

Geomorphologie

Das Gedächtnis der Landschaft

Geostatistische Annäherung an eine von rezenten anthropogenen
Überprägungen bereinigte Geländeoberfläche

Verfasser:

Veit Höfler

Ort, Datum:

Dresden, 02. Februar 2026

Hinweis:

Diese Arbeit basiert auf öffentlich zugänglichen historischen Messtischblättern des 19. Jahrhunderts, bereitgestellt durch die Deutsche Fotothek der SLUB Dresden. Ergänzend wurde ein rezent verfügbares Digitales Geländemodell des Freistaats Sachsen zur strukturellen Plausibilisierung, Kontextualisierung und zum vergleichenden Abgleich herangezogen.

Lizenz:

Diese Arbeit ist unter der Creative-Commons-Lizenz **CC BY 4.0** lizenziert.

Kontakt: veit.hoefler@gmail.com

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Zusammenfassung	IV
Abstract	V
1 Einleitung und Motivation	1
2 Untersuchungsgebiet	2
3 Methodik	3
3.1 Historische Karten und Höhendaten	4
3.2 Modellierungsgebiet und Modellierungsfläche	5
3.3 Geostatistische Interpolation	5
3.4 Sensitivitätsanalyse: Variation der Talgeometrie	6
4 Ergebnisse	7
4.1 Darstellung des interpolierten Hauptmodells	7
4.2 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	8
4.3 Analyse der Kriging-Standardabweichung (Modell 1)	9
5 Diskussion	10
5.1 Einordnung der Kriging-Standardabweichung	11
5.2 Höhenprofile als Maß der Modellgüte	11
5.3 Vergleichsinterpolation: IDW	15
5.4 Rezent-Modell-Differenzen und interdisziplinäre Perspektive	15
6 Ausblick	17
6.1 Datenunsicherheiten und historische Quellenbasis	17
6.2 Anisotropie und Variogrammstruktur	18
6.3 Modellauflösung und Maßstabsebene	18
6.4 Externe Validierung und weiterführende Ansätze	18
6.5 Potenziale der Differenzanalyse	19
6.6 Geomorphologische Lesbarkeit	19
Literaturverzeichnis	22
Anhang: Orthophoto des Untersuchungsgebiets	24

Abbildungsverzeichnis

1	Übersicht: Dresdner Elbtalweitung	2
2	Methodische Übersichtskarte	4
3	Vergleich von Variogrammodellen	5
4	σ_K -Maske und Verteilung	6
5	Interpolationsergebnisse des Hauptmodells	7
6	Rezent-Modell: Höhenunterschiede	8
7	Ergebnisse Sensitivitätsanalyse	9
8	Kriging-Standardabweichung im Hauptmodell	10
9	Höhenprofile A-B und C-D: absolute Höhen und Δz	12
10	Rezent-Modell-Differenzen und Modellsensitivität	16
11	Geomorphologische Lesbarkeit des interpolierten Hauptmodells	20
12	Orthophoto des Untersuchungsgebiets	24

Tabellenverzeichnis

1	Verwendete historische Messtischblätter	4
2	Qualitative Befunde Profil A–B	13
3	Qualitative Befunde Profil C–D	14
4	Qualitative Bewertung des IDW-Vergleichs	15

Zusammenfassung

Die Interpretation heutiger digitaler Geländemodelle wird in vielen Landschaftsräumen durch rezente anthropogene Überprägungen erschwert. Insbesondere in Flussauen überlagern technische Eingriffe wie Deiche, Staubecken oder Geländeanhebungen die ursprüngliche Topographie und begrenzen die Aussagekraft aktueller Höhenmodelle für geomorphologische, hydrologische und geoarchäologische Fragestellungen.

Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Arbeit die Machbarkeit einer geostatistischen Ableitung einer idealisierten, möglichst von rezenten anthropogenen Überprägungen bereinigten Geländeoberfläche auf Grundlage historischer Kartenquellen. Im Fokus steht dabei nicht ein konkreter historischer Zeitstand, sondern ein strukturell konsistentes Terrainmodell, das gezielt von rezenten Überprägungen bereinigt ist.

Die Modellierung basiert auf manuell extrahierten Höhenpunkten aus Messtischblättern des 19. Jahrhunderts, ergänzt durch strukturstützende Talsohlenpunkte aus einem aktuellen Digitalen Geländemodell. Die Interpolation erfolgt mittels Ordinary Kriging auf Basis einer empirischen Variogrammanalyse. Ergänzend wurde die Robustheit des Modells durch einen Sensitivitätstest mit geringfügig variiertem Talgeometrie überprüft.

Die Ergebnisse legen eine strukturell konsistente Annäherung an zentrale geomorphologische Elemente wie Talsohle, Hangkante und Terrassenstufen nahe; die Sensitivität gegenüber kleinräumigen Talverlagerungen ist gering. Die Kriging-Standardabweichung erlaubt eine räumlich differenzierte Einschätzung der internen Modellunsicherheit. Insgesamt versteht sich die Arbeit explizit als Machbarkeitsnachweis mit Potenzial für weiterführende Differenzanalysen und interdisziplinäre Anwendungen, nicht als exakte Ableitung eines historischen Geländezustands.

Keywords: Digitale Geländemodelle; historische Reliefableitung; Messtischblätter; Geomorphologie; Geostatistik; Flussauen; Anthropogene Überprägung

Abstract

Modern digital terrain models often reflect recent human modification, especially in floodplains where dikes, reservoirs, and embankments overprint the original relief. This limits their use for geomorphological, hydrological, and geoarchaeological questions.

This study tests whether an idealized reference terrain can be derived from historical maps. The goal is not a precise historical time slice, but a terrain surface that is largely free of recent anthropogenic overprints.

Elevation points are manually extracted from nineteenth-century topographic maps and complemented by valley-floor support points derived from a contemporary terrain model. The surface is interpolated using Ordinary Kriging based on an empirical variogram. A second scenario with a slightly modified valley geometry is used to test sensitivity.

The results show a coherent representation of valley floors, slope breaks, and terrace levels, with low sensitivity to small-scale valley shifts. Kriging standard deviation provides a spatial indication of internal model uncertainty. Overall, the work should be read as a feasibility study rather than an exact reconstruction of a specific past terrain state.

Keywords: Digital terrain models; historical relief reconstruction; historical topographic maps; geomorphology; geostatistics; floodplains; anthropogenic overprint

1 Einleitung und Motivation

Landschaften besitzen ein bemerkenswertes Gedächtnis, doch viele ihrer Spuren liegen heute unter Straßen, Dämmen, technischen Bauwerken oder jahrzehntelangen Aufschüttungen verborgen. Moderne Eingriffe überformen das ursprüngliche Relief so deutlich, dass frühere Geländeformen im heutigen Erscheinungsbild kaum mehr erkennbar sind. Wer geomorphologische Prozesse verstehen möchte, muss solche jüngeren Überprägungen analytisch ausblenden und das Gelände näherungsweise in einen Zustand überführen, in dem natürliche Strukturen klarer hervortreten. Die Ableitung früherer Oberflächen bildet damit einen zentralen Zugang zur Rekonstruktion von Landschaftsentwicklung.

Digitale Geländemodelle auf Basis von LiDAR-Daten sind in der Geomorphologie etabliert und finden darüber hinaus in hydrologischen und geoarchäologischen Anwendungen breite Verwendung [1, 2, 3]. Sie bilden jedoch ausschließlich den rezenten Zustand der Erdoberfläche ab. Historische Höhenmodelle, etwa aus Luftbildphotogrammetrie [4] oder aus kartographischen Quellen, wurden bislang nur punktuell genutzt. Insbesondere analoge Messtischblätter des 19. Jahrhunderts können geomorphologisch aussagekräftige Höhen- und Geländedaten liefern [5], deren Auswertung jedoch durch Generalisierung, Messungenauigkeiten und Transformationseffekte erschwert ist. Geostatistische Verfahren wie Kriging finden in diesem Kontext bislang nur selten eine systematische Anwendung, insbesondere zur gezielten Ausblendung anthropogener Überprägungen.

In einer früheren Arbeit des Autors wurde gezeigt, dass sich modellhaft abgeleitete Referenzoberflächen auf Grundlage von Expertenwissen und geostatistischen Ansätzen entwickeln lassen [6]. In Weiterführung dieser Ansätze steht in der vorliegenden Arbeit die Ableitung einer idealisierten, von rezenten anthropogenen Überprägungen bereinigten Geländeoberfläche im Mittelpunkt. Im Unterschied zu klassischen historischen Rekonstruktionen wird kein spezifischer Zeitstand angestrebt; vielmehr soll ein Terrainmodell entstehen, das rezent überprägte Strukturen nicht reproduziert und die geomorphologisch erwartbaren Formen des Talbodens strukturell abbildet.

Ziel der Arbeit ist es, aus der Kombination historischer Messtischblatt-Höhendaten und rezenten, strukturstützenden Talsohlenpunkten ein digitales Geländemodell abzuleiten, das eine plausible Referenzoberfläche beschreibt. Methodisch basiert die Umsetzung auf einer geostatistischen Interpolation mittels Kriging, ergänzt durch eine Sensitivitätsvariante zur Bewertung topographischer Unsicherheiten.

Die Anwendung erfolgt exemplarisch in der Cossebauder Elbaue im westlichen Stadtgebiet von Dresden (Sachsen), einem Landschaftsabschnitt, dessen heutiges Relief durch das Pumpspeicherwerk Niederwartha sowie durch jüngere Hochwasserschutzmaßnahmen deutlich überprägt ist und der damit als typisches Testgebiet für rezent anthropogen beeinflusste Auenräume dient.

Kernaussage: Einleitung

Diese Arbeit untersucht die geostatistische Ableitung einer von rezenten anthropogenen Überprägungen bereinigten Referenzoberfläche in der Cossebauder Elbaue zwischen Niederwartha und Briesnitz. Historische Höhendaten aus Messtischblättern werden mit rezenten, strukturstützenden Talsohlenpunkten kombiniert, um ein plausibles Terrainmodell abzuleiten. Im Zentrum steht nicht die Rekonstruktion eines konkreten historischen Zeitstands, sondern eine strukturell begründete Referenzoberfläche.

2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt im nordwestlichen Abschnitt der *Dresdner Elbtalweitung*, einem breiten Talraum mit ausgeprägten Auenflächen und gestuften Terrassenhängen. Das Relief wird maßgeblich durch die Elbe als zentrales geomorphologisches Leitelement geprägt [7]. Der räumliche Schwerpunkt der Analyse liegt auf der linkselbischen Seite, insbesondere im Bereich der *Cossebauder Elbaue* und der angrenzenden *Cossebauder Niederterrassen*.

Die Cossebauder Elbaue stellt einen reliefarmen, überwiegend sedimentär geprägten Auenraum dar, der sich klar von den höher gelegenen Niederterrassen absetzt. Diese Terrassenstufe bildet das mittlere Geländeniveau im Untersuchungsraum und markiert eine deutliche morphologische Grenze zwischen Talboden und Hangbereich. Rechtselbisch angrenzende Teilflächen im Bereich Radebeul werden mitberücksichtigt, stehen jedoch nicht im Zentrum der Untersuchung.

Das Gebiet ist durch mehrere markante anthropogene Eingriffe geprägt. Hervorzuheben ist das *Pumpspeicherwerk Niederwartha*, das zwischen 1927 und 1930 errichtet wurde und mit Unter- und Oberbecken großflächig in die Elbwiesen eingebettet ist. Die Anlage verändert die Geländeform im westlichen Abschnitt der Elbaue deutlich sichtbar [8].

Ein weiteres relevantes Eingriffselement stellt der im Zuge der Hochwasserschutzmaßnahmen nach 2002 errichtete Deich zwischen Gohlis und Cossebaude dar, der das lokale Höhenprofil entlang der linken Elbseite beeinflusst [9].

Abbildung 1 zeigt die Lage der *Dresdner Elbtalweitung* im überregionalen Kontext. Die geostatistische Analyse konzentriert sich auf einen begrenzten Abschnitt dieses Talraums – die linkselbische Cossebauder Elbaue zwischen Niederwartha und Briesnitz. Die genaue Abgrenzung der Modellierungsfläche sowie alle relevanten Datengrundlagen sind im Abschnitt 3.2 dargestellt (vgl. Abbildung 2).



Abbildung 1: Schematische Übersicht der *Dresdner Elbtalweitung* im Raum Meißen–Dresden–Pirna. Die rote Linie kennzeichnet die naturräumliche Abgrenzung der Elbtalweitung; die schwarz umrandete Polygonkontur markiert die Modellierungsfläche. Die Darstellung dient der räumlichen Einordnung und besitzt keinen analytischen Maßstabs- oder Orientierungsanspruch.

Die eigentliche Modellierungsfläche umfasst ausschließlich einen Teilbereich der Cossebauder Elbaue zwischen der Eisenbahnbrücke Niederwartha im Westen und der Autobahnbrücke im Osten. Südlich wird sie durch die Hangkante zur Niederterrasse begrenzt, nördlich durch den Verlauf der Elbe. Die Auswahl dieses Teilgebiets erfolgte aufgrund

seiner geomorphologischen Homogenität sowie der klar dokumentierten anthropogenen Überprägung, die es als Testfeld für die geostatistische Ableitung einer idealisierten Geländeoberfläche besonders geeignet erscheinen lässt.

Kernaussage: Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst die linkselbische Cossebauder Elbaue im Raum Dresden und ist geomorphologisch gegliedert und durch markante anthropogene Eingriffe überprägt. Die Modellierungsfläche dient als exemplarisches Testgebiet für die geostatistische Ableitung einer idealisierten, von rezenten Überprägungen bereinigten Geländeoberfläche.

Auf Grundlage dieser geomorphologischen Ausgangslage und der sehr gut abgrenzbaren, rezent überprägten Strukturelemente wird im Folgenden die Datengrundlage sowie das geostatistische Vorgehen zur Ableitung eines kartendominierten, idealisierten Reliefmodells beschrieben.

Zur visuellen Einordnung der rezenten Situation im Untersuchungsgebiet ist ein Orthophoto im Anhang beigefügt (vgl. Anhang: Orthophoto des Untersuchungsgebiets).

3 Methodik

Zur Reduktion von Randartefakten wurden zusätzlich randnahe Stützpunkte außerhalb der Modellierungsfläche in die Interpolation einbezogen; Auswertung und Ergebnisdarstellung erfolgen ausschließlich innerhalb der Modellierungsfläche.

Ziel dieser Untersuchung ist die geostatistische Ableitung einer idealisierten, möglichst von rezenten anthropogenen Überprägungen bereinigten Geländeoberfläche auf Grundlage historischer Höhendaten aus analogen Kartenquellen. Im Vordergrund steht dabei nicht die exakte Abbildung eines konkreten historischen Zeitstands, sondern die Frage, inwieweit sich aus einer begrenzten, kartendominierten Datenbasis eine geomorphologisch plausible Referenzoberfläche ableiten lässt. Der Ansatz ist als Machbarkeitsstudie angelegt.

Zur methodischen Einordnung und internen Plausibilisierung der Ergebnisse wurde ergänzend ein Digitales Geländemodell mit einer Rasterauflösung von $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ (DGM1) des Freistaats Sachsen herangezogen [10]. Es dient sowohl zur strukturellen Unterstützung der Modellierung als auch zum Abgleich zwischen modellhaft abgeleiteter und rezent beobachtbarer Topographie.

Die methodische Umsetzung basiert auf der Kombination historischer Höheninformationen, strukturstützender, rezent abgeleiteter Zusatzpunkte und geostatistischer Interpolation. Eine Übersicht über alle verwendeten Datengrundlagen, geometrischen Elemente und Modellierungsgrenzen ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: Methodische Übersicht der zur geostatistischen Ableitung verwendeten Datengrundlagen im Modellierungsgebiet. Dargestellt sind die Modellierungsfläche, historische Höhenpunkte aus Messtischblättern (Kreuzsymbol +) sowie strukturstützende, aus dem rezenten Digitalen Geländemodell abgeleitete Talsohlenpunkte (Kreuzsymbol x). Die Lage der Profile A–B und C–D ist eingezeichnet (vgl. Abschnitt 5.2). Die DGM1-Schummerung dient der räumlichen Orientierung und der Veranschaulichung rezent anthropogener Überprägungen.

3.1 Historische Karten und Höhendaten

Die historische Datengrundlage bilden amtliche Messtischblätter im Maßstab 1:25 000 aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, die als georeferenzierte Rasterdaten über die *Deutsche Fotothek* der SLUB Dresden bezogen wurden [11]. Die verwendeten Kartenblätter decken das Untersuchungsgebiet vollständig ab und sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Die Messtischblätter enthalten punktuelle Höhenangaben sowie Höhenlinien und liegen als georeferenzierte Rasterdaten im Koordinatensystem ETRS89 / UTM Zone 33N vor. Die Höhendaten wurden manuell aus den Karten extrahiert, indem kartographisch ausgewiesene Höhenpunkte visuell identifiziert, lagegenau digitalisiert und mit zugehörigen Höhenwerten versehen wurden. Der resultierende Höhendatensatz liegt in strukturierter Form als Punktliste (X, Y, Z) vor und bildet die Grundlage der geostatistischen Interpolation.

Auf eine flächige Digitalisierung von Höhenlinien wurde bewusst verzichtet, da diese generalisierte Darstellungen gleicher Höhe sind und keine eindeutig verortbaren Einzelpunkte liefern. Ergänzend wurden entlang der rezenten Talsohle zusätzliche Höhenpunkte aus dem DGM1 abgeleitet, um die geomorphologisch erwartbare Talstruktur im Auenbereich zu stabilisieren.

Tabelle 1: Verwendete historische Messtischblätter

Dateiname	Kartenblatt	Jahr	ID
Wilsdruff_1881.tiff	Section Wilsdruff	1881	10007352
Koetzschenbroda_1882.tiff	Section Kötzschenbroda	1882	10007333

3.2 Modellierungsgebiet und Modellierungsfläche

Die Interpolation erfolgte in einem erweiterten Modellierungsgebiet (Berechnungsraum), um Randartefakte zu reduzieren; Auswertung und Ergebnisdarstellung erfolgen ausschließlich innerhalb der Modellierungsfläche. Diese umfasst den Talraum zwischen der Eisenbahnbrücke Niederwartha im Westen und der Autobahnbrücke im Osten, begrenzt durch die Elbe im Norden und die Hangkante zur Niederterrasse im Süden. Zur Reduktion von Randartefakten wurden zusätzlich randnahe Stützpunkte aus dem unmittelbaren Umfeld der Modellierungsfläche in die Berechnung einbezogen.

In den Bereichen rezent überprägter Strukturen (Deichkörper, Staubecken u.a.) wurden bewusst keine rezenten Zusatzinformationen in die Interpolation eingebracht, sodass die rezent überprägten Geländeformen im geostatistisch modellhaft abgeleiteten Referenzterrain nicht reproduziert werden und ein möglichst von rezenten Überprägungen entlastetes, kartendominiertes Referenzrelief abgeleitet wird.

3.3 Geostatistische Interpolation

Die flächenhafte Ableitung der Geländeoberfläche erfolgte mittels geostatistischer Interpolation unter Verwendung von *Ordinary Kriging*, einem Verfahren, das die räumliche Autokorrelation zwischen beobachteten Höhenwerten nutzt, um unbekannte Werte auf Grundlage benachbarter Beobachtungen zu schätzen [12].

Zur Beschreibung der räumlichen Struktur der Höhendaten wurde eine Variogrammanalyse durchgeführt. Abbildung 3 zeigt das empirische Variogramm sowie die Anpassung verschiedener theoretischer Modelltypen (sphärisch, exponentiell, gaußförmig, Matérn). Die Modellparameter (Nugget, Sill, Range) wurden auf Grundlage plausibler Wertebereiche und des empirischen Variogrammverlaufs festgelegt, um die Auswirkungen unterschiedlicher Strukturannahmen auf die Interpolation vergleichend zu beurteilen.

Die Interpolation wurde auf einem regelmäßigen Raster mit 1 m Zellgröße durchgeführt. Zusätzlich zum Höhenmodell wurde die Kriging-Standardabweichung als Maß der internen Schätzunsicherheit berechnet.

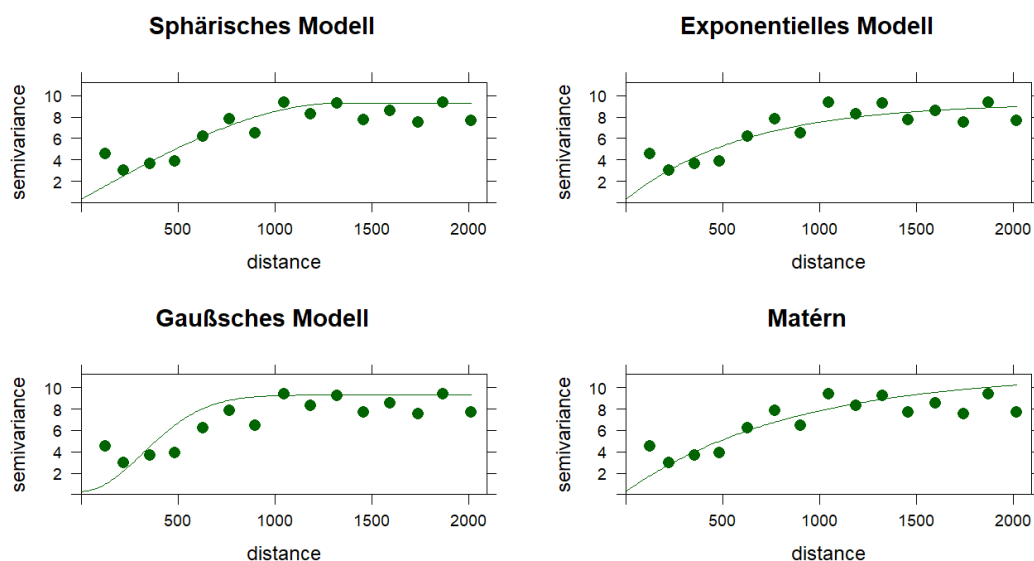


Abbildung 3: Empirisches Variogramm mit theoretischer Anpassung durch verschiedene Modelltypen.

3.4 Sensitivitätsanalyse: Variation der Talgeometrie

Zur Prüfung der Robustheit der Modellierung gegenüber kleinräumigen topographischen Unsicherheiten wurde – aufbauend auf dem zuvor beschriebenen geostatistischen Ansatz – ein alternatives Interpolationsmodell (Modell 2) berechnet. Hierfür wurde der Verlauf der rezenten Talsohle auf Grundlage aktueller topographischer Karten (TK25) leicht versetzt und mit zusätzlichen Stützpunkten versehen. Die zugehörigen Höhenwerte wurden dem DGM1 entnommen und um einen konstanten Betrag von 0,3 m (heuristischer Testwert zur Sensitivitätsprüfung) angehoben; dies dient ausschließlich der Sensitivitätsprüfung gegenüber plausiblen, kleinräumigen Variationen der Talsohlenlage und ist keine Aussage über einen historischen Zeitstand.

Interpolationsverfahren, Rasterauflösung und Variogrammparameter wurden gegenüber dem Hauptmodell (Modell 1) unverändert beibehalten, sodass Unterschiede zwischen den Modellen ausschließlich auf die veränderte Talgeometrie zurückzuführen sind.

Zur qualitativen Einordnung der internen Schätzunsicherheit wurde ergänzend eine Maskierung der Kriging-Standardabweichung (σ_K) mit einem Schwellenwert von $T = 2$ m vorgenommen. Flächen mit $\sigma_K \leq 2$ m markieren Bereiche erhöhter interner Modellstabilität und bilden die Grundlage für die nachfolgende Differenzanalyse (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 6).

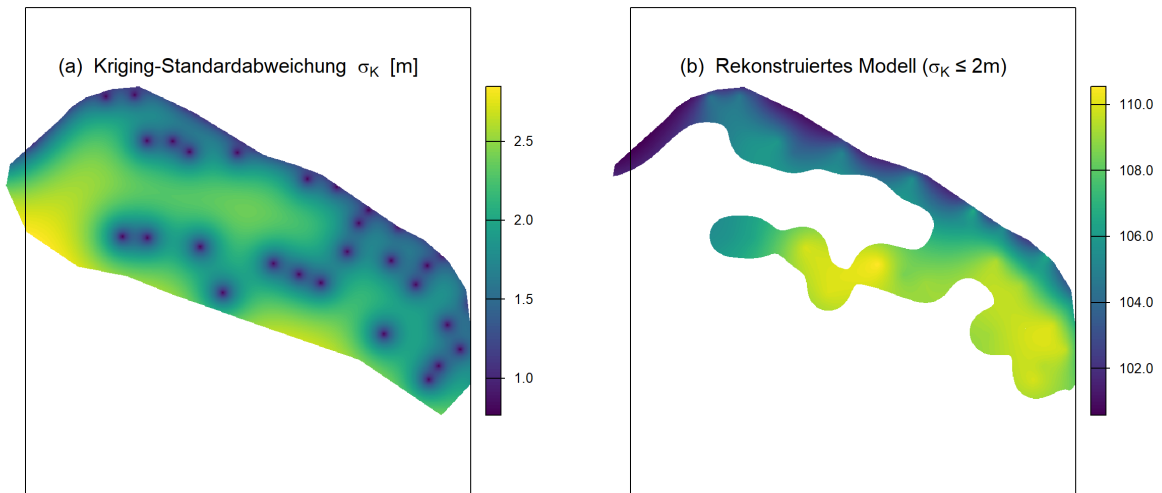


Abbildung 4: Kriging-Standardabweichung σ_K im Modellierungsgebiet und Schwellenwert-Maske ($\sigma_K \leq 2$ m). Links: räumliche Verteilung von σ_K ; rechts: statistische Verteilung mit Markierung bei 2 m.

Der Schwellenwert wurde pragmatisch gewählt und orientiert sich an der reliefarmen Topographie des Untersuchungsgebiets sowie an der Größenordnung der zu erwartenden Unsicherheiten historischer Höhendaten.

Kernaussage: Methodik

Die Methodik basiert auf der geostatistischen Ableitung einer idealisierten Geländeoberfläche mittels Ordinary Kriging. Grundlage ist ein kartendominierter Höhendaten-satz aus Messtischblättern, ergänzt durch strukturstützende Talsohlenpunkte aus einem rezent verfügbaren Digitalen Geländemodell. Eine Sensitivitätsanalyse mit variiertem Talgeometrie dient der Prüfung der Robustheit der Interpolation gegenüber kleinräumigen topographischen Unsicherheiten.

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der geostatistischen Ableitung der Geländeoberfläche vorgestellt. Der Fokus liegt auf der Darstellung des interpolierten Hauptmodells (Modell 1), der Sensitivitätsanalyse sowie dem Vergleich mit dem rezent verfügbaren Digitalen Geländemodell.

4.1 Darstellung des interpolierten Hauptmodells

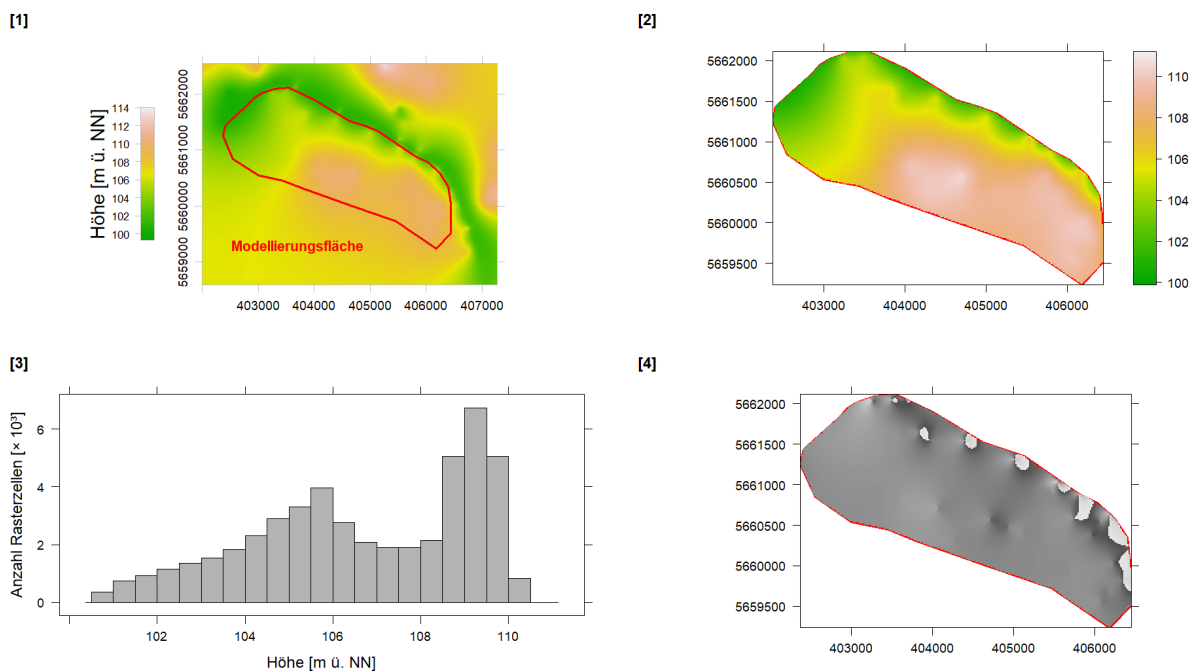


Abbildung 5: Ergebnisse des interpolierten Hauptmodells (Modell 1) auf Basis historischer Höhenpunkte und strukturstützender Talsohlenergänzungen. Oben links: Höhenmodell im Kontext des erweiterten Untersuchungsgebiets. Oben rechts: Detailausschnitt der Modellierungsfläche. Unten links: Histogramm der Höhenverteilung. Unten rechts: Hillshade-Darstellung zur Visualisierung der topographischen Struktur.

Die Ergebnisse der geostatistischen Interpolation des Hauptmodells sind in Abbildung 5 dargestellt. Der obere linke Kartenausschnitt zeigt das interpolierte Höhenmodell im Kontext des erweiterten Untersuchungsraums. Bereits auf dieser Maßstabsebene wird deutlich, dass anthropogene Strukturen wie Staubecken, Deiche oder Geländeanhebungen im mo-

dellhaft abgeleiteten Geländemodell nicht als dominante Formen ausgeprägt sind – konsistent damit, dass die Punktbasis diese rezenten Überprägungen bewusst nicht stützt.

In der oberen rechten Teilabbildung ist ein vergrößerter Ausschnitt der modellierten Elbaue dargestellt. Hier wird die flächenhafte Ausbildung des Elbverlaufs erkennbar. Der zentrale Talbereich ist von der umgebenden Hangkante abgegrenzt, was die strukturelle Rolle der ergänzenden Talsohlenpunkte verdeutlicht, ohne dabei den kartographisch überlieferten Reliefcharakter zu überprägen.

Das zugehörige Histogramm (unten links in Abbildung 5) veranschaulicht die Höhenverteilung im Modell. Der Wertebereich reicht von ca. 100,6 m bis 110,5 m, mit einer deutlichen Häufung zwischen 105 und 109 m. Der Median liegt bei 106,8 m, was in etwa der dominanten Höhenlage des Talbodens im Untersuchungsgebiet entspricht. Die leicht linksschiefe Verteilung ist konsistent mit einem überwiegend reliefarmen Gelände mit wenigen, aber relevanten Höhendifferenzen, wie es für reliefarme Auenlandschaften typisch ist.

Die rechte untere Teilabbildung zeigt das Modell zusätzlich als Hillshade-Darstellung. Hier werden die morphologischen Strukturen besonders sichtbar: die flächige Ausbildung des Auenbodens, sanfte Übergänge zu den Hangbereichen sowie feine, regelmäßig erscheinende Modellierungsspuren. Letztere lassen sich auf die räumliche Verteilung der Messpunkte zurückführen und werden in der Diskussion im Rahmen der Profilanalysen zur Modellgüte weiter eingeordnet (vgl. Abschnitt 5.2).

4.2 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Zur Einordnung der Sensitivitätsanalyse wird zunächst der Vergleich zwischen dem rezent verfügbaren Geländemodell und dem interpolierten Hauptmodell dargestellt (Abbildung 6). Die Sensitivitätsanalyse (Modell 2) dient nicht der Verbesserung des Modells, sondern der Prüfung der strukturellen Stabilität des Hauptmodells (Modell 1).

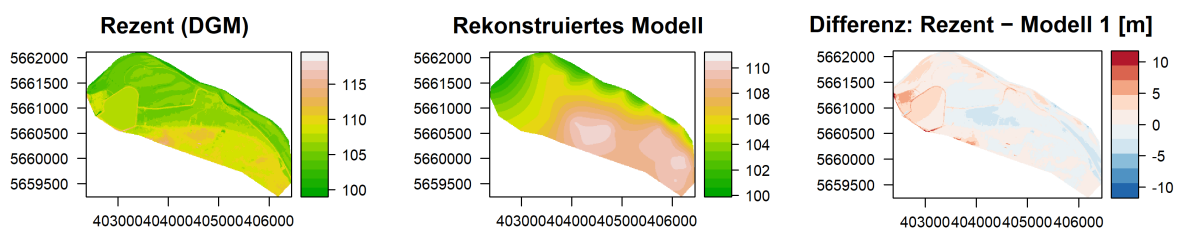


Abbildung 6: Vergleich rezent vs. Modell 1 mit Differenzraster (*rezent* – *Modell*); positive Werte markieren rezent höhere Oberflächen (Aufhöhungen), negative Werte Einschnitte/Abtrag.

Abbildung 6 stellt das rezente Digitale Geländemodell, das interpolierte Hauptmodell (Modell 1) sowie die daraus abgeleiteten Höhenunterschiede nebeneinander dar. Positive Differenzen markieren rezent höhere Geländeoberflächen (Aufhöhungen), negative Werte Einschnitte oder Abtragsbereiche.

Die Ergebnisse des alternativen Interpolationsmodells zur Sensitivitätsanalyse (Modell 2) sind in Abbildung 7 dargestellt. Trotz der gezielten Verschiebung der Talsohlenpunkte um etwa 15–20 m zeigen sich im Vergleich zum Hauptmodell keine wesentlichen Veränderungen der großräumigen Geländestruktur. Talbereich, Auenfläche und angrenzende Hangzonen bleiben in ihrer geomorphologischen Ausprägung weitgehend erhalten.

Auch die statistische Höhenverteilung (Histogramm) entspricht der des Hauptmodells, mit identischem Median (106,8 m) und vergleichbarem Wertebereich. Die Hillshade-Darstellung bestätigt diese Einschätzung visuell: Punktuelle Abweichungen entlang des variierten/verschobenen Talzugs bleiben lokal begrenzt und sind im Maßstab der Gesamtmodellierung marginal.

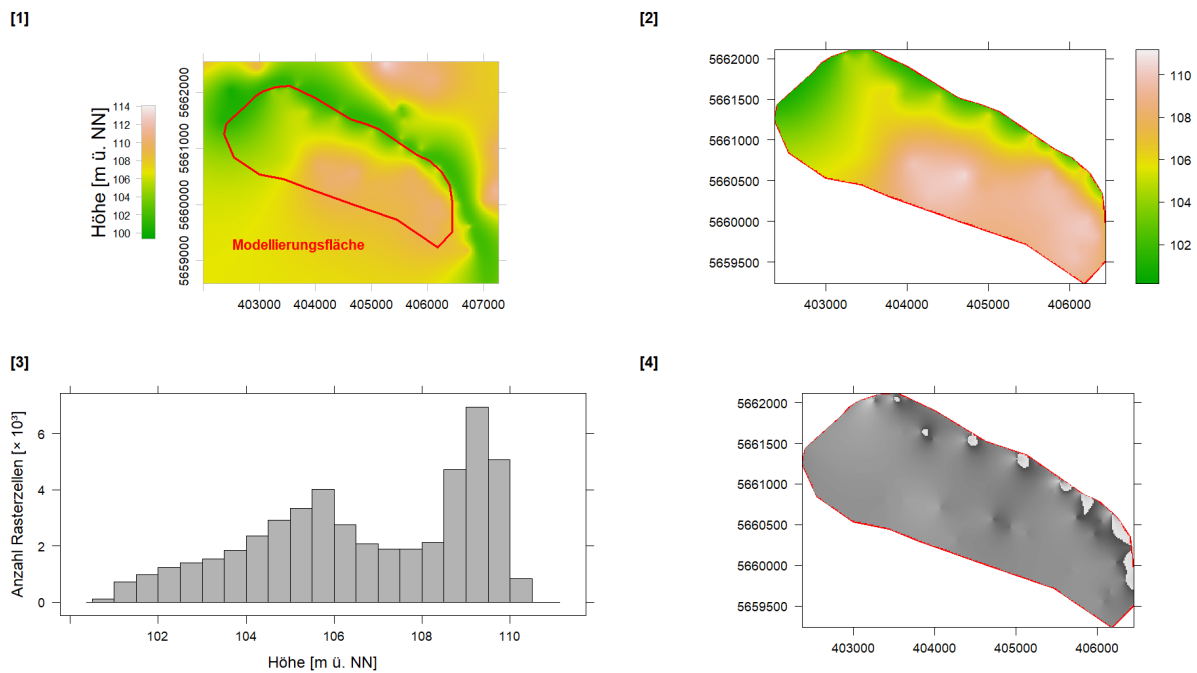


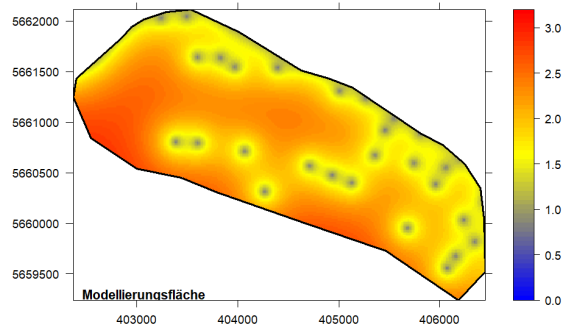
Abbildung 7: Ergebnisse des alternativen Interpolationsmodells (Modell 2) zur Sensitivitätsprüfung. Oben links: Höhenmodell im Untersuchungsraum. Oben rechts: Ausschnitt der Modellierungsfläche. Unten links: Histogramm der Höhenverteilung. Unten rechts: Hillshade-Darstellung.

4.3 Analyse der Kriging-Standardabweichung (Modell 1)

Zur Einschätzung der räumlichen Unsicherheiten im Hauptmodell (Modell 1) wurde die Kriging-Standardabweichung (σ_K) analysiert und kartiert. Während die Rezent-Modell-Differenzen potenzielle Überprägungen sichtbar machen, beschreibt die Kriging-Standardabweichung ausschließlich die interne Schätzunsicherheit der Interpolation. Die σ_K -Werte reichen von ca. 0,74 m bis 2,85 m; der Median liegt bei 1,97 m und der Mittelwert bei 1,95 m. Die Streuung beträgt 0,40 m. Niedrige Unsicherheiten ($< 1,0$ m) konzentrieren sich im zentralen Talbereich entlang der eingefügten Talsohlenpunkte, höhere Werte treten randnah bzw. bei größerem Punktabstand auf.

Die in Abbildung 8 dargestellte räumliche Verteilung der Kriging-Standardabweichung verdeutlicht die charakteristische Zunahme der Unsicherheit zu den Randbereichen des Modellgebiets, insbesondere in topographisch komplexen oder datensparsam abgedeckten Zonen.

[1]



[2]

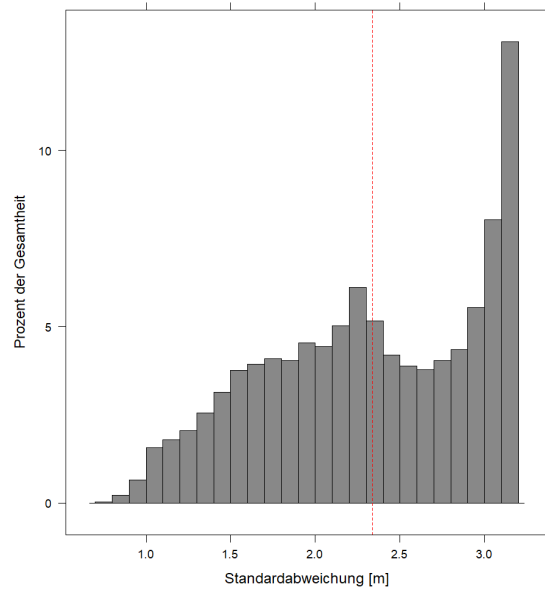


Abbildung 8: Räumliche Verteilung (links) und statistische Verteilung (rechts) der Kriging-Standardabweichung im interpolierten Hauptmodell (Modell 1).

Die räumlichen Muster der Schätzunsicherheit (σ_K) deuten im internen Vergleich zwischen Modell 1 und Modell 2 nur geringe Unterschiede an. Entlang der Taltrasse verlaufen die Unsicherheitsgradienten in beiden Varianten nahezu identisch, was auf eine vergleichbare räumliche Struktur der Schätzunsicherheit in diesem Bereich hinweist.

Kernaussage: Ergebnisse

Das interpolierte Hauptmodell (Modell 1) zeigt eine konsistente, flächenhaft strukturierte Geländeoberfläche ohne die Reproduktion rezent überprägter Formen als dominantes Reliefsignal. Die Sensitivitätsanalyse (Modell 2) weist nur geringfügige Abweichungen gegenüber dem Hauptmodell auf und bestätigt die Stabilität der modellhaft abgeleiteten Geländestruktur gegenüber kleinräumigen Veränderungen der Talgeometrie. Die räumliche Verteilung der Kriging-Standardabweichung kennzeichnet den zentralen Talbereich als Zone erhöhter interner Modellstabilität, während randnahe und punktarmer Bereiche erwartungsgemäß höhere Unsicherheiten aufweisen.

5 Diskussion

Die geostatistische Interpolation auf Basis historischer Höhendaten ermöglicht im Hauptmodell (Modell 1) eine differenzierte Ableitung zentraler geomorphologischer Elemente wie Talsohle, Hangkante und Terrassenstufen. Die Integration rezenter Talpunkte zur Strukturunterstützung stabilisiert die Ableitung der Talform, ohne die kartographisch überlieferte Reliefstruktur zu überformen. Gleichzeitig bleibt die Übertragbarkeit der Methode auf andere Karten- und Datenquellen offen, da Generalisierungen und punktuelle Unsicherheiten der historischen Höhenangaben unvermeidbar sind. Die Ergebnisse sind daher primär als Machbarkeitsnachweis zu verstehen, nicht als exakte Ableitung eines historischen Zustands.

5.1 Einordnung der Kriging-Standardabweichung

Die Kriging-Standardabweichung (σ_K) dient als modellbasiertes Maß der Schätzunsicherheit und beschreibt die räumliche Zuverlässigkeit der Interpolation [12, 13, 14]. Niedrige Werte konzentrieren sich im zentralen Talraum mit dichter Punktverteilung, während randnahe oder punktarme Bereiche erhöhte Unsicherheiten aufweisen. Dieses Muster ist typisch für Kriging und stützt die interne Konsistenz des Modells, ersetzt jedoch keine externe Validierung gegen unabhängige Höhenreferenzen. Geringe σ_K -Werte kennzeichnen somit eine stabile Schätzung innerhalb des Modells, nicht zwingend eine hohe Genauigkeit gegenüber dem realen Gelände.

Als modellinternes Maß der Schätzunsicherheit erlaubt σ_K keine direkte Aussage zur absoluten Höhengenaugkeit. Die in Abbildung 6 gezeigten Differenzen sind daher als intern konsistenzgeprüfte Hinweise zu verstehen; eine externe Validierung gegen unabhängige Höhenreferenzen (z. B. Nivellements, Bohrprofile oder archäologische Aufschlüsse) bleibt Voraussetzung für belastbare Aussagen zur absoluten Abweichung. Ergänzend kann fachliches Expertenwissen – etwa aus bodenkundlichen Profilen, stratigraphischen Beobachtungen oder der geomorphologischen Geländeansprache – zur evidenzbasierten Validierung und strukturellen Plausibilisierung der modellierten Reliefstrukturen beitragen, insbesondere dort, wo unabhängige Feld- oder Archivdaten Aussagen zur ehemaligen Geländehöhe oder Reliefgenese erlauben. Für eine anschauliche Vermittlung der Ergebnisse kann eine illustrative Kartendarstellung ausgewählter Differenzbereiche genutzt werden. Diese Darstellung ist ausdrücklich als Annäherung zu kennzeichnen und stützt sich auf das Differenzraster (rezent – Modell) sowie die σ_K -Maske ($\leq 2\text{ m}$) zur Eingrenzung belastbarer Bereiche. In Kombination können so jene Partien hervorgehoben werden, in denen das modellhaft abgeleitete Modell mit hoher interner Zuverlässigkeit von rezenten Aufhöhungen bereinigt eine plausible Reliefstruktur nahelegt.

Über die analytische Einordnung hinaus kann das interpolierte Hauptmodell auch als geomorphologische Lesefläche genutzt werden; diese Perspektive wird im Ausblick exemplarisch aufgegriffen (Abschnitt 6.6), ohne eine weitergehende Ergebnisinterpretation zu beanspruchen.

5.2 Höhenprofile als Maß der Modellgüte

Die Aussagekraft der Ableitung liegt weniger in der absoluten Höhengenaugkeit einzelner Punkte als in der strukturellen Kohärenz und geomorphologischen Lesbarkeit der abgeleiteten Geländeform.

Zur qualitativen Beurteilung der strukturellen Konsistenz der modellhaft abgeleiteten Geländeoberflächen wurden zwei repräsentative Querprofile ausgewertet (Abbildung 9). Profil A–B verläuft quer durch den Bereich des ehemaligen Staubeckens, Profil C–D durch den zentralen Auenbereich der Cossebauder Elbaue. Die räumliche Lage der Profile innerhalb des Untersuchungsgebiets ist in der methodischen Übersichtskarte dargestellt (vgl. Abbildung 2). Verglichen werden das rezente Digitale Geländemodell (DGM1) als Referenz, die beiden geostatistischen Varianten (Modell 1 und Modell 2; Ordinary Kriging) sowie ein IDW-Vergleichsmodell (vgl. Abschnitte 3.3 und 4.2).

Die Abbildung kombiniert zwei Darstellungsformen: (1) *absolute Höhenprofile* (linke Spalte) zur direkten Gegenüberstellung der Höhenverläufe entlang der Profile und (2) *Differenzprofile* (rechte Spalte) als Abweichung $\Delta z = z_{\text{Modell}} - z_{\text{DGM rezent}}$ gegenüber dem rezenten DGM. Die Δz -Darstellung ist damit als diagnostisches Hilfsmittel zu verstehen,

um abschnittsweise Offsets (systematische vertikale Verschiebungen) und Strukturunterschiede entlang der Profile sichtbar zu machen.

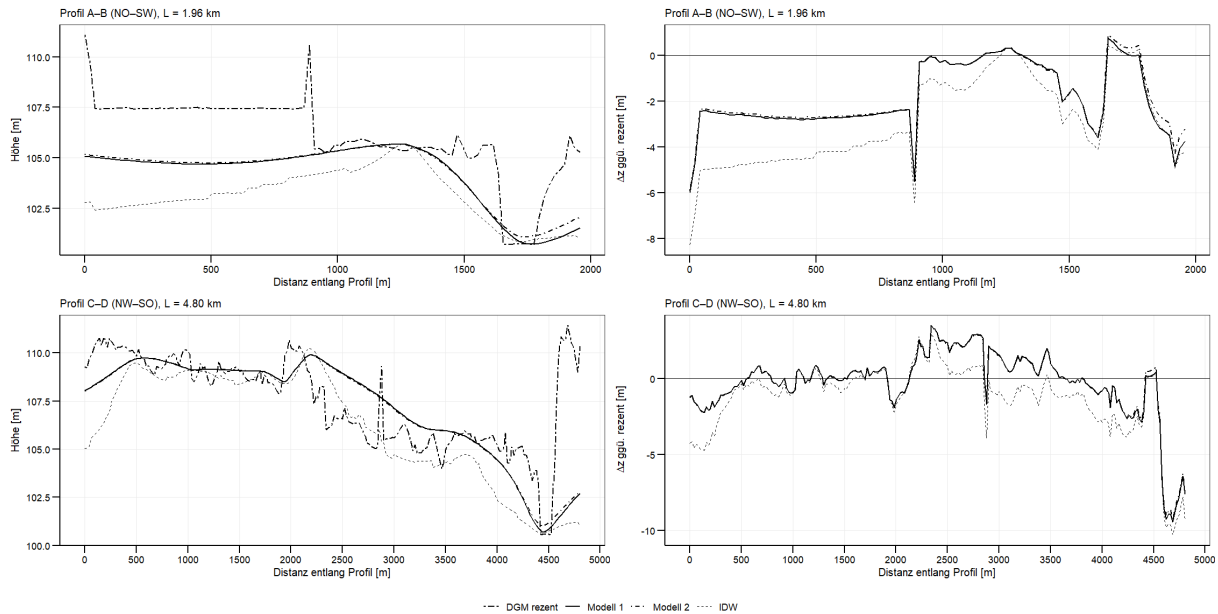


Abbildung 9: Qualitativer Modellvergleich entlang der Profile A–B und C–D. *Linke Spalte:* absolute Höhenprofile (DGM rezent (DGM1), Modell 1, Modell 2, IDW). *Rechte Spalte:* Abweichung $\Delta z = z_{\text{Modell}} - z_{\text{DGM rezent}}$ mit 0-Linie als Referenz. Die Profile dienen der qualitativen Beurteilung der Strukturtreue und der abschnittswisen Abweichungsmuster; sie sind nicht als statistische Validierung zu interpretieren.

Profil A–B: Diagnose im Bereich des ehemaligen Staubeckens Profil A–B zeigt einen Übergang vom höher gelegenen Randbereich in die Elbaue und quert den Bereich des ehemaligen Staubeckens. Im absoluten Höhenprofil sind die beiden Kriging-Varianten (Modell 1 und Modell 2) über weite Strecken ähnlich ausgeprägt und bilden einen glatten, konsistenten Verlauf, in dem die im rezenten DGM deutlich ausgeprägte Staubeckenaufhöhung nicht mehr erscheint. Die modellhaft abgeleiteten Profile folgen stattdessen einem gleichmäßigen Geländeverlauf ohne lokal dominierende Erhöhungen.

Im Differenzprofil (Δz) wird dieser Befund als überwiegend negativer vertikaler Offset gegenüber dem rezenten DGM sichtbar: Über größere Profilabschnitte liegen die modellhaft abgeleiteten Modelle unterhalb der rezenten Oberfläche. Dies ist konsistent mit dem methodischen Ziel, rezent anthropogen bedingte Aufhöhungen – wie die Staubeckenstruktur – in der idealisierten Referenzoberfläche nicht zu reproduzieren, ohne daraus eine Aussage über die tatsächliche historische Höhenlage abzuleiten.

Zwischen Modell 1 und Modell 2 bleiben die Abweichungen im Δz -Profil insgesamt moderat und liegen überwiegend im Dezimeterbereich; lokal treten jedoch größere Ausschläge bis in den Bereich von rund einem halben Meter auf. Damit liefert das Profil eine qualitative Stützung dafür, dass die Sensitivitätsvariante (Modell 2) die großräumige Profilform nicht grundlegend verändert, ohne daraus eine quantifizierte Güteaussage abzuleiten. Das IDW-Modell folgt dem generellen Trend, zeigt jedoch abschnittsweise einen zusätzlich negativen Offset gegenüber den Kriging-Modellen (lokal bis in den Meterbereich), was als Ausdruck der methodisch bedingten Glättung und der fehlenden variogrammbasierten Struktursteuerung zu interpretieren ist.

Die zentralen qualitativen Beobachtungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Qualitative Befunde entlang des Profils A–B aus absolutem Höhenprofil und Δz -Darstellung.

Aspekt	Beobachtung	Einordnung (qualitativ)
Modell 1 vs. Modell 2	Ähnliche Profilform; Δz -Differenzen überwiegend im Dezimeterbereich, lokal größere Abweichungen möglich	Sensitivitätsvariante verändert den großräumigen Verlauf nicht grundlegend; lokale Unterschiede sind erwartbar und werden nicht als Genauigkeitsaussage interpretiert.
IDW vs. Kriging	Abschnitte mit zusätzlich negativem Offset im Δz -Profil gegenüber den Kriging-Modellen	Hinweis auf stärkeres Glätten bzw. methodenbedingte Abweichung ohne variogrammbasierte Struktursteuerung; dient als Vergleich, nicht als Referenz.
Rezent vs. Modelle	Über längere Profilstrecken negative Δz -Werte (Modelle liegen unter DGM rezent)	Konsistent mit dem Ziel, rezent erhöhte Strukturen in der idealisierten Referenzoberfläche nicht abzubilden; Ursachen im Einzelnen bleiben ohne externe Daten hypothetisch.
Verlauf / Formtreue	Glatter, konsistenter Gradient entlang der Distanzachse	Qualitativer Hinweis auf strukturelle Kohärenz der modellhaft abgeleiteten Oberfläche entlang des Transekts.

Aus geomorphologischer Perspektive wird entlang des Profils A–B eine vereinfachte, weitgehend ungestörte Auenoberfläche sichtbar, in der die rezente Staubeckenstruktur als dominantes topographisches Element nicht mehr wirksam ist. Der modellhaft abgeleitete Höhenverlauf zeigt stattdessen eine gleichmäßige Talbodenneigung, wie sie für eine natürliche Auenfläche ohne technische Überprägung zu erwarten ist. Die verbleibenden kleinräumigen Abweichungen sind vor dem Hintergrund der Datenbasis und der Modellannahmen als Unschärfen zu verstehen und beeinträchtigen die Lesbarkeit der übergeordneten Geländeform nicht.

Profil C–D: Diagnose im zentralen Auenbereich Profil C–D durchquert einen flach reliefierten Abschnitt des Talbodens und eignet sich zur Beurteilung, ob die Modelle auch bei geringen Höhendifferenzen einen plausiblen Verlauf reproduzieren. Im absoluten Höhenprofil zeigen Modell 1 und Modell 2 einen sehr ähnlichen Verlauf; im Δz -Profil wird dies durch insgesamt geringe Differenzen zwischen den beiden Kriging-Varianten gestützt (typischerweise im Dezimeterbereich, lokal etwas höher).

Im Vergleich zum rezenten DGM treten abschnittsweise sowohl negative als auch positive Δz -Werte auf. Negative Werte markieren Bereiche, in denen die Modelle unterhalb der rezenten Oberfläche liegen (potenziell konsistent mit rezenten Aufhöhungen), positive Werte entsprechend Bereiche, in denen die Modelle oberhalb des rezenten DGM liegen

(potenziell konsistent mit rezenten Tieferlegungen oder kleinräumigen Reliefunterschieden). Eine kausale Zuordnung einzelner Abweichungszonen (z. B. zu Deichkörpern oder lokalen Eingriffen) ist aus dem Profil allein nicht belastbar und erfordert zusätzliche Kontextinformationen (Kartierung, Orthofotos, Bauwerkslagen, ggf. Geländebefunde).

Das IDW-Modell folgt dem großräumigen Trend, weist jedoch im Δz -Profil häufiger einen negativen Offset gegenüber den Kriging-Modellen auf, was die im Vergleich stärkere Glättung und die Sensitivität gegenüber Punktabständen plausibilisiert.

Die zentralen qualitativen Befunde sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Qualitative Befunde entlang des Profils C–D aus absolutem Höhenprofil und Δz -Darstellung.

Aspekt	Beobachtung	Einordnung (qualitativ)
Modell 1 vs. Modell 2	Sehr ähnliche Profilform; Δz -Differenzen meist gering, lokal bis in den Bereich einiger Zehntelmeter	Stützt die geringe Sensitivität der Profilform gegenüber der variierten Talgeometrie; keine Aussage zur absoluten Genauigkeit.
IDW vs. Kriging	Häufiger negativer Offset im Δz -Profil gegenüber den Kriging-Modellen	Typische Charakteristik der Distanzgewichtung; geeignet als methodischer Kontrast zur variogrammbasierten Interpolation.
Rezent vs. Modelle	Wechsel von negativen und positiven Δz -Abschnitten	Zeigt abschnittsweise Abweichungsmuster; mögliche Ursachen sind vielfältig (rezente Überprägung, lokale Reliefunterschiede, Daten-/Modellannahmen) und werden ohne Zusatzdaten nicht festgelegt.
Verlauf / Formtreue	Plausibler, konsistenter Verlauf in reliefarmem Auenabschnitt	Qualitativer Hinweis, dass die Modelle auch bei geringer Reliefenergie einen kohärenten Trend abbilden.

Im Profil C–D tritt der Charakter einer ruhigen, flach geneigten Auenoberfläche deutlich hervor. Die modellhaft abgeleiteten Modelle bilden einen konsistenten, schwach reliefierten Talboden ab, der sich klar von den im rezenten DGM sichtbaren, lokal überprägten Strukturen unterscheidet. Damit wird ein geomorphologisch plausibles Referenzrelief sichtbar, das nicht als exakte historische Oberfläche, sondern als strukturell bereinigte Annäherung an eine vormoderne Auenmorphologie zu verstehen ist.

Insgesamt liefern die Profile A–B und C–D eine anschauliche, qualitativ orientierte Diagnose der Modellkohärenz entlang zweier Transekte: Sie machen abschnittsweise Offsets gegenüber dem rezenten DGM sichtbar, zeigen die hohe Übereinstimmung der beiden Kriging-Varianten im Profilverlauf und verdeutlichen die im Vergleich stärkere Glättung bzw. Offset-Tendenz des IDW-Verfahrens. Diese Befunde sind als strukturbezogene Plausibilisierung zu interpretieren und nicht als statistische Gütebewertung.

5.3 Vergleichsinterpolation: IDW

Das IDW-Verfahren wurde ergänzend eingesetzt, um den Einfluss der Interpolationsmethode zu bewerten und eine Vergleichsbasis für die Beurteilung der Glättungseffekte zu erhalten. Trotz seiner Einfachheit bietet IDW eine nützliche Vergleichsbasis, um den Mehrwert geostatistischer Verfahren im Hinblick auf Strukturtreue und Unsicherheitsabschätzung herauszustellen.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen der IDW- und der Kriging-Interpolation sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Sie verdeutlichen die methodischen Gegensätze hinsichtlich Reliefdarstellung, Punktdichteinfluss und quantitativer Unsicherheitsbewertung.

Tabelle 4: Gegenüberstellung der wesentlichen Unterschiede zwischen IDW- und Kriging-Interpolation.

Aspekt	Beobachtung (IDW)	Bewertung im Vergleich zu Kriging
Reliefstruktur	Glättet Extremwerte und reduziert Reliefkontraste	Geringere Detailtreue; natürliche Mikromorphologie teilweise geglättet.
Punktdichteinfluss	Starke Abhängigkeit von Punktabständen	Kriging nutzt zusätzlich räumliche Autokorrelation und gleicht unregelmäßige Punktverteilungen besser aus.
Unsicherheitsmaß	Keine interne Schätzvarianz	Fehlende Abschätzung der Modellgüte; nur bedingt für historische Ableitungen geeignet.
Gesamtbewertung	Stabiles, aber geglättetes Ergebnis	Sinnvoller methodischer Vergleich, kein Ersatz für geostatistische Verfahren.

Zusammenfassend bestätigen die Profile A–B und C–D eine strukturtreue Ableitung bei moderater Sensitivität gegenüber der Stützpunktverteilung. Das IDW-Verfahren bildet die großräumigen Trends zwar zuverlässig ab, glättet jedoch Mikroreliefstrukturen und unterstreicht damit den Mehrwert des geostatistischen Kriging-Ansatzes.

5.4 Rezent–Modell-Differenzen und interdisziplinäre Perspektive

Ein Vergleich zwischen dem rezenten DGM und den modellhaft abgeleiteten Höhenmodellen verdeutlicht differenzierte Abweichungsmuster, die sowohl geomorphologische Prozesse als auch anthropogene Überprägungen widerspiegeln und in der folgenden Abbildung räumlich dargestellt sind.

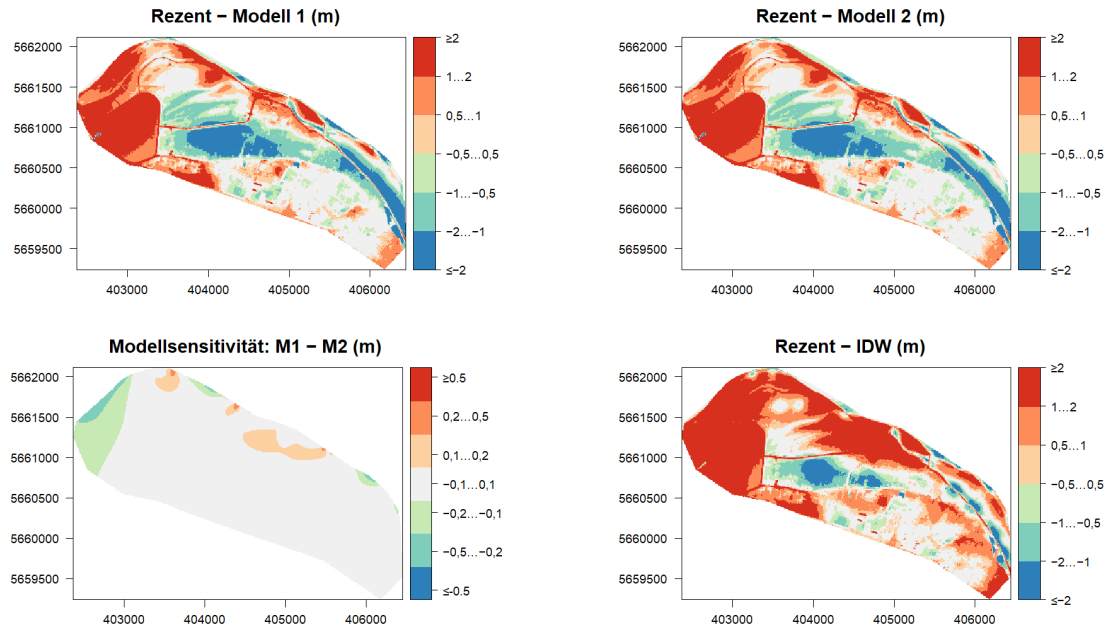


Abbildung 10: Rezent–Modell-Differenzen und Modellsensitivität innerhalb der Modellierungsfläche. *Oben links*: Rezent – Modell 1. *Oben rechts*: Rezent – Modell 2. *Unten links*: Modellsensitivität (Modell 1 – Modell 2). *Unten rechts*: Rezent – IDW (Vergleichsverfahren). Farbklassen sind symmetrisch um 0 m gewählt (z. B. ≤ -2 , $-2 \dots -1$, $-1 \dots -0,5$, $-0,5 \dots 0,5$, $0,5 \dots 1$, $1 \dots 2$, ≥ 2 m); negative Werte markieren rezenten Einschnitt bzw. Abtrag (blaugrün), positive Werte rezent höhere Oberflächen bzw. Aufschüttungen (orange/rot). Die Skala der Modellsensitivität (unten links) ist bewusst enger gewählt.

Die Differenzkarten (Abbildung 10) veranschaulichen diese Muster räumlich: Rezent – Modell 1 (oben links) und Rezent – Modell 2 (oben rechts) zeigen konsistente, flächenhafte Aufhöhungen entlang des Deichkörpers sowie im Umfeld des ehemaligen Staubeckens, während negative Differenzen punktuell auf abschnittsweise Tieferlegungen bzw. regulierungsbedingte Sohlanpassungen hinweisen. Die Modellsensitivität (unten links) bleibt insgesamt gering und konzentriert sich auf schmale Bänder entlang der Taltrasse; großräumige Abweichungen zwischen den Kriging-Varianten treten nicht auf. Der Vergleich Rezent – IDW (unten rechts) reproduziert die übergeordneten Trends, wirkt jedoch geglätteter und zeigt lokal systematische Offsets, was den methodischen Mehrwert des Kriging-Ansatzes (Variogrammsteuerung und Schätzunsicherheiten) unterstreicht.

Positive Differenzen (rezent höher) konzentrieren sich vor allem entlang des Deichkörpers und im Bereich des ehemaligen Staubeckens und markieren künstliche Aufschüttungen oder Geländeanhebungen. Negative Differenzen treten dagegen in Zonen auf und können mit abschnittswisen Tieferlegungen bzw. Eingriffen in das Fluss- und Auenrelief (z. B. Regulierung, Sohlsicherung oder Abgrabung) konsistent sein. Solche Differenzkarten besitzen ein hohes Potenzial für geomorphologische und geoarchäologische Fragestellungen, da sie Veränderungen der Landschaftstopographie flächenhaft sichtbar machen und deren räumliche Dynamik quantifizierbar werden lassen.

Über den methodischen Rahmen hinaus kann das modellhaft abgeleitete Geländemodell als Grundlage für eine Vielzahl geowissenschaftlicher Anwendungen dienen. In der Geoarchäologie ermöglicht es die Annäherung an ehemalige Oberflächen, die im Kontext historischer Nutzung oder Siedlungsaktivität von Bedeutung sind. In der Hydrologie

lassen sich daraus potenzielle Fließwege, Rückstauzonen oder historische Überflutungsflächen näherungsweise ableiten. Auch bodenkundliche und sedimentologische Untersuchungen profitieren von einer konsistenten topographischen Basis, die die ursprüngliche Reliefenergie und Abflussrichtung abbildet.

Gleichzeitig ist zu betonen, dass das modellhaft abgeleitete Terrain keine Wiedergabe vergangener Geländeformen darstellt, sondern eine plausible Annäherung unter gegebenen Daten- und Modellannahmen. Seine Aussagekraft ergibt sich somit weniger aus der absoluten Höhenpräzision, sondern vielmehr aus der strukturellen Kohärenz der modellierten Topographie. Eine zukünftige Erweiterung könnte darin bestehen, die Rezent-Modell-Differenzen quantitativ auszuwerten, um Auf- und Abtragsvolumina zu bestimmen und den Anteil anthropogener gegenüber natürlicher Geländeänderungen im Untersuchungsgebiet zu quantifizieren. Das methodische und interdisziplinäre Potenzial dieser Differenzanalyse wird in Abschnitt 6.5 im Rahmen des Ausblicks näher erläutert.

Zusammenfassend markieren die Differenzen konsistente Aufhöhungen an Deich- und Staubeckenstrukturen sowie punktuelle Abträge in regulierten Abschnitten; die Sensitivität zwischen den Kriging-Varianten ist gering und entlang der Taltrasse fokussiert.

Kernaussage: Diskussion

Die geostatistische Ableitung historischer Geländeformen mittels Ordinary Kriging erweist sich als methodisch nachvollziehbarer Ansatz zur Ableitung strukturtreuer Reliefmodelle aus heterogenen historischen Höhenangaben. Die Modelle bilden zentrale geomorphologische Elemente wie Talsohle, Hangkante und Terrassen konsistent ab und zeigen gegenüber IDW eine differenziertere Reliefdarstellung bei geringerer Glättung. Die geringe Sensitivität zwischen den Kriging-Varianten unterstreicht die strukturelle Stabilität des Ansatzes, während Rezent-Modell-Differenzen anthropogene Überprägungen und mögliche geomorphodynamische Effekte sichtbar machen. Insgesamt schafft die Methode eine interdisziplinär anschlussfähige topographische Grundlage, deren weitergehende Anwendung eine externe Validierung voraussetzt.

Vor dem Hintergrund der in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Ergebnisse lässt sich die zentrale Fragestellung dieser Arbeit wie folgt beantworten: *Eine geostatistische Ableitung eines idealisierten, historisch dominierten Geländes ist auf Grundlage historischer Messtischblatt-Höhendaten und strukturstützender Talsohlenpunkte grundsätzlich möglich, bleibt jedoch in ihrer Aussagekraft durch Datenunsicherheiten und Modellannahmen begrenzt.*

6 Ausblick

Die vorliegende Untersuchung bestätigt die grundsätzliche Eignung geostatistischer Verfahren zur Ableitung historischer Geländeformen. Gleichzeitig offenbaren sich methodische und datenbezogene Grenzen, die für künftigen Arbeiten relevant sind. Im Folgenden werden zentrale Entwicklungslinien skizziert.

6.1 Datenunsicherheiten und historische Quellenbasis

Ein wesentliches Unsicherheitsmoment liegt in der Qualität der historischen Höhendaten. Die Messtischblätter des 19. Jahrhunderts unterliegen kartographischen Generalisierungen, variierender Messgenauigkeit und möglichen Fehlern durch geodätische Transformati-

on oder Digitalisierung. Solche Abweichungen wirken sich unmittelbar auf das Variogramm aus, da sie die empirische Semivarianz künstlich erhöhen und die räumliche Autokorrelation abschwächen können. In der Interpolation äußert sich dies in einer tendenziellen Glättung, die zwar zur Stabilität des Modells beiträgt, zugleich aber kleinräumige Reliefunterschiede unterdrücken kann. Eine systematische Quantifizierung dieser Unsicherheiten, etwa durch die Einbeziehung geodätischer Vergleichsdaten, archäologischer Befunde oder fachlicher Expertenschätzungen zur Punktzuverlässigkeit, ist ein naheliegende Ansatzpunkt für künftige Arbeiten.

6.2 Anisotropie und Variogrammstruktur

Das in dieser Arbeit eingesetzte Variogramm wurde isotrop modelliert, d. h. die räumliche Autokorrelation wurde in allen Richtungen als gleich angenommen. In geomorphologisch strukturierten Landschaften, insbesondere in Tal- und Flussauen, kann diese Annahme jedoch die natürliche Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) der Reliefentwicklung unterschätzen. Ein anisotropes Variogramm berücksichtigt, dass die räumliche Kontinuität entlang bestimmter Richtungen – etwa flussparallel – stärker ausgeprägt ist als quer dazu [12, 14]. Zukünftige Analysen könnten daher prüfen, ob eine richtungsabhängige Modellierung der Autokorrelation die Strukturtreue weiter verbessert, insbesondere im Hinblick auf längsgerichtete Talformen und Hangverläufe.

6.3 Modellauflösung und Maßstabebene

Die Interpolation erfolgte auf einem 1 m-Raster, um die Morphologie im Detail abzubilden. Angesichts der begrenzten Informationsdichte der historischen Punktdaten könnte diese Auflösung jedoch feiner sein, als es die Datengrundlage rechtfertigt. Eine zu hohe Rasterauflösung birgt die Gefahr scheinbarer Präzision, die nicht durch reale Messinformation gestützt ist. Künftige Arbeiten sollten daher prüfen, welche Rastergröße ein angemessenes Verhältnis zwischen Detailtreue und Datendichte gewährleistet. Denkbar ist eine mehrskalige Modellierung, bei der das Variogramm für unterschiedliche Auflösungsebenen getestet wird.

6.4 Externe Validierung und weiterführende Ansätze

Für eine quantitative Überprüfung der Ableitung fehlen bislang unabhängige Referenzhöhen. Eine externe Validierung könnte durch Bohrprofile, archäologische Sondierungen oder Nivellements erfolgen, um absolute Höhenabweichungen zu bestimmen. Ebenso wäre ein Vergleich mit rezenten Geländemodellen älterer Entstehungszeitpunkte (z. B. Luftbild-Photogrammetrien des frühen 20. Jahrhunderts) aufschlussreich. Darüber hinaus könnten Cross-Validation-Ansätze und alternative Interpolationsmethoden – etwa Co-Kriging unter Einbezug geologischer oder geomorphometrischer Zusatzinformationen – die Aussagekraft künftiger Modelle erweitern.

Filterbasierte Glättungsverfahren auf rezenten Geländemodellen stellen eine mögliche Ergänzung dar, können jedoch eine historisch und geomorphologisch begründete Ableitung der Geländeoberfläche nicht ersetzen.

6.5 Potenziale der Differenzanalyse

Die aus den Differenzmodellen (*rezent – Modell*) abgeleiteten Höhenabweichungen bieten über die reine Visualisierung hinaus ein breites Potenzial mit Anschlussmöglichkeiten für Differenzanalysen und interdisziplinäre Anwendungen. Als Maß für vertikale Geländeänderungen ermöglichen sie die Quantifizierung von Auf- und Abtragsprozessen und dienen als Grundlage für geomorphologische, hydrologische und geoarchäologische Auswertungen. Durch Integration volumetrischer Bilanzierungen lassen sich aus den Differenzrastern potenzielle Aufschüttungs- und Erosionsvolumina bestimmen und räumlich verorten.

Darüber hinaus können die Modelle in hydrologischen Untersuchungen eingesetzt werden, um Änderungen der Abflusskonnektivität, potenzielle Rückstauzonen oder historische Überflutungsflächen zu rekonstruieren. In der Geoarchäologie gestatten sie eine Annäherung an ehemalige Oberflächen und Reliefstrukturen, die Rückschlüsse auf Siedlungsstandorte, Nutzungshorizonte oder Prozesse der Überprägung ermöglichen. Bodenkundliche und sedimentologische Fragestellungen profitieren von der Kombination aus modellhaft abgeleiteter Topographie und rezenten Höheninformationen, da sie Aussagen über Sedimentumlagerung, Kolluvienbildung und Bodenentwicklung erlauben.

Auch methodisch eröffnet die Differenzanalyse neue Perspektiven: Sie kann zur internen Validierung und Sensitivitätsprüfung verschiedener Interpolationsverfahren (z.B. Kriging, IDW, Spline) herangezogen werden und liefert ein empirisches Maß für die räumliche Unsicherheit der Modellierung. In Verbindung mit dem Raster der Kriging-Standardabweichung lassen sich Zonen erhöhter Modellunsicherheit identifizieren und bewerten. Zukünftige Arbeiten könnten diese Ansätze in Richtung einer zeitlich skalierten, vierdimensionalen Modellierung erweitern, in der Höhenmodelle mit stratigraphischen oder datierten Bohrdaten verknüpft werden, um Landschaftsentwicklung und anthropogene Einflüsse über die Zeit zu rekonstruieren.

6.6 Geomorphologische Lesbarkeit

Die im Ergebnisteil dargestellte geostatistisch modellhaft abgeleitete Geländeoberfläche (Modell 1) wurde primär als analytisches Modell zur Ableitung einer von rezenten anthropogenen Überprägungen bereinigten Topographie entwickelt. Über diese analytische Funktion hinaus kann das interpolierte Hauptmodell jedoch auch als geomorphologische Lesefläche verstanden werden, auf deren Grundlage sich landschaftsformende Strukturen und potenzielle Entwicklungstendenzen heuristisch erschließen lassen. Diese Perspektive ist ausdrücklich nicht als zusätzliche Ergebnisinterpretation zu verstehen, sondern als konzeptioneller Ausblick auf das interpretative Potenzial eines bereinigten Reliefmodells.

Abbildung 11 zeigt das interpolierte Hauptmodell (Modell 1) in einer geomorphologisch orientierten Darstellungsweise aus Isohypsen (1 m-Intervall), kontinuierlichen Höhenschichten und einer dezenten Reliefschummerung. Die Begrenzung der Modellierungsfläche ist als rotes Polygon hervorgehoben. Durch den bewussten Verzicht auf rezent überprägte Geländeelemente wird die strukturelle Lesbarkeit des reliefarmen Auenraums deutlich gestärkt.

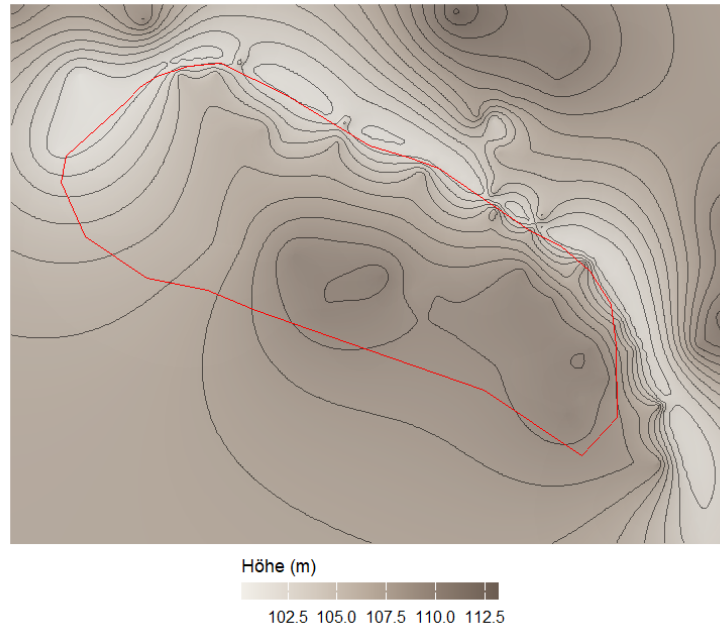


Abbildung 11: Geomorphologisch orientierte Darstellung des interpolierten Hauptmodells (Modell 1). Dargestellt sind Isohypsen im 1 m-Intervall, kontinuierliche Höhenschichten sowie eine dezente Reliefschummerung zur Unterstützung der plastischen Wahrnehmung. Die rote Umrandung kennzeichnet die Modellierungsfläche. Die Abbildung dient der heuristischen geomorphologischen Ansprache einer von rezenten anthropogenen Überprägungen bereinigten Geländeoberfläche und ist nicht als Ableitung eines konkreten historischen Zeitstands zu verstehen.

Insbesondere im Bereich des ehemaligen Staubeckens tritt ein markanter Richtungswechsel des Elbverlaufs hervor, der als Mäanderbogen mit ausgeprägtem Prallhangbereich gelesen werden kann. Die Isohypsen verdeutlichen in diesem Abschnitt eine asymmetrische Talform, die auf eine langfristige laterale Flussdynamik hindeutet. In räumlicher Nähe zu diesem Bereich sind in der regionalgeologischen Literatur präquartäre Lagerungsanomalien in plänerführenden Schichtfolgen sowie Hinweise auf strukturelle Schwächezonen beschrieben, die als Ausdruck tektonischer Vorprägung interpretiert werden und potenziell mit Durchbruchssituationen oder episodischen Umlenkungsprozessen des Talverlaufs in Zusammenhang stehen können [15, 16, 17, 18]. Eine kausale oder zeitliche Zuordnung dieser Befunde ist auf Grundlage des vorliegenden Modells jedoch nicht möglich und wird hier ausdrücklich nicht beansprucht.

Darüber hinaus wird sichtbar, dass der Auenraum trotz seiner geringen Reliefenergie intern differenziert ist. Flächige Bereiche mit sehr geringem Höhengefälle lassen sich als potenzielle Überflutungs- und Sedimentationsräume lesen, während angrenzende Zonen eine leicht erhöhte Reliefenergie aufweisen. Gerade diese subtilen Strukturen treten im bereinigten Modell deutlicher hervor, da sie im rezenten Digitalen Geländemodell vielfach durch technische Aufhöhungen, Deichkörper oder Geländeplanierungen überprägt sind.

Die dargestellte geomorphologische Ansprache versteht sich als heuristische Annäherung an eine vormoderne Landschaftskonfiguration. Sie eröffnet einen interpretativen Raum, in dem Fragen der Landschaftsentwicklung, Flussdynamik und ereignishafter Umlagerungsprozesse diskutiert werden können, ohne den Anspruch einer historischen Ableitung oder einer prozessualen Modellierung zu erheben. In diesem Sinne bildet die Abbil-

dung einen konzeptionellen Abschluss der Arbeit und verdeutlicht das Erkenntnispotenzial geostatistisch modellhaft abgeleiteter, idealisierter Geländeoberflächen über ihre rein analytische Nutzung hinaus.

Kernaussage: Ausblick

Die vorliegende Arbeit deutet an, dass die geostatistische Ableitung einer idealisierten, von rezenten anthropogenen Überprägungen bereinigten Geländeoberfläche einen methodisch nachvollziehbaren Ansatz darstellt, dessen Aussagekraft jedoch maßgeblich von der Qualität der zugrunde liegenden Höhendaten, der Variogrammstruktur und der gewählten Maßstabsebene abhängt. Künftige Arbeiten sollten diese Aspekte durch eine systematische Quantifizierung von Datenunsicherheiten, die Prüfung anisotroper Modellansätze sowie durch externe Validierungsstrategien weiter fundieren. Über die analytische Nutzung hinaus lassen sich Differenzanalysen und geomorphologisch orientierte Darstellungen für interdisziplinäre Fragestellungen nutzen: Sie ermöglichen quantitative Aussagen zu Geländeänderungen und eine heuristische Lesbarkeit landschaftlicher Strukturen, ohne einen konkreten historischen Zeitstand zu behaupten.

Literaturverzeichnis

- [1] Armin Wehr and Uwe Lohr. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2–3):68–82, 1999. doi: 10.1016/S0924-2716(99)00011-8.
- [2] S. K. Jenson and J. O. Domingue. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11):1593–1600, 1988.
- [3] Michael Doneus and Christian Briese. Airborne laser scanning in forested areas—potential and limitations of an archaeological prospection technique. *Remote Sensing*, 5(10):4590–4613, 2013. doi: 10.3390/rs5104590.
- [4] Christopher Sevara, Michael Doneus, and David Cowley. Detecting, extracting and visualising historic terrain change: A review of multi-temporal airborne lidar for archaeology. *Archaeological Prospection*, 25(4):251–266, 2018. doi: 10.1002/arp.1607.
- [5] L. A. James, M. E. Hodgson, S. Ghoshal, and M. M. Latiolais. Geomorphic change detection using historic maps and dems: The temporal dimension of geospatial analysis. *Geomorphology*, 137(1):181–198, 2012. doi: 10.1016/j.geomorph.2010.10.039.
- [6] Veit Höfler, Christine Wessollek, and Pierre Karrasch. Knowledge-based modelling of historical surfaces using lidar data. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 9644, Bellingham, WA, 2015. SPIE. doi: 10.1117/12.2240388. Geospatial InfoFusion and Data Analytics II.
- [7] Joachim Mansfeld. *Landschaftsökologische Raumgliederung des Regierungsbezirks Dresden*. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden, 1999.
- [8] Heimatverein Cossebaude e.V. Pumpspeicherwerk Niederwartha – Informationen zur Geschichte und Technik. https://www.heimatverein-cossebaude.de/app/download/10202670486/faltkarte_texte_08082017.pdf, 2017. Abgerufen am 7. Juli 2025.
- [9] Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft. Übergabe der Elbeschutzzlinie Dresden-Stetzsch – Gohlis – Cossebaude, 2017. URL <https://t1p.de/4ep7e>. Letzter Zugriff: 20. Juli 2025.
- [10] GeoSN. Downloadbereich Digitale Höhenmodelle (DGM1). URL <https://www.geodaten.sachsen.de/downloadbereich-digitale-hoehenmodelle-4851.html>. Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen.
- [11] Deutsche Fotothek. Topographische Karten 1:25.000 (Messtischblätter), 2023. URL <https://www.deutschefotothek.de>. Staatliche Karten digitalisiert durch die SLUB Dresden.
- [12] Pierre Goovaerts. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York, 1997.
- [13] Hans Wackernagel. *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*. Springer, Berlin, 3rd edition, 2003.

- [14] Jean-Paul Chilès and Pierre Delfiner. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. Wiley, Hoboken, NJ, 2nd edition, 2012.
- [15] Wolfgang Alexowsky, Hans-Jürgen Berger, and Klaus-Axel Tröger. Zur tektonischen und morphologischen Entwicklung des Elbtales im Raum Dresden. *Geologica Saxonica*, 42:5–20, 1997.
- [16] Wolfgang Alexowsky and Hans-Jürgen Berger. Tektonische Strukturen und Talgenese im Elbtal zwischen Meißen und Pirna. *Zeitschrift für geologische Wissenschaften*, 27 (3–4):321–340, 1999.
- [17] Wolfgang Alexowsky. Strukturelle Prädisposition und quartäre Reliefentwicklung im Elbtal. *Geologica Saxonica*, 46:45–60, 2001.
- [18] Lothar Wolf. Zur quartären Entwicklung des Elbtales im Raum Dresden. *Zeitschrift für geologische Wissenschaften*, 22(1):23–38, 1994.

Anhang: Orthophoto des Untersuchungsgebiets



Abbildung 12: Rezent verfügbares Orthophoto (DOP) der Cossebauder Elbaue im westlichen Stadtgebiet von Dresden (Aufnahmedatum: 19.03.2024). Die Abbildung dient ausschließlich der räumlichen Orientierung und der Veranschaulichung rezent anthropogener Überprägungen (u. a. Deichkörper, Staubecken, Infrastruktur). Sie ist nicht Bestandteil der analytischen Auswertung und besitzt keinen interpretativen oder validierenden Anspruch. Quelle: GeoSN (Freistaat Sachsen), Digitale Orthophotos (DOP).