcker, K., Vonkilch, A., Trausmuth, T., ... & Humer, F. (2018). Zerstörungsfreie archäologische Prospektion des römischen Carnuntum. *Carnuntum Jahrbuch*, 1, 55–75.
62. Neuwirth, C. (2024). *Unveröffentlichtes ArcPy-Skript zur Berechnung von Cut-&Fill-Kostenoberflächen* (Persönliche Mitteilung).
63. Orengo, H. A., & Miró i Alaix, C. (2013). Reconsidering the water system of Roman Barcino. *Water History*, 5, 243–266.
64. Orengo, H. A., & Miró, C. (2011). Following Roman waterways from a computer screen: GIS-based approaches to the analysis of Barcino's aqueducts. *Go your own least cost path. Spatial technology and archaeological interpretation (BAR S2284)*. Archaeopress, Oxford, 47-53.
65. Polla, S. (2009). GIS-basierte Modellierung der Strecken des Stradasmus. in Gerd Graßhoff and Florian Mittenhuber (eds) *Untersuchungen zum Stradasmus von Patara: Modellierung und Analyse eines antiken geographischen Streckennetzes*, Bern Studies in the History and Philosophy of Science, Bern Studies 9. 123–147.
66. Ponnathota, S. C. R., & Rajan, K. S. (2023). Topology aligned least cost routing model for canals. In *IGARSS 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 3024–3027). IEEE.
67. Python Software Foundation. (2025). *abs — Built-in functions*. Python 3 Standard Library documentation. <https://docs.python.org/3/library/functions.html#abs>
68. Quirós, E., Fernández, P. T., Antolín, A., & Mayoral, V. (2024). A comparative approach to GIS modelling of terrestrial mobility in archaeological sites: The Iron Age hillfort of Villasviejas del Tamuja as a study case. *Journal of Archaeological Science*, 167, 105988.
69. Rademaker, K., Reid, D. A., & Bromley, G. R. M. (2012). Connecting the Dots. In White & Surface-Evans (2012), pp. 32–45.
70. Raj, S., & Bansal, V. K. (2024). Use of GIS for selection of optimal route for water pipelines in hill areas. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(1), 13.
71. Ren, N., Zhang, D., & Cheng, Q. (2025). FZStats v1.0: A raster statistics toolbox for spatial stratified heterogeneity and positional dependence in Python. *Geoscientific Model Development*, 18, 7165–7184.

72. Rodrigue, J.-P. (2024). *Turn penalties at an intersection*. In *The geography of transport systems*. <https://transportgeography.org/contents/methods/network-data-models/turn-penalty-intersection/>
73. Ruggeri, F., Crapper, M., Snyder, J. R., & Crow, J. (2017). A GIS-based assessment of the Byzantine water supply system of Constantinople. *Water Supply*, 17(6), 1534–1543.
74. SAGA GIS. (2025). *Grid filter (Gaussian)*. SAGA GIS Tool Documentation. https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/9.2.0/grid_filter_1.html
75. Sarmiento, F. J. (2022). Automatic routing of water supply pipelines. *RBRH*, 27, e24.
76. Savary, P., Foltête, J. C., & Garnier, S. (2022). Cost distances and least cost paths respond differently to cost scenario variations: A sensitivity analysis of ecological connectivity modeling. *International Journal of Geographical Information Science*, 36(8), 1652–1676.
77. Schmidt, J., Werther, L., & Zielhofer, C. (2018). Shaping pre-modern digital terrain models. *PLOS ONE*, 13(7), e0200167.
78. Simon, B., & Rupnik, L. (2023). Identifying the Roman Aqueduct of Brigetio. *Archäologisches Korrespondenzblatt*, 53(4), 531–546.
79. Sthapit, N., & Mori, H. (1994). Model to estimate highway earthwork cost in Nepal. *Journal of Transportation Engineering*, 120(3), 498–504.
80. Supernant, K. (2017). Modeling Métis mobility? Evaluating least cost paths and indigenous landscapes in the Canadian West. *Journal of Archaeological Science*, 84, 63–73.
81. Sürmelihiindi, G., Passchier, C. W., Rigal, D., Wilson, A., & Spötl, C. (2023). Roman aqueduct maintenance in Divona. *Scientific Reports*, 13(1), 12035.
82. Tao, Y., Both, A., Silveira, R. I., Buchin, K., Sijben, S., Purves, R. S., & Duckham, M. (2021). A comparative analysis of trajectory similarity measures. *GIScience & Remote Sensing*, 58(5), 643–669.
83. Taylor, E. J., Falk, D. A., & Towner, R. H. (2023). Traversing the Southern Canadian Rocky Mountains: A least cost path analysis. *Human Ecology*, 51(1), 119–135.
84. Teichmann, M., Wallner, M., Pollhammer, E., & Neubauer, W. (2022). Hydrotechnik und Wassernutzung in der Zivilstadt von Carnuntum. *Thiasos*, 11, 97–107.
85. Tirmizi, S., Rizwan, S., & Tirmizi, S. (2024). Optimal route assessment of oil and gas pipelines using Geographic Information System (GIS).

86. Toohey, K., & Duckham, M. (2015). Trajectory similarity measures. *SIGSPATIAL Special*, 7(1), 43–50.
87. Verhagen, J. W. H. P. (2013). On the road to nowhere? Least cost paths, accessibility and the predictive modelling perspective. In *Fusion of Cultures: Proceedings of the 38th Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* (pp. 383–389). Archaeopress.
88. Vletter, W. F., & van Lanen, R. J. (2018). Finding vanished routes: Applying a multi-modelling approach on lost route and path networks in the Veluwe region, the Netherlands. *Rural Landscapes*, 5(1), 1–19.
89. Wallner, M., Gugl, C., Radbauer, S., & Neubauer, W. (2021a). The Western Suburbium in Roman Carnuntum. *ArcheoSciences*, 45(1), 139–141.
90. Wallner, M., Löcker, K., Gugl, C., Trausmuth, T., Vonkilch, A., Einwögerer, C., ... & Neubauer, W. (2021b). The 'ArchPro Carnuntum' project. *Építés-Építészettudomány*, 49(1–2), 77–95.
91. Ward, K., Crow, J., & Crapper, M. (2017). Water supply infrastructure of Byzantine Constantinople. *Journal of Roman Archaeology*, 30, 175–195.
92. Winter, S. (2002). Modeling costs of turns in route planning. *GeoInformatica*, 6, 345–361.
93. Zhang, L., & Wang, T. (2014). A method for the shortest distance routing considering turn penalties. In Z. Wen & T. Li (Eds.), *Practical applications of intelligent systems* (pp. 263–272). Springer.
94. Zhang, L., Chen, K., Cai, K., Zhang, Y., Dang, Y., Wu, Y., Bing, Z., Wu, F., Haddadin, S., & Knoll, A. (2025). *Direction informed trees (DIT): Optimal path planning via direction filter and direction cost heuristic*. arXiv.
95. Zhou, Q., Wu, R., Jin, C., Qu, Z., Chen, S., & Hou, R. (2025). Path planning for substation inspection robots based on turn penalty. In *Proceedings of the 5th International Conference on Computer, Control and Robotics* (pp. 26–30).

Anhang

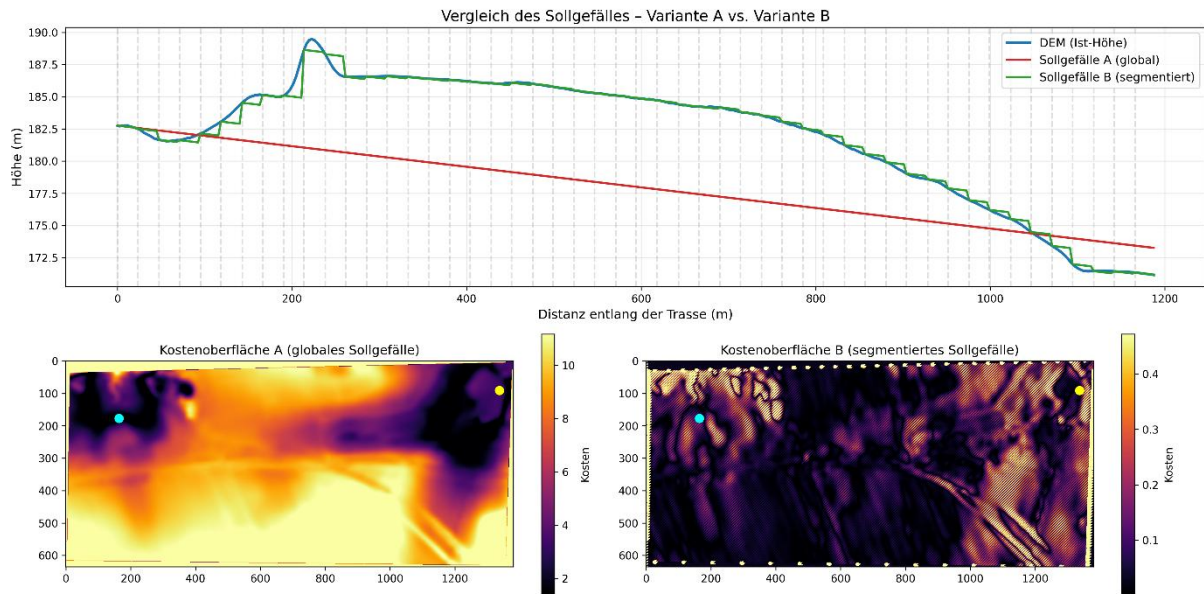


Abbildung 29 Gegenüberstellung der Kostenoberflächen der Methode F Varianten A (direkte Berechnung des Gefälles vom Start bis zum Ziel) und B (segmentierte Berechnung, wobei die Ausrichtung des Gefälles zum Ziel alle 8m neu berechnet wird) entlang einer Trasse. Die Darstellungen verdeutlichen die Unterschiede in der räumlichen Kostenverteilung und im resultierenden Gefälleverlauf anhand der Wasserleitung a. Die Punkte in den Kostenoberflächen repräsentieren Start (türkis) und Ziel (Gelb) der zu modellierende Leitung. Oben: Höhenverlauf des digitalen Geländemodells (DEM) sowie der resultierenden Sollgefällelinien beider Varianten. Unten links: resultierende Kostenoberfläche für Variante A. Unten rechts: Kostenoberfläche für Variante B.

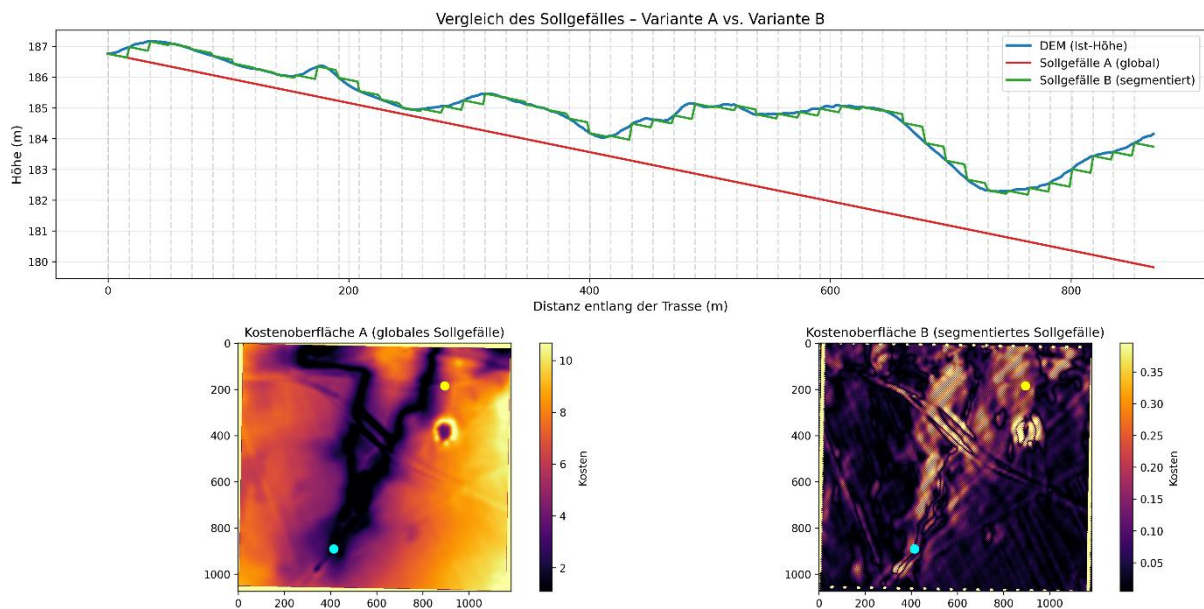


Abbildung 30 Vergleich eines globalen (Variante A) und segmentierten (Variante B) Sollgefälles anhand von Höhenprofilen (oben) und resultierenden Kostenoberflächen (unten) bei der Modellierung der Wasserleitung b.

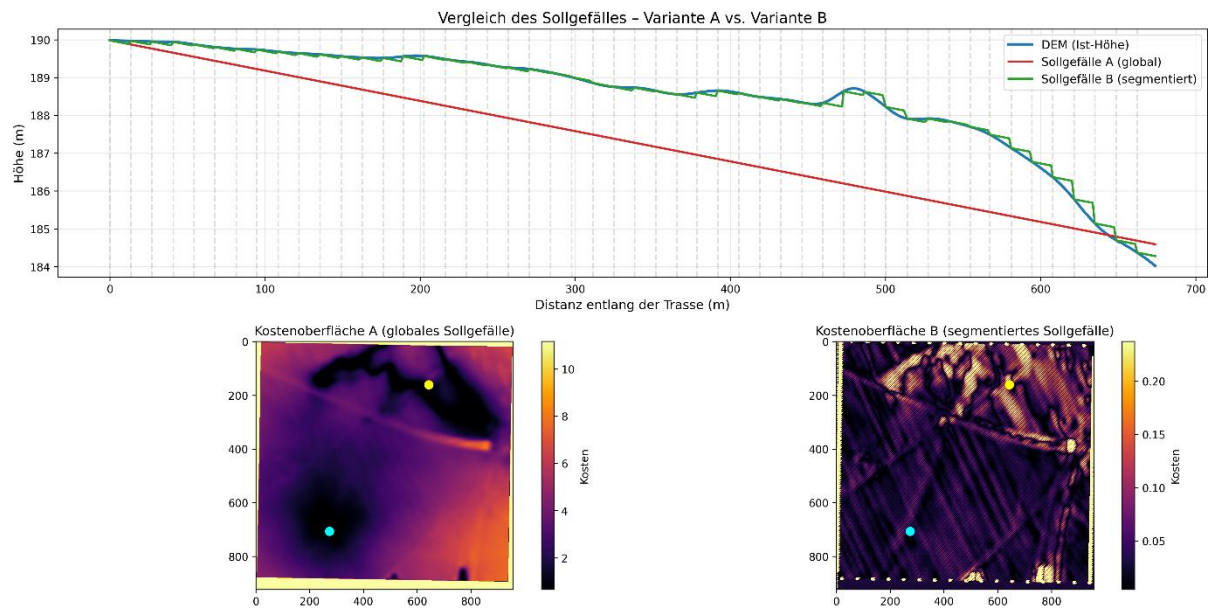


Abbildung 31 Vergleich eines globalen (Variante A) und segmentierten (Variante B) Sollgefälles anhand von Höhenprofilen (oben) und resultierenden Kostenoberflächen (unten) bei der Modellierung der Wasserleitung c1.

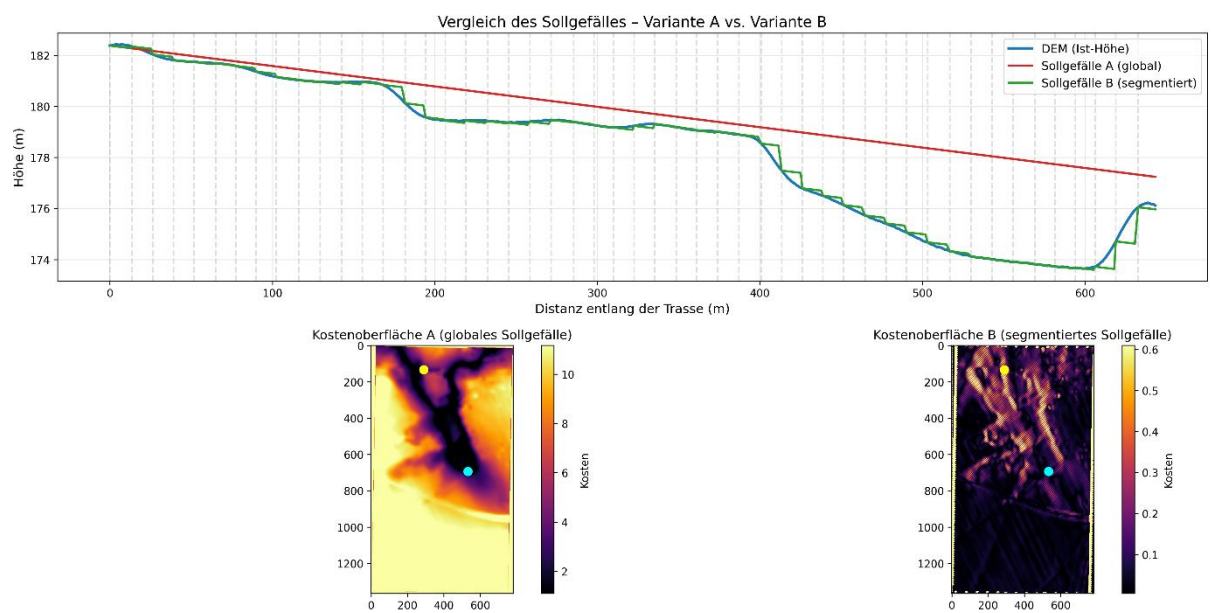


Abbildung 32 Vergleich eines globalen (Variante A) und segmentierten (Variante B) Sollgefälles anhand von Höhenprofilen (oben) und resultierenden Kostenoberflächen (unten) bei der Modellierung der Wasserleitung c2.

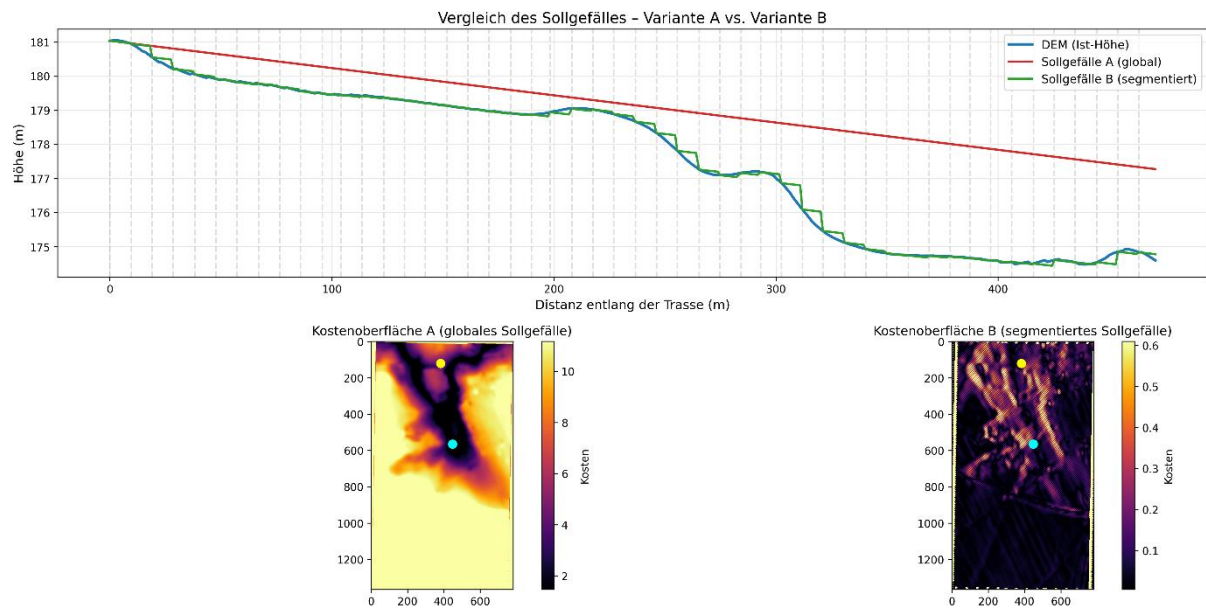


Abbildung 33 Vergleich eines globalen (Variante A) und segmentierten (Variante B) Sollgefälles anhand von Höhenprofilen (oben) und resultierenden Kostenoberflächen (unten) bei der Modellierung der Wasserleitung c3.

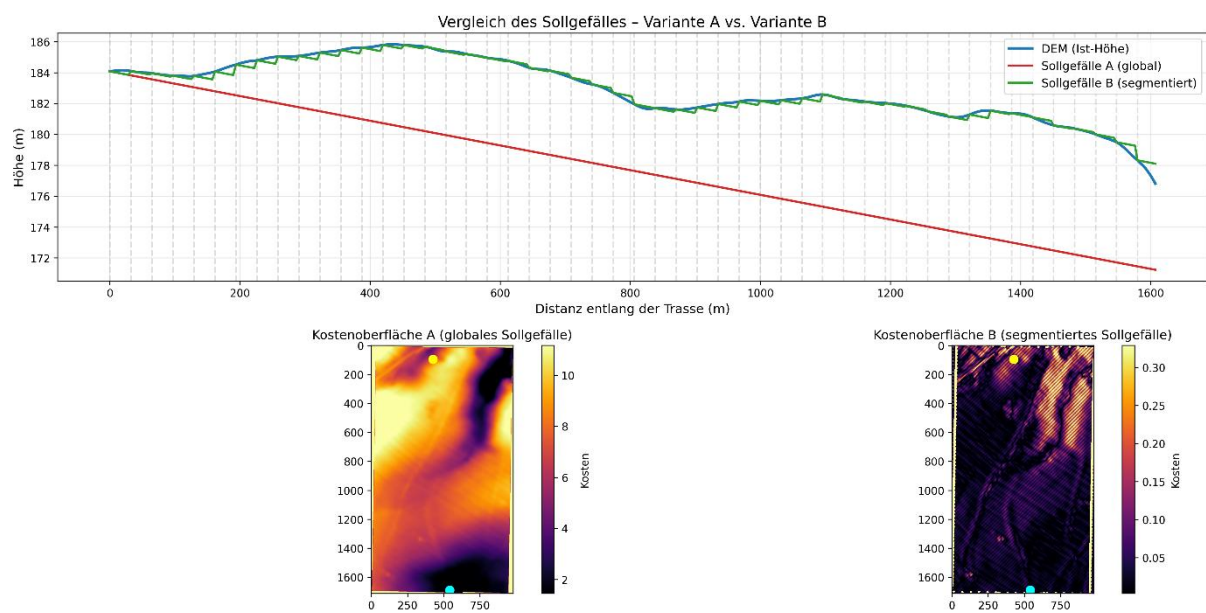


Abbildung 34 Vergleich eines globalen (Variante A) und segmentierten (Variante B) Sollgefälles anhand von Höhenprofilen (oben) und resultierenden Kostenoberflächen (unten) bei der Modellierung der Wasserleitung d1.

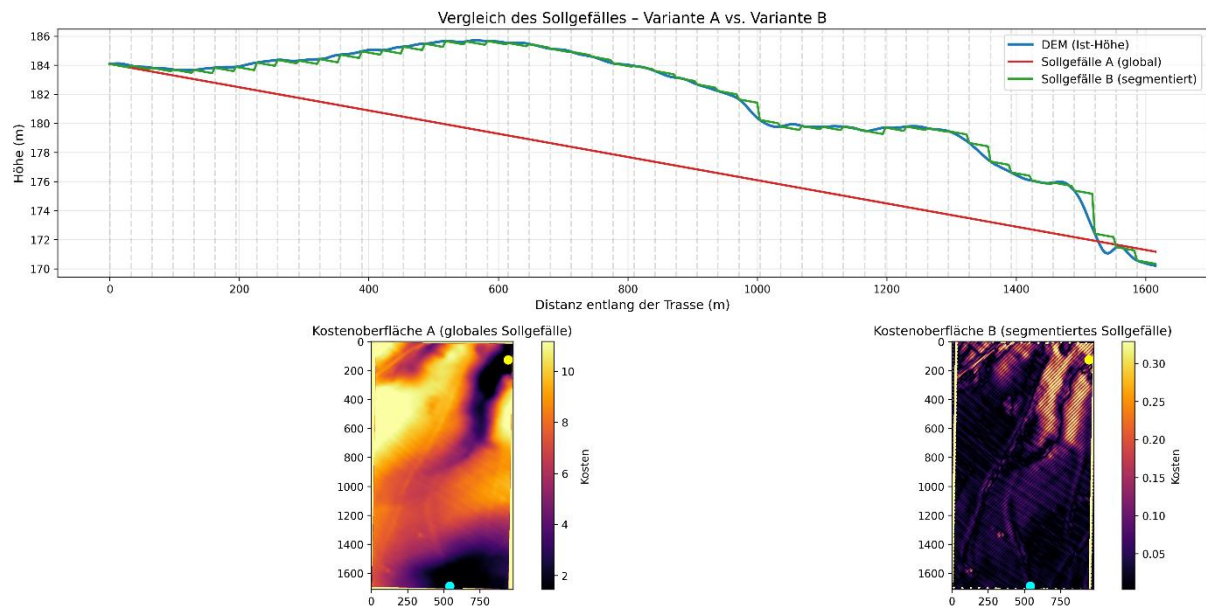


Abbildung 35 Vergleich eines globalen (Variante A) und segmentierten (Variante B) Sollgefälles anhand von Höhenprofilen (oben) und resultierenden Kostenoberflächen (unten) bei der Modellierung der Wasserleitung d2.

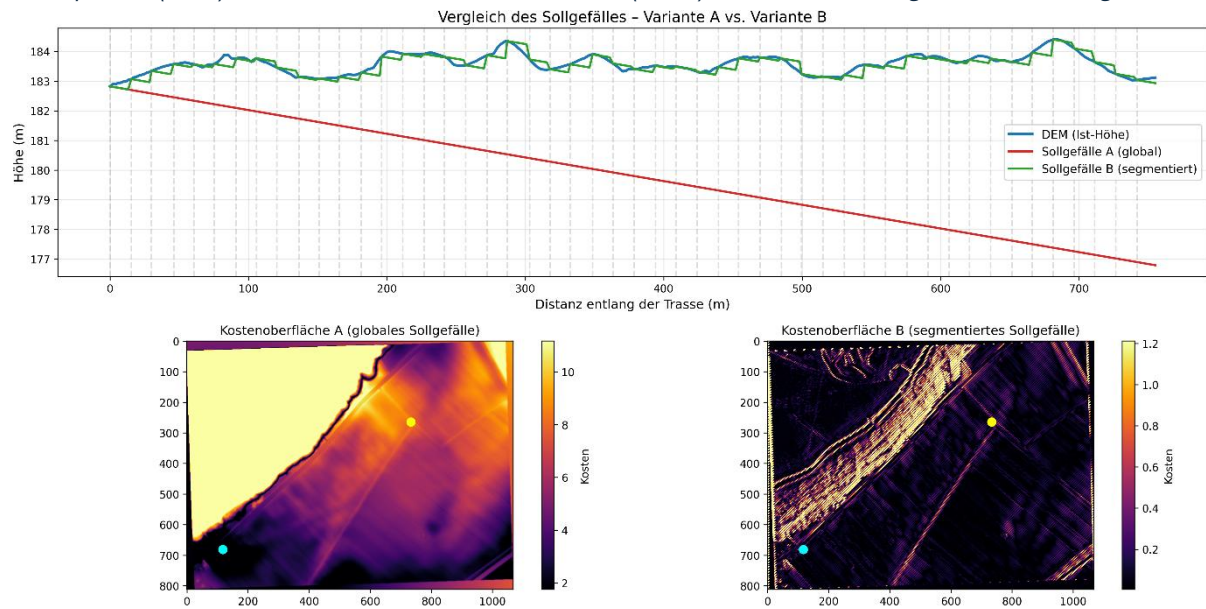


Abbildung 36 Vergleich eines globalen (Variante A) und segmentierten (Variante B) Sollgefälles anhand von Höhenprofilen (oben) und resultierenden Kostenoberflächen (unten) bei der Modellierung der Wasserleitung e.

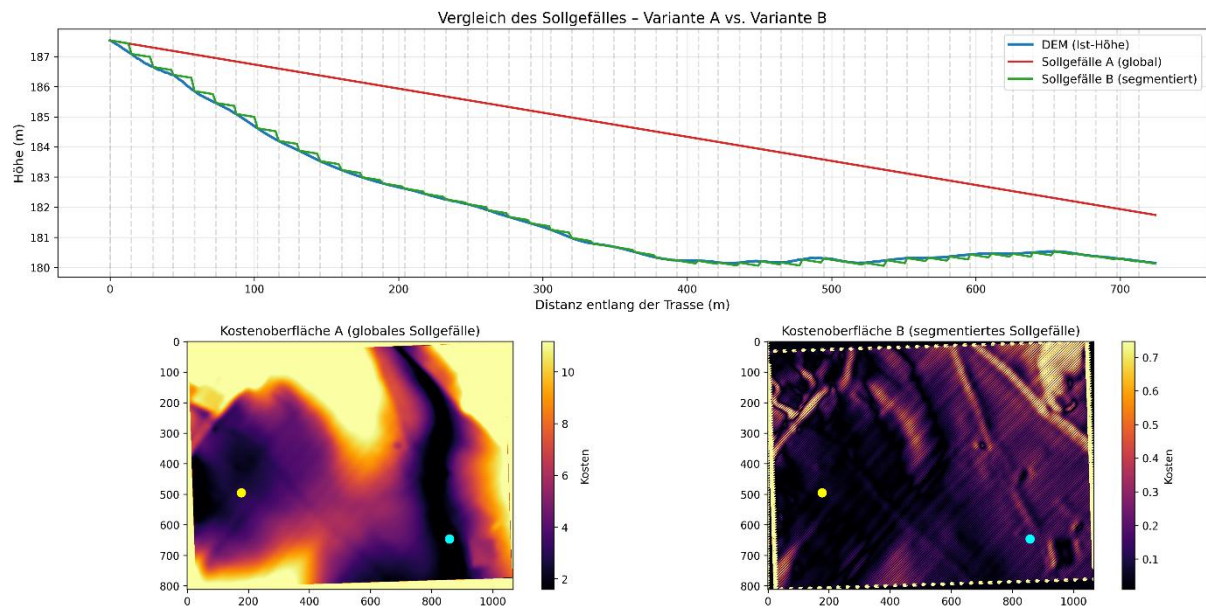


Abbildung 37 Vergleich eines globalen (Variante A) und segmentierten (Variante B) Sollgefälles anhand von Höhenprofilen (oben) und resultierenden Kostenoberflächen (unten) bei der Modellierung der Wasserleitung h .

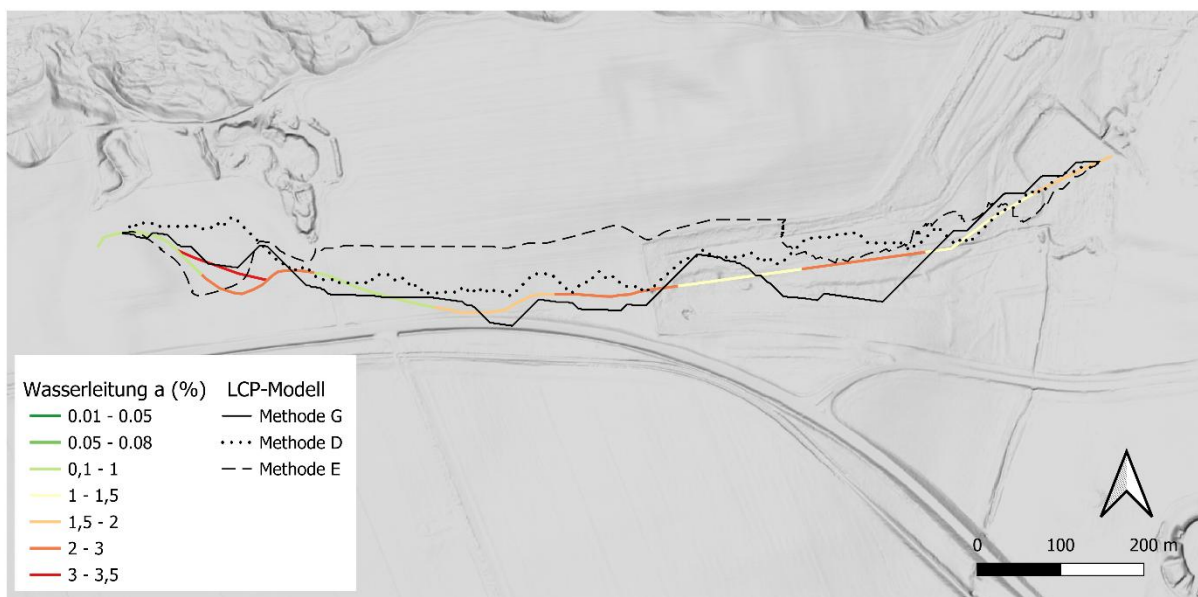


Abbildung 38 zeigt den Vergleich der Wasserleitung a mit den durch die Methoden D, E und G erstellten LCP-Trassen. Die drei Methoden erzielten jeweils gute Validierungswerte.

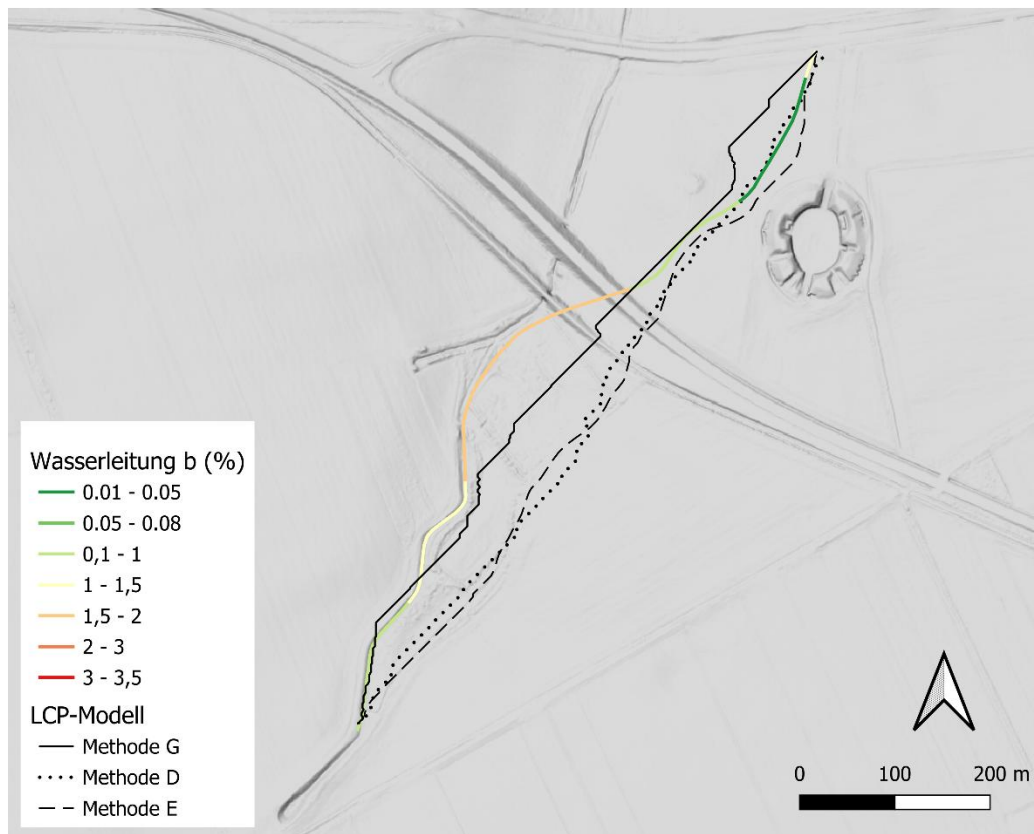


Abbildung 39 zeigt den Vergleich der Wasserleitung b mit den durch die Methoden D, E und G erstellten LCP-Trassen.

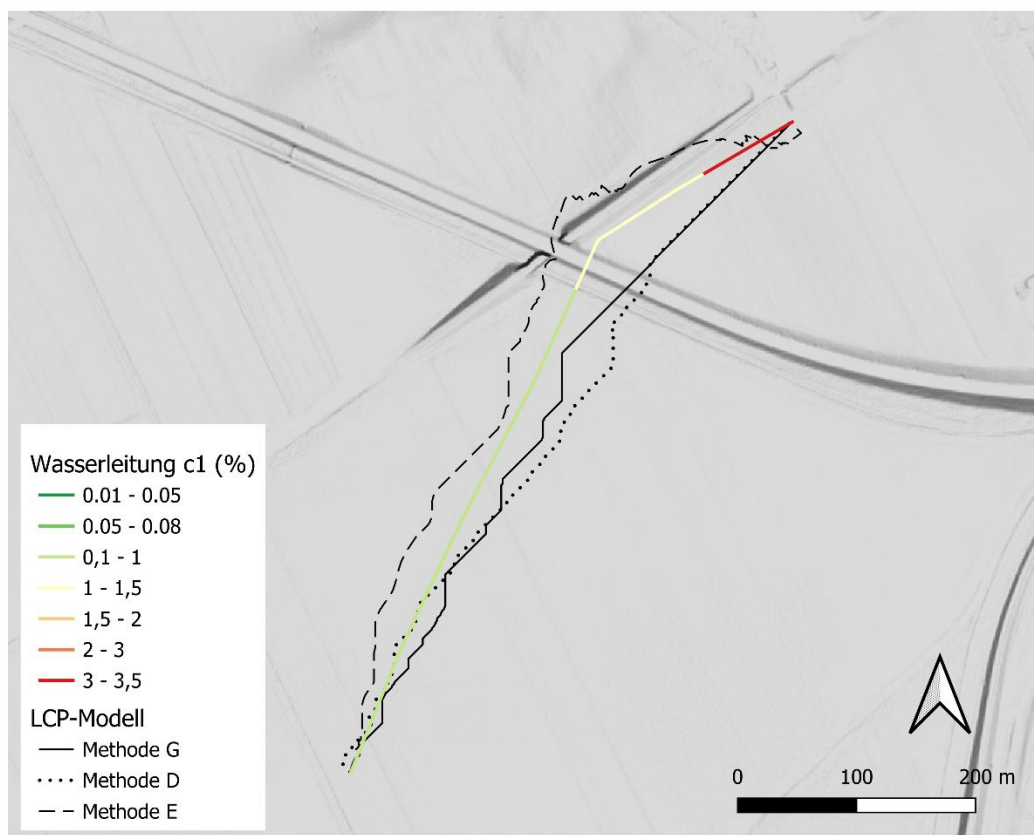


Abbildung 40 zeigt den Vergleich der Wasserleitung c_1 mit den durch die Methoden D, E und G erstellten LCP-Trassen.

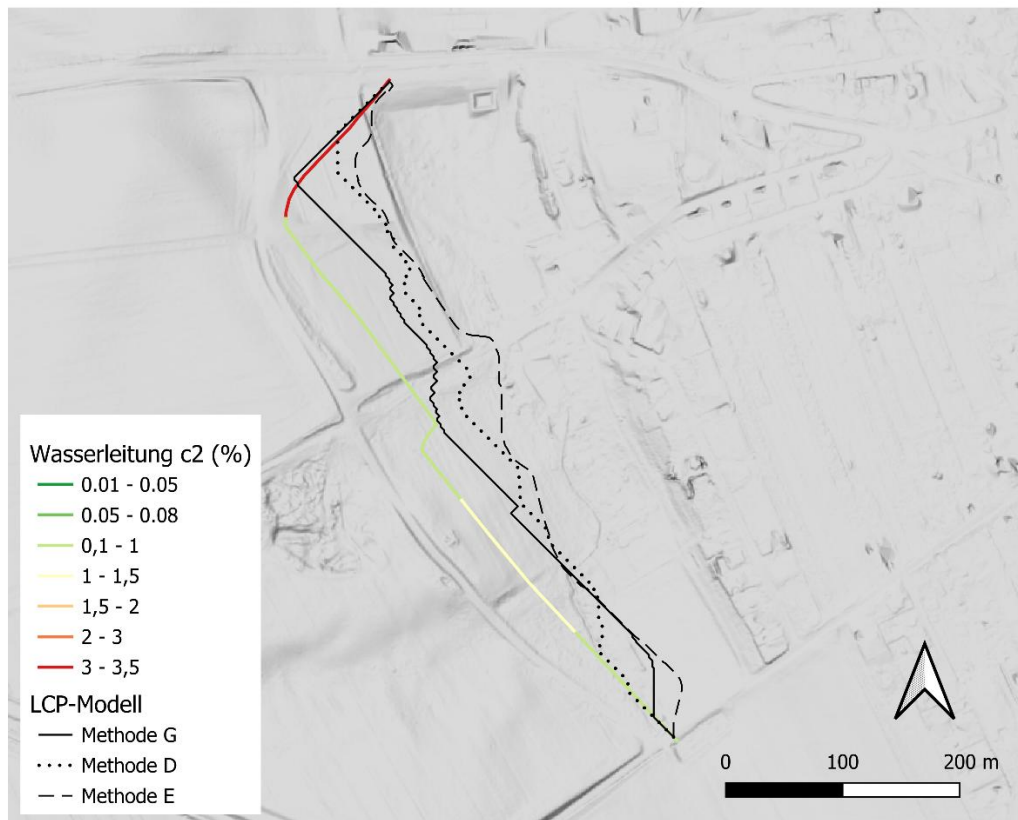


Abbildung 41 zeigt den Vergleich der Wasserleitung c2 mit den durch die Methoden D, E und G erstellten LCP-Trassen.



Abbildung 42 zeigt den Vergleich der Wasserleitung c3 mit den durch die Methoden D, E und G erstellten LCP-Trassen.



Abbildung 43 zeigt den Vergleich der Wasserleitung d1 mit den durch die Methoden D, E und G erstellten LCP-Trassen.

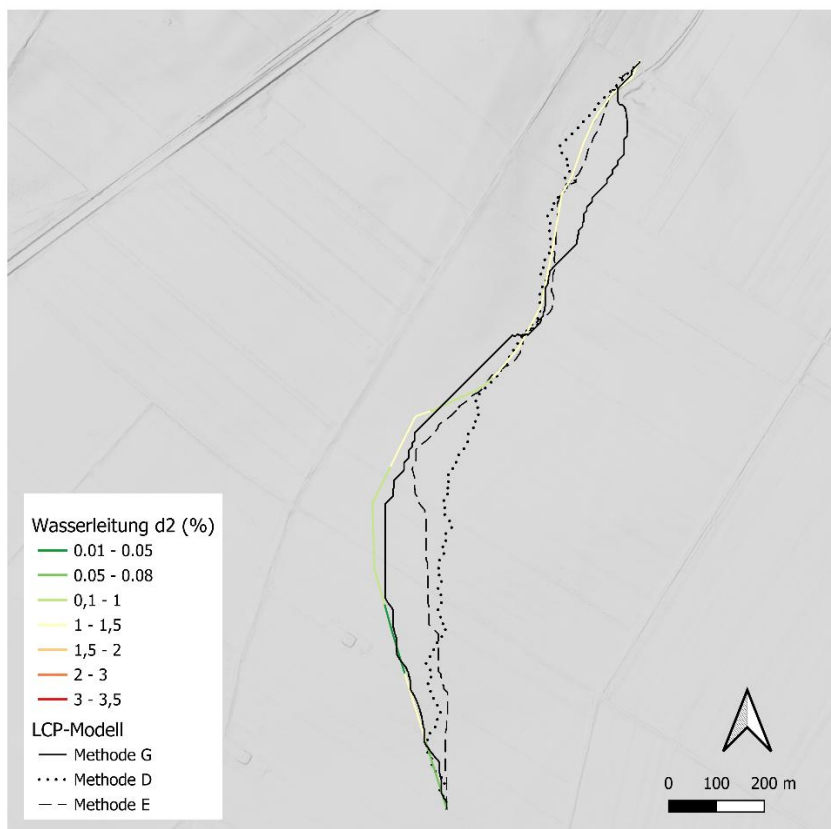


Abbildung 44 zeigt den Vergleich der Wasserleitung d2 mit den durch die Methoden D, E und G erstellten LCP-Trassen.

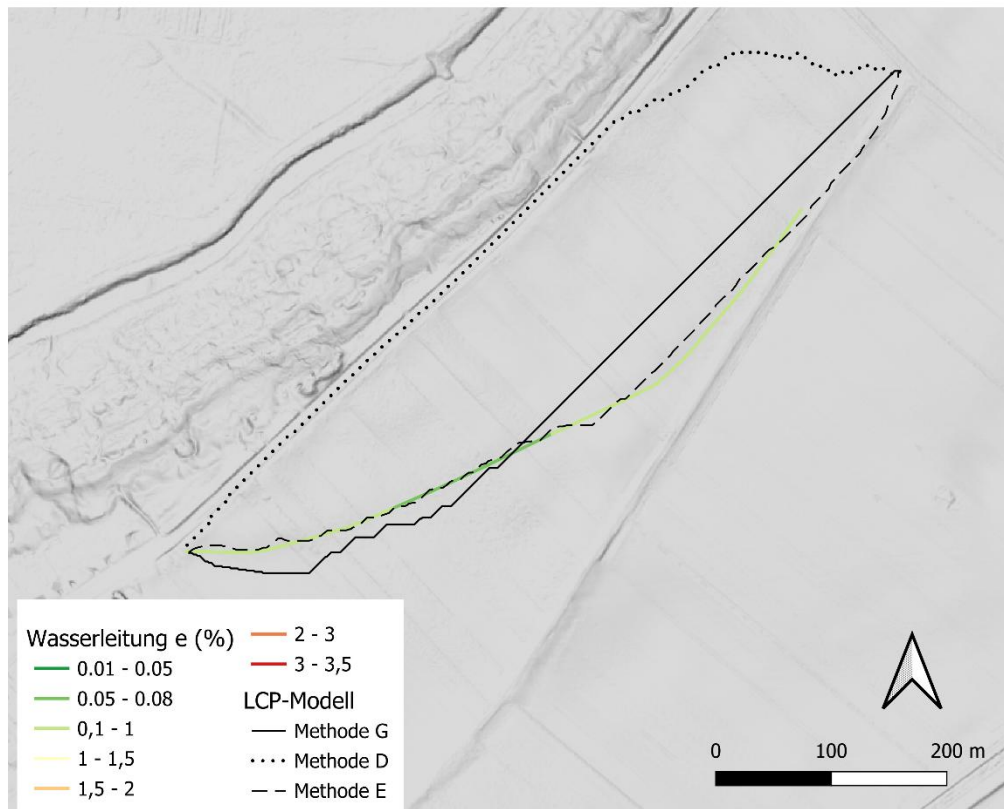


Abbildung 45 zeigt den Vergleich der Wasserleitung e mit den durch die Methoden D, E und G erstellten LCP-Trassen.

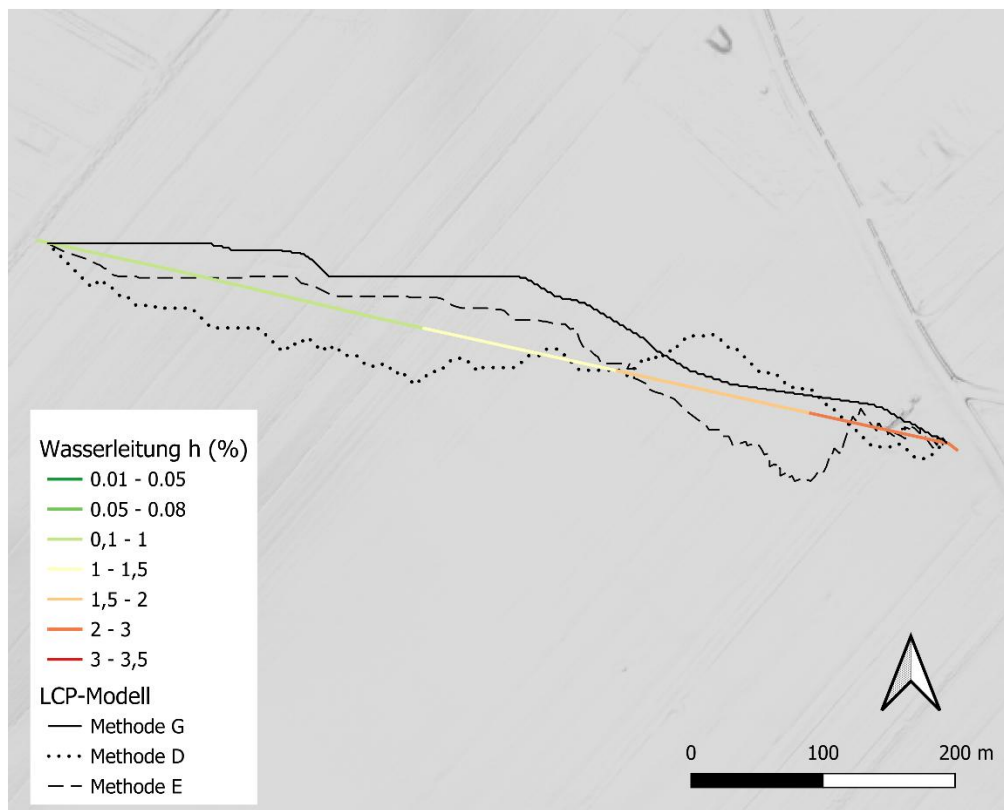


Abbildung 46 zeigt den Vergleich der Wasserleitung h mit den durch die Methoden D, E und G erstellten LCP-Trassen.

Zusammenfassung

Modellierung antiker Wasserversorgungssysteme: Ein Kostenpfad-Methodenvergleich am Beispiel des römischen Carnuntum

In der Archäologie haben sich Least-Cost-Path-Methoden (LCP) schon lange als nützliches Werkzeug etabliert. Für die Modellierung von römischen Wasserleitungen wird diese Methode aber bis jetzt nur vereinzelt (beispielsweise bei der Rekonstruktion des Barcino-Aquädukts im heutigen Barcelona) genutzt. Ausgehend dieser Forschungslücke zielt die vorliegende Arbeit darauf ab, zu untersuchen, inwieweit sich diese für solche Trassen eignen. Dabei wurde die Hypothese verfolgt, dass römische Wasserleitungen nach dem Prinzip der Kostenminimierung unter Berücksichtigung von Gefälle und Erdbewegungsaufwand geplant wurden. Durch den Vergleich mehrerer Methoden in Python und QGIS wurde die Hypothese bewertet. Als Untersuchungsraum diente Carnuntum, eines der am besten erforschten Gebiete, in dem neun durch Geoprospektion und Grabungen nachgewiesene Wasserleitungen vorliegen. Die Ergebnisse zeigen, dass Least-Cost-Path-Modelle grundsätzlich geeignet sind, den Verlauf römischer Wasserleitungen auf Basis topografischer Parameter zu rekonstruieren. In vielen Fällen stimmen die modellierten Trassen räumlich gut mit den archäologisch nachgewiesenen Verläufen überein. Besonders die Methode G erzielte mit durchschnittlichen LSED-Werten von 41,72 m und DFD-Werten von 75,6 m sehr geringe Abweichungen und liegt damit im Rahmen vergleichbarer Studien. Am Fallbeispiel des Großen Kanals wird schließlich deutlich, dass auch komplexe Trassen grundsätzlich modellierbar sind und eine Wasserversorgung über große Distanzen möglich erscheint. Allerdings müssen LCP-Studien stets in Kombination mit weiteren Studien und geoprospektiven Untersuchungen interpretiert werden, um eine ganzheitliche Bewertung zu erzielen. Auch spielt die Wahl der Modellparameter einen deutlichen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Modellgüte. und erfordert eine sorgfältige, kontextabhängige Feinabstimmung.

Schlagworte: Archäologie / Least-Cost-Path / Wasserleitungen / Aquädukte / topografische Untersuchung / römische Antike / Carnuntum

Abstract

Modeling ancient water supply systems: A comparison of cost path methods using a case study of Roman Carnuntum

Least-cost path (LCP) methods have long been established as a useful tool in archaeology. However, for modeling Roman aqueducts, this method has so far only been used sporadically (for example, in the reconstruction of the Barcino Aqueduct in present-day Barcelona). Based on this research gap, the present study aims to investigate the extent to which these methods are suitable for such routes. The hypothesis pursued was that Roman aqueducts were planned according to the principle of cost minimization, taking into account gradient and earthmoving costs. This hypothesis was evaluated by comparing several methods in Python and QGIS. The study area was Carnuntum, one of the best-researched regions, where nine aqueducts have been identified through geoprospection and excavation. The results show that least-cost path models are fundamentally suitable for reconstructing the course of Roman aqueducts based on topographic parameters. In many cases, the modeled routes correspond well spatially with the archaeologically confirmed courses. Method G, in particular, achieved very low deviations with average LSED values of 41.72 m and DFD values of 75.6 m, placing it within the range of comparable studies. The case study of the Grand Canal clearly demonstrates that even complex routes can be modeled in principle, and that water supply over long distances appears feasible. However, LCP studies must always be interpreted in conjunction with other studies and geoprospective investigations to achieve a comprehensive assessment. Furthermore, the choice of model parameters has a significant and considerable influence on model accuracy and requires careful, context-dependent fine-tuning.

Keywords: Archaeology / Least-Cost-Path / Water conduits / Aqueducts / Topographical survey / ancient Rom / Carnuntum