

**Rezension zu: Castiello, M. E. (2022). Computational and Machine Learning Tools for Archaeological Site Modeling (Springer Theses). Cham: Springer.** – 304 Seiten mit zahlr. Abb. ISBN 978-3-030-88567-0 (eBook).

Sebastian F. Kriesch

Maschinelles Lernen (ML) hat in vielen Bereichen unseres (digitalen) Alltags Einzug gehalten. Es eignet sich für sich wiederholende Aufgaben oder um Daten zu analysieren und daraus Schlüsse zu ziehen: *“Machine learning is about picking up patterns that appear in the world and using those patterns to make predictions in the future”* (SERRANO, 2021). Daher ist es nicht verwunderlich, dass auch im Bereich der archäologischen Forschung mit ML gearbeitet wird. Es sind in den letzten Jahren eine ganze Reihe von Publikationen erschienen, die sich in unterschiedlicher Weise mit diesem Thema befassen (vgl. BICKLER, 2021; so kann ML z. B. für Mustererkennung in Bildern genutzt werden, um Gefäß- oder Werkzeugformen zu bestimmen). Das hier besprochene Buch reiht sich bei den Studien ein, die sich mit der computergestützten Suche nach archäologischen Fundstellen beschäftigen (*“predictive modelling”*) und nutzt dafür ebenfalls eine Technik aus dem Bereich des ML.

Bei *“Computational and Machine Learning Tools for Archaeological Site Modeling”* von Maria Elena Castiello handelt es zugleich um die Publikation ihrer Doktorarbeit, eingereicht und verteidigt im Jahr 2020 an der Universität Bern. Die Autorin hat zudem laut Vorwort einen Preis für diese Arbeit erhalten. Die Veröffentlichung wurde in die Reihe Springer Theses des Springer Verlags aufgenommen. Es handelt sich um eine Reihe, die für sich selbst in Anspruch nimmt, eine Auswahl der besten Doktorarbeiten auf der Welt zu publizieren. Castiello nennt als Ziel ihrer Arbeit, neue und innovative Methoden in der Entwicklung von Vorhersagekarten für archäologische Denkmäler aus römischer Zeit in der Schweiz vorzustellen. Ob sie diesem Ziel und dem durch die Reihe formulierten Anspruch gerecht werden kann, soll hier besprochen werden.

Der Rezensent hat das Buch in elektronischer Form als PDF-Datei erhalten. Das Buch ist überwiegend in englischer Sprache verfasst (mit einigen Ausnahmen auf Deutsch und Französisch). Das PDF-Dokument umfasst 304 Seiten. Nach einem Vorwort des Betreuers der Arbeit (Albert Haffner, Bern) und Danksagungen der Autorin folgen ein Inhalts- sowie ein Abkürzungsverzeichnis. Beide Verzeichnisse erleichtern den Zugang enorm: Da

es sich um ein digitales Dokument handelt, sind die Einträge im Inhaltsverzeichnis verlinkt und man kann direkt zu den angewählten Abschnitten springen. Das Abkürzungsverzeichnis dient dagegen als sinnvolle Hilfe bei den vielen im Text verwendeten Abkürzungen (allerdings sind nicht alle Abkürzungen eindeutig: *“FR”* wird zweimal genutzt). Es folgt der Textteil sowie ein Anhang mit Tabellen und Abbildungen (104 Seiten). Daran schließt sich eine anderthalbseitige Kurzbiographie der Autorin mit Foto an, sowie ein weiteres Literaturverzeichnis mit etwas unklarem Bezug. Der Bezug ist unklar, da es nicht eindeutig einem Kapitel zugeordnet werden kann. Es handelt sich bei dem Verzeichnis am Ende auch nicht um eine komplette Literaturliste aller im Text verwendeten Literaturangaben.

Der Textteil selbst ist in vier große Abschnitte aufgeteilt und umfasst 180 Seiten. Darin sind mehrere (Farb-)Abbildungen und Literaturverzeichnisse zu jedem Kapitel enthalten. Bei den Literaturverweisen fällt auf, dass hier meist eine naturwissenschaftliche Zitierweise genutzt wird, bei der nur Zahlen statt Autorennamen verwendet werden (teils wird jedoch trotzdem mit Namen gearbeitet). Das macht es etwas unübersichtlich, die Literaturangaben nachzuverfolgen, denn in jedem Kapitel fängt die Zählung wieder bei 1 an. Aber auch hier sind Links integriert, was sehr praktisch ist. Zusätzlich wird mit (ebenfalls verlinkten) Fußnoten gearbeitet, wenn Hinweise oder andere Quellen angegeben werden. Auch die Abbildungsangaben sind teilweise verlinkt (leider sind gerade die Abbildungen, die im Anhang aufgeführt sind, im Text nicht verlinkt – hier muss man als lesende Person eine Weile scrollen oder die Suchfunktion bemühen, bis man die entsprechende Abbildung gefunden hat). Ein weiterer und interessanter Vorteil der elektronischen Version besteht darin, dass vor jedem Kapitel ein *“Check for updates”*-Button gesetzt ist. Hier kann man online überprüfen, ob es Überarbeitungen zum Text gibt. Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es jedoch noch keine Updates. Hier sieht der Rezensent aber Potenzial für die Zukunft.

Zunächst steckt Castiello in der Einleitung (Kapitel 1) den Rahmen ihrer Arbeit ab. Sie betont, wie wichtig es ist, archäologische Denkmäler vor der Zerstörung durch menschliche oder natürliche Einflüsse zu schützen. Durch die Organisation der Denkmalpflege auf Ebene der Kantone herrscht eine Zersplitterung in der Schweiz vor, die übergreifenden Schutz von (Boden-)Denkmälern oder auch nur deren Untersuchung über Kantongrenzen hinweg schwierig macht. Die Autorin konnte

die archäologischen Daten aus sechs Kantonen nutzen und will mit diesen Daten archäologische Vorhersagekarten mit Hilfe von „künstlicher Intelligenz“ bzw. genauer mit maschinellem Lernen erzeugen, um der Denkmalpflege ein Werkzeug zu geben, Flächen mit potenziellen Bodendenkmälern besser zu schützen.

Das zweite Kapitel (*“Space, Environment and Quantitative Approaches in Archaeology”*) befasst sich mit dem, was als Forschungsgeschichte zusammengefasst werden könnte: Es gibt einen Überblick über die Entwicklungen in der Landschaftsarchäologie. Castiello kommt zu dem Schluss, dass die Untersuchung von ökologischen Faktoren dabei helfen kann, die Mensch-Natur-Interaktion besser zu verstehen. Außerdem gibt sie einen knappen Abriss über die Entwicklung von computergestützten quantitativen Methoden, sowie über die Nutzung von Geoinformationssystemen (GIS) in der Archäologie. Ihr erklärtes Ziel ist es, mit ihrer Arbeit vergangene menschliche Aktivitäten anhand von Umweltfaktoren zu lokalisieren. Dazu möchte sie erneut als Innovation Methoden aus dem Bereich des ML nutzen.

Welche Methoden sie genau verwenden möchte, wird in Kapitel 3 (*“Predictive Modeling”*) erklärt. Zunächst gibt Castiello jedoch einen kurzen Abriss über die Entwicklung des *“predictive modeling”* (Vorhersagemodellierungen) in der archäologischen Forschung und dem Einsatz in der Denkmalpflege. Sie berichtet, dass in den USA der Einsatz von Vorhersagemodellierungen sehr viel weiter verbreitet ist als in der europäischen Forschung und Denkmalpflege. Sie führt dies auf verschiedene Traditionen in der Denkmalpflege, aber auch auf eine gewisse Skepsis innerhalb der europäischen Forschung zurück. Erfreulicherweise erklärt sie die Probleme, die zur Kritik an den Vorhersagemodellierungen geführt haben und bietet so der lesenden Person gute Ansätze zum eigenständigen Einschätzen dieser Methode. Sie unterscheidet zwischen Modellierungen aus der akademischen Forschung und eher pragmatischen, induktiven Ansätzen aus der Bodendenkmalpflege. Die Kritik besteht darin, dass die Modelldaten unvollständig oder verzerrt sind und nicht in der Lage seien, menschliches Verhalten zu quantifizieren oder vorherzusagen. Außerdem sind archäologische Stätten allgemein von chronologischen und funktionalen Unsicherheiten betroffen und die Modellierungen sind umwelt-deterministisch. Trotz dieser Punkte weist Castiello auch auf die Vorteile der Nutzung der Modellierungen für den Schutz von potenziell gefährdeten Bodendenkmälern hin. Sie weist auf viele erfolg-

reiche Einsätze und Studien des induktiven Ansatzes hin und möchte ihn entsprechend auch für ihre Arbeit nutzen. Folgerichtig führt sie im Kapitel 3.2 (*“From Global to Local Scale: Indicative Case Studies and Experiences”*) verschiedene Fallstudien und den theoretischen Hintergrund auf.

Voraussetzung für das *“predictive modeling”* ist die Annahme, dass die Lage archäologischer Fundstellen in der Landschaft nicht zufällig ist, sondern mit bestimmten Merkmalen der natürlichen Umgebung zusammenhängt. Mit Hilfe statistischer Verfahren soll festgestellt werden, welche Umweltfaktoren eine besonders große Rolle für Wahl der Siedlungsplätze o. ä. gespielt haben. Castiello stellt kurz als statistische Verfahren die logistische Regression und verschiedene Fallstudien vor (Kapitel 3.2.2) und gelangt so schließlich zum Thema ihres Buches, dem maschinellen Lernen. Dabei stellt sie fest, dass zahlreiche Studien zur Vorhersage archäologischer Fundstellen belegen, dass die ML-Algorithmen im Vergleich zu klassischen statistischen Verfahren wie der Diskriminanzanalyse oder der logistischen Regression bessere Ergebnisse liefern. Zur Veranschaulichung führt sie verschiedene Untersuchungen und die dort verwendeten Methoden auf. Dabei werden ausführlich die Vor- und Nachteile verschiedener Ansätze diskutiert. Für die interessierte lesende Person ist dies ein sehr wertvoller Teil der vorliegenden Arbeit, da hier viele wichtige Hinweise gegeben werden, die ggf. bei eigenen Forschungen zu berücksichtigen sind.

Castiello stellt eine Fallstudie aus der Schweiz vor, die ganz ähnliche Ziele wie ihre eigene Arbeit verfolgte. In dieser *„Potenzialkarte für den Kanton Bern“* von R. Ebersbach wurde ermittelt, welche ökologischen Merkmale typisch für die Lage von Römischen Villen sind, allerdings nur auf einen einzelnen Kanton bezogen. Sie führt verschiedene Kritikpunkte an, ordnet diese Potenzialkarte aber sonst nicht weiter in den Rahmen ihrer eigenen Arbeit ein. So bleibt es bei einem einfachen Beispiel, das aber auch aufzeigt, dass Castiello nicht die erste ist, die sich mit Vorhersagemodellierungen mit Hilfe statistischer Verfahren in der Schweiz beschäftigt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die *„Unsicherheit und Unbestimmtheit“* in archäologischen Daten. Dieser Aspekt muss auch für die Modellierung berücksichtigt werden, da die Vorhersagen auf diesen zum Teil sehr unsicheren Daten beruhen. Castiello geht kurz auf die verschiedenen Formen der Unsicherheit ein (unklare exakte Lokalisierungen von Fundstellen, Vereinfachungen der ursprünglichen Informationen bei der Datenauf-

nahme etc.). Für ihre Arbeit nutzt Castiello einen „Fuzzy-Logik“-Ansatz, bei dem Unsicherheiten mit Prozentzahlen angegeben werden. Bei den Daten zu den Kantonen Aargau und Genf liegen ihr Angaben zur Unsicherheit in Form von sprachlichen Aussagen vor („sicher“, „unsicher“, „möglich“, „potenziell“ etc.). Diese Angaben übersetzt sie in Zahlenwerte für ihre Analysen und kann sie damit zumindest für zwei Kantone in die Vorhersage mit einbeziehen. Der Rezensent findet es sehr sinnvoll, dass das Thema „Unsicherheit“ hier angeführt und auch ein Lösungsvorschlag zum Umgang damit gemacht wird. Mit dem Fuzzy-Logic-Ansatz und dem Überführen der unsicheren Angaben in numerische Werte können Informationen ausgewertet werden, die sonst entweder weggelassen oder in vermeintliche sichere Informationen umgewandelt worden wären. Da in der archäologischen Forschung häufig Unsicherheiten auftreten, kann dieser Ansatz als gutes Beispiel für einen Umgang damit bieten.

In Kapitel 3.4 kommt Castiello schließlich zu dem namensgebenden Thema des Buches: *“Data Mining and Machine Learning Techniques”*. Sie bezieht sich auf Techniken, die aus dem Bereich der Umweltforschung stammen und sich gut für die Lagevorhersage archäologischer Fundstellen eignen. Erneut führt sie eine Reihe von archäologischen Fallstudien auf und zeigt damit, dass sie einem bereits etablierten Forschungsansatz folgt. Sie erläutert in aller Kürze den Unterschied zwischen überwachter und nicht überwachter Klassifizierung (*“supervised”* vs. *“unsupervised”*) und listet verschiedene Kategorien des maschinellen Lernens auf. Hier hätte sich der Rezensent etwas ausführlichere Erläuterungen gewünscht, da sicherlich nicht jeder lesenden Person sofort klar ist, was mit *“CART”* oder *“Maxnet”* gemeint ist. Aber da diese verschiedenen Methoden bzw. Algorithmen in der vorliegenden Arbeit nicht weiter verwendet werden, stört diese Kürze für das weitere Verständnis nicht. Die tatsächlich genutzte Methode *“Random Forest”* wird dementsprechend in einem eigenen Kapitel (3.5) ausführlich erklärt. Es gibt eine kurze Einleitung zu Entscheidungsbäumen (*“decision trees”*) und zu der Nutzung für das Random Forest Verfahren. Dieser Bereich ist gut verständlich und es wird klar erläutert, welche Vorteile bestehen und weshalb dieses Verfahren in der vorliegenden Arbeit genutzt wird. Um das Verständnis zu vertiefen, sind auch hier ausführliche Literaturverweise zu finden.

Im vierten Kapitel (*“Materials and Data”*) werden die Daten vorgestellt, die Castiello für ihre Analysen nutzt. Sie hat die Daten aus der Denk-

malpflege aus den folgenden Schweizer Kantonen erhalten: Aargau, Zürich, Graubünden, Freiburg, Waadt und Genf. Dabei erläutert sie sehr transparent, wie sie bei der Aufbereitung und Zusammenführung dieser sehr heterogenen Datensammlungen vorgegangen ist. Sie hat alle Daten in eine gemeinsame Datenbank integriert und normiert. Dabei hat sie als letztes Aufnahmedatum 2015 gewählt. Damit könnten jüngere Informationen genutzt werden, um ihre Vorhersagen zu testen (sie selbst ist diesen Schritt aber nicht gegangen).

Schließlich beschränkt sie sich auf die Denkmalkategorien *“Siedlung”* und *“Einzelfund”* für ihre weiteren Analysen. Mit der römischen Zeit ist auch der zeitliche Rahmen abgesteckt. Bei der Einteilung der Denkmaldaten in diese Kategorien bzw. Epochen hat sie sich auf die Zuordnungen aus der Denkmalpflege verlassen, was in Anbetracht der Datenmenge durchaus sinnvoll erscheint.

Sie erklärt auch noch einmal (Kapitel *“4.2 The Concept of ‘Archaeological Site’ and Relative Issues”*), dass das Konzept *“Fundstelle”* bzw. *“site”* in der archäologischen Forschung häufig uneindeutig genutzt wird und es viele Aspekte gibt, die die Definition einer Fundstelle ausmachen bzw. beeinflussen können (unklare räumliche Ausdehnung, Unsicherheiten über taphonomische Prozesse etc.). Für ihre Arbeit beschließt sie daher, alle Orte als *“site”* zu bezeichnen, wo archäologische Funde und Befunde geborgen oder beobachtet wurden. Hier geht sie also sehr pragmatisch vor und überlässt es der lesenden Person, weitere Recherchen zur theoretischen Debatte in der angegebenen Literatur zu verfolgen. Für eine Arbeit, die sich mit der Auswertung von Daten befasst, macht das auf jeden Fall Sinn.

Ebenfalls sehr gelungen ist die Übersicht über die Entwicklungen in der römischen Zeit in der Schweiz und genauer in den behandelten 6 Kantonen (Kapitel *“4.3 Historical Framework of the Research Areas”*). Castiello hält noch einmal fest, dass die römische Epoche in der Schweiz sehr gut dokumentiert ist und gibt einen kurzen Abriss über die Entwicklungen von der späten keltischen bis in die römische Zeit. Für die Lesenden, die sich mit diesen Entwicklungen nicht auskennen, ist das ein sehr hilfreicher Überblick. Castiello geht dabei verständlicherweise vor allem auf die Siedlungstätigkeiten ein.

Die folgenden Kapitel (4.4-4.9) vertiefen die Vorstellung des Arbeitsgebiets noch einmal. Für jeden der sechs Kantone gibt es eine Übersicht über geologische, topographische und naturräumliche Gegebenheiten, sowie die Entwicklung der römerzeitlichen Besiedlung. Außerdem wer-

den die Datensätze für jeden Kanton vorgestellt. Nach Meinung des Rezensenten fällt diese Vorstellung teils etwas zu detailliert aus. So sind im Text sämtliche Datenfeldbezeichnungen aufgeführt und stören etwas den Lesefluss. Diese Informationen hätten gut in den Anhang ausgelagert werden können. Aber natürlich wird durch diese Darstellung die Heterogenität der Datengrundlage noch einmal sehr anschaulich dargestellt.

Auch die geoökologische Faktoren, die zur Vorhersage (Kapitel "4.10 Geo-Environmental Predictors") genutzt werden, werden ausführlich vorgestellt. Die Autorin geht davon aus, dass für die Siedler in der römischen Zeit Faktoren, die für die landwirtschaftliche Nutzung günstig waren, eine wichtige Rolle gespielt haben. Sehr schön ist in diesem Zusammenhang die kurze Auswertung der römischen Schriftquellen mit Bezug auf die Landwirtschaft. Tabellarisch listet Castiello die geoökologischen Faktoren auf, die bereits von römischen Autoren als wichtig angesehen wurden. Damit ist klar, dass den Römern diese Standortfaktoren durchaus bewusst waren und entsprechend ausgesucht wurden. Das ist eine gute Voraussetzung für die angestrebten Analysen. Darüber hinaus geht sie davon aus, dass sich die Landschaft in ihrem Arbeitsgebiet in den letzten 2000 Jahren nicht signifikant verändert hat und nutzt daher für ihre Analysen moderne Landschaftsdaten. Konkret kann sie dafür auf offizielle und frei verfügbare Daten vom Bundesamt für Landestopografie Swisstopo (<https://www.swisstopo.admin.ch>) zurückgreifen. Diese liegen in 100 x 100m Quadranten vor. Natürlich kann man davon ausgehen, dass es kleinräumig trotz allem landschaftliche Veränderungen gab, aber der Rezensent hält die Nutzung der modernen Daten durchaus für sinnvoll, da ältere Landschaftsdaten ähnlich unsicher sind und die Rekonstruktion der originalen Landschaft aus römischer Zeit für ein so großes Arbeitsgebiet nicht ohne weiteres möglich wäre. Für die Auswertung werden Daten zur Topographie mit dem digitalen Höhenmodell und daraus berechneten Ableitungen zur Hangneigung und Ausrichtung nach Norden und Osten genutzt. Außerdem werden Daten zur Hydrologie mit der berechneten Entfernung zum Wasser (unter Verwendung der wichtigsten Seen und Flüsse) und die Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz mit Bezug auf die landwirtschaftliche Eignung der Flächen herangezogen, sodann schließlich Daten zur Geologie. Diese Daten werden ausführlich vorgestellt, so dass man einen guten Eindruck der Grundlagen für die folgenden Analysen gewinnt. Es wird deutlich gemacht, weshalb bestimmte Da-

ten relevant für die Siedlungsplatzwahl sind; z. B. ist die Hangneigung auch relevant für die landwirtschaftliche Bearbeitung bestimmter Gebiete oder der Abstand zu Wasserflächen kann Einfluss auf die Gefahr von Überflutung nehmen etc. Zusätzlich werden technische Informationen wie etwa Layernamen und Eigenschaften der Datensätze wiedergegeben.

Für Lesende, die bisher wenig mit GIS-Daten gearbeitet haben, folgen in Kapitel 5.1 ("GIS Pre-processing") Erklärungen zur Aufbereitung der vorliegenden Daten für die geplanten Analysen. Die Autorin hält dazu fest, dass sie ihre Arbeitsschritte als "flüssige Erzählung" ("fluid narration") darstellen möchte, um die Inhalte einfacher zu vermitteln. Hier hätte sich der Rezensent tatsächlich etwas mehr Ausführlichkeit gewünscht, z. B. mit einer Vorstellung der konkreten technischen Arbeitsschritte oder auch über eine Wiedergabe der genannten Python-Scripte im Anhang. Es ist ihm jedoch bewusst, dass solche Dinge einen zusätzlichen Arbeitsaufwand bedeuten und nicht in jedem Fall umsetzbar sind. Alternativ wäre auch eine Abkürzung des Themas wünschenswert gewesen. So wird zum einen für die Aufbereitung der GIS-Daten auf die Fachliteratur verwiesen, der Erstellung und Verwendung der relationalen Datenbank dagegen ein ganzer Abschnitt gewidmet. Auch die Normalisierung der Daten wird sehr ausführlich beschrieben. So werden z. B. die Übersetzungen der verwendeten Begriffe tabellarisch dargestellt. Hier hätte sich die Autorin sicherlich teils kürzer fassen oder mit Anhängen arbeiten können. Dennoch trägt dies auch zur Transparenz der Arbeit bei, da deutlich gemacht wird, welche Daten in welcher Form angeglichen wurden und welche Maßnahmen getroffen wurden, um die unsicheren Angaben einzubinden (Kapitel 5.2), bevor ein fertiger Datensatz für die Analysen bereitstand.

Im Kapitel 5.3 zur Vorbereitung der Umweltvariablen wird konkret auf die genutzte Software Bezug genommen (in diesem Fall ArcGIS und R) und in ähnlicher Weise wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, wie die einzelnen Umweltvariablen bearbeitet und für die Analysen vorbereitet wurden. Sehr ausführlich wird darauf eingegangen, wie einzelne Layer für das GIS aus den genutzten Grunddaten abgeleitet wurden; allerdings fehlen dem Rezensenten auch die hier konkreten Scripte (beispielsweise werden erneut Python-Scripte genannt aber nicht aufgeführt). So bleiben die Beschreibungen teils auf einem allgemeinen Level, teils werden aber auch konkrete Schritte genannt (wie dem „Ausschneiden“

der Kantonsgrenzen aus dem Datensatz für die gesamte Schweiz oder dem Zuweisen eines geografischen Referenzsystems im GIS) und die einzelnen Bezeichnungen der Layer aufgeführt. Es ist etwas unklar, ob der Text hier konkrete Anleitungen geben möchte oder eher informieren, welche Arbeiten durchgeführt wurden. Für ersteres sind die Angaben zu ungenau, für zweiteres hätte man sich kürzer fassen können.

Mit den gewonnenen Geodaten führt Castiello zunächst eine exploratorische Analyse durch. So kann sie beispielsweise bereits feststellen, dass für die meisten römischen Siedlungen in der Schweiz das Tiefland bevorzugt wurde (85 % befinden sich zwischen 350 m und 650 m ü.M.). Dabei gibt es jedoch auch einige Ausreißer. Genauso wertet sie die weiteren Umweltvariablen in Bezug auf die Siedlungen aus und stellt die Ergebnisse zusätzlich in mehreren Grafiken dar. Es werden sowohl die Ergebnisse für die gesamte Schweiz als auch für jeden einzelnen Kanton aufgeführt. Hier finden sich schon sehr gute Resultate, aber dem Rezensenten fehlen etwas die Vergleichswerte. Wenn beispielsweise festgestellt wird, dass in vier Kantonen die römischen Siedlungen meist innerhalb von 10km Abstand zum nächsten großen See liegen, wird leider nicht deutlich gemacht, wie das einzuschätzen ist. Liegen dort die Seen so dicht, dass jeder beliebige geografische Punkt innerhalb dieser 10km Distanz liegt oder ist es etwas Besonderes, dass die Siedlungen in diesem Abstand liegen? Wie ist hier der durchschnittliche Abstand zu den Seen generell? Welche Relevanz haben diese Aussagen also?

In einem nächsten Schritt kommt es schließlich zur Anwendung eines Algorithmus aus dem maschinellen Lernen: dem Random Forest (RF) Ansatz (Kapitel 5.5). Castiello möchte auch hier einen „erzählerischen Leitfaden für die Datenverarbeitung“ (*“a narrative computing guide”*) anbieten, um der lesenden Person ein Verständnis zu vermitteln, wie ihre verwendeten Modelle entwickelt wurden. Die Interpretation und Auswertung führt sie an einem anderen Ort auf. Insgesamt geht sie ähnlich vor wie in den vorhergehenden Kapiteln zur Vorbereitung der Daten: Es gibt eine Mischung aus konkreten Arbeitsschritten und eher allgemeinen Aussagen. Sie klärt zunächst, dass sie einerseits ein „Random Forest-Klassifikationsmodell“ nutzt, um die Wahrscheinlichkeit der Entdeckung neuer, unbekannter römischer Siedlung im gesamten Arbeitsgebiet vorherzusagen. Andererseits nutzt sie ein „Random Forest-Regressionsmodell“, um dieselbe Wahrscheinlichkeit für die Kantone Aargau und Genf unter Berücksichtigung der Unsicher-

heitswerte zu berechnen. Für die Durchführung der konkreten Berechnungen verweist sie lediglich auf RStudio (was etwas merkwürdig ist, da es sich hier nur um ein Entwicklungsumgebung für R handelt, wie Castiello auch selbst anmerkt) und auf die Literatur. Den Rezensenten hätte an dieser Stelle sehr interessiert, weshalb die Wahl auf R und nicht auf Python fiel – das an anderer Stelle ebenfalls verwendet wurde und sonst auch häufig für ML genutzt wird.

Castiellos genaues Vorgehen bei den Analysen bleibt etwas unklar. Sie nutzt für die Berechnungen eine Tabelle, die nur die geografischen Koordinaten und eine An- oder Abwesenheit einer römischen Fundstelle enthält. Unklar bleibt, wie die Abwesenheiten kodiert sind. Sind sämtliche Punkte in ihrem Arbeitsgebiet ohne Befund hier aufgeführt? Das kann eigentlich nicht gemeint sein. Hier wäre es zum besseren Verständnis sicherlich sinnvoll gewesen, die Originaldaten zumindest im Auszug zur Verfügung zu stellen. In einem späteren Abschnitt wird erklärt, dass zusätzlich zu der Anwesenheit von Fundstellen zufällige „Pseudo“-Abwesenheiten generiert werden müssen, damit RF funktioniert. Das heißt, es werden Stellen, von denen (bisher) keine römischen Denkmäler bekannt sind, als Stellen mit einer „Abwesenheit“ definiert. Am Ende werden die Daten zu den Fundstellen zusammen mit den Daten zu den Umweltfaktoren auf Quadranten mit 100m Kantenlänge zusammengefasst und für die Berechnungen verwendet. Auch hier hätte sich der Rezensent eine ausführlichere Beschreibung der konkreten Arbeitsschritte oder Beispieldaten gewünscht.

Ein weiteres Problem besteht für Castiello darin, dass insgesamt im Verhältnis nur wenige positive Nachweise für Bodendenkmäler in einem großen räumlichen Bereich zur Verfügung stehen. Dabei kann es zu einer „räumlichen Autokorrelation“ kommen, welche die Ergebnisse dadurch verzerrt, dass nahe beieinander liegende Quadranten ähnliche Eigenschaften besitzen. Um diesem Problem zu begegnen, führt sie sehr kurz die *“spatial k-fold cross validation”* ein, leider erneut, ohne die Umsetzung in R zu erläutern. Auch die Anwendung des RF-Algorithmus wird nur theoretisch erklärt. Sie weist darauf hin, dass die Ergebnisse der Klassifizierung mit RF bzw. ihre Validität sehr übersichtlich mit verschiedenen grafischen Darstellungen (Kartierungen, Diagramme) ausgegeben werden und so einfach zu interpretieren sind. Insgesamt ist dieses Vorgehen sehr interessant und kurz und verständlich dargestellt. Allerdings lässt es sich auf Grund fehlender konkreter

Erläuterungen leider nicht einfach nachvollziehen oder gar nacharbeiten. Für ihr Arbeitsgebiet konnte sie nach Tests für den Kanton Zürich die Anzahl der berücksichtigten geoökologischen Variablen auf sechs reduzieren, da sich damit ebenfalls gute Ergebnisse erzielen ließen. Lediglich für den Kanton Graubünden lagen nicht genügend Siedlungsfunde für die Erstellung eines validen Modells vor. Daher wurden hier sämtliche bekannten römerzeitlichen Funde genutzt. Für die Kantone Aargau und Genf wurden die Unsicherheitswerte einbezogen. Am Ende wurde noch ein Modell für die gesamte Schweiz erstellt, das auf sämtlichen Daten zu römischen Siedlungen aus dem Arbeitsgebiet errechnet wurde.

Kapitel 6 (*“Results and Discussion”*) enthält vor allem die Ergebnisse aus den zuvor beschriebenen Analysen. Die einzelnen Unterkapitel sind den untersuchten Kantonen gewidmet und ähnlich aufgebaut: Es gibt eine allgemeine Übersicht über die gewonnenen Erkenntnisse mit den Kriterien, die das jeweilige Modell als besonders relevant für das Vorhandensein von römischen Siedlungen ausgegeben hat, sowie jeweils eine oder mehrere ganzseitige Vorhersagekarten. Diese Karten sind schön gestaltet, allerdings sind sie komplett stumm (bis auf die farbig codierten Wahrscheinlichkeitskartierungen). Hier wäre es für die Lesenden, die sich nicht mit der Schweizer Geografie auskennen, sinnvoll gewesen, zumindest mit Punkten die größten modernen Ansiedlungen zu verzeichnen. Denn gerade die urbanen Gebiete weisen gewisse Probleme für die Vorhersagen auf, wie Castiello für den Kanton Zürich erläutert. So liegen die modernen Siedlungen oft auf bereits antik genutzten Plätzen. Außerdem gibt es Schwierigkeiten bei der landwirtschaftlichen Bewertung dieser Gebiete (sie werden heute als *“ungeeignete Böden”* geführt). Jedes Kapitel mit den Ergebnissen pro Kanton schließt mit einer Angabe der Modellgenauigkeit ab, sodass man schnell bewerten kann, wie erfolgreich die Modellierung war. Es ist interessant zu sehen, wie sehr diese Genauigkeiten in den einzelnen Regionen schwanken (von unter 70 % bis über 90 %). Aber auch die niedrigen Werte z.B. 68 % Genauigkeit für den Aargau werden von Castiello als gute Werte bezeichnet. Am Ende der Auswertung steht ein Vergleich mit dem Modell für die gesamte Schweiz. Es zeigt sich, dass das digitale Höhenmodell, die Entfernung zu den wichtigsten Seen, die Hangneigung, die Bodenbeschaffenheit, die Entfernung zu den wichtigsten Flüssen sowie die landwirtschaftliche Eignung der Böden am besten in der Lage sind, die Mehrheit der Gebiete

zu erklären, die eine höhere Wahrscheinlichkeit aufweisen, römische Siedlungen zu enthalten. Diese Variablen sind damit die wichtigsten Faktoren für die Vorhersage. Dies ist ein beachtenswertes Ergebnis und die hohen Werte für die Genauigkeiten zeigen, dass es gut möglich ist, den Ansatz von Castiello zu nutzen. Sie bestätigt dies im Kapitel zur Validierung ihrer Modelle (*“6.8 Validity Assessment”*). Es ist ein großer Vorteil von Modellierungen mit ML Techniken, dass diese keine externen Validierungstests benötigen, sondern durch eine Aufteilung der gesamten Daten in Trainings- und Testdatensätze eine interne Testung möglich ist. In Konfusionsmatrizen werden die Fehlerquoten für falsch positive oder falsch negative Vorhersagen für jeden Kanton aufgeführt. Es zeigt sich, dass es zwar gewisse Fehlerquoten gibt, diese aber gering genug sind, um von validen Modellen zu sprechen.

Die sich anschließenden Kapitel befassen sich mit der Einordnung der gewonnenen Ergebnisse und einer Zusammenfassung und Beschreibung der Einschränkungen bei den durchgeführten Arbeiten. Die Autorin macht hier deutlich, dass ihre Vorhersagen trotz allem mit vielen Unsicherheiten behaftet sind, die teils ihren Ursprung schon in der Qualität der zugrundeliegenden archäologischen Daten haben, teils aber auch zwangsläufig durch Entscheidungen während des Modellierungsprozesses entstehen. Die gewonnenen Karten können daher nicht als exakte Darstellung von römischen Bodendenkmälern angesehen werden. Trotzdem ist Castiello zuversichtlich, dass es sinnvoll ist, in Zukunft verstärkt auf Modellierungen mit Hilfe von maschinellem Lernen zu setzen und führt am Ende des sechsten Kapitels noch einmal die Vorteile der von ihr genutzten Methoden auf. Zwar wiederholt sich die Autorin hier etwas, aber es ist sehr anschaulich, hier noch einmal ihr Vorgehen und die Vorteile kondensiert dargelegt zu bekommen.

Das abschließende siebte Kapitel enthält eine Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten und bettet diese nochmals in den Forschungskontext ein. Der Rezensent hätte sich an dieser Stelle weniger Ausführlichkeit gewünscht, da teils sehr detailliert referiert wird, was bereits an anderer Stelle vorgestellt wurde (so wird noch einmal über mehrere Seiten beschrieben, wie die Daten für die Standortanalyse der römischen Siedlungen lautend schließlich: die Mehrheit der Standorte fällt auf Gebiete, die auch heute noch als besonders gut für die Landwirtschaft geeignet gelten. Außerdem wurden flaches Land und sanfte Hänge und die Nähe

zu den wichtigsten Flüssen und Seen bevorzugt. Dies erscheint an sich wenig überraschend, ist aber nun durch ausführliche Analysen abgesichert.

Die Arbeit endet mit einem kleinen, anderthalbseitigen Ausblick auf zukünftige Forschungsperspektiven. Insgesamt ist die Autorin der Meinung, dass ihre Methodik sich sehr gut auf andere Regionen für Belange der Denkmalpflege und der Vorhersage von archäologischen Bodendenkmälern übertragen lassen kann. Auch mit ihren Modellen kann man sicherlich gut weiterarbeiten. Interessant ist auch die Idee, die Vorhersagekarten mit Satellitenbildern zu kombinieren und per Fernerkundung neue archäologische Stätten zu identifizieren.

Abschließend kann festgehalten werden, dass Castiello ihre eingangs formulierten Ziele durchaus erreicht: sie stellt eine neue Methode zur Erstellung archäologischer Vorhersagekarten für die Schweiz vor, die augenscheinlich gute Ergebnisse bringt. Die Methodik ist gut und transparent dargestellt. Ob es sich jedoch um „eine der besten Doktorarbeiten der Welt handelt“, vermag der Rezensent an dieser Stelle nicht zu entscheiden. So fehlt zum Beispiel ein Abgleich der aus den Modellen gewonnenen Informationen mit modernen Grabungsergebnissen, die der Autorin scheinbar zumindest für einige Regionen vorlagen. Es wäre sehr interessant gewesen zu sehen, wie gut die Modelle neue Fundstellen tatsächlich vorhersagen.

Neben den genannten formalen (wie dem Literaturverzeichnis ohne Zusammenhang) und leichten inhaltlichen Schwächen fällt auf, dass sich ein Teil der Arbeit mit der Zusammenfassung oder Wiederholung der Inhalte aus anderen Teilen befasst. Das hilft zwar dabei, das Gelesene noch einmal zu verinnerlichen, aber man bekommt als lesende Person leider das Gefühl, dass der tatsächliche inhaltliche Umfang der Arbeit etwas kleiner ist, als es die Seitenzahlen angeben. Auch die langen Listen mit den Datenfeldbezeichnungen aus den archäologischen Datenbanken hätten statt in den Haupttext in den Anhang integriert werden können. Hier hätte sich die Autorin gerne an einigen Stellen kürzer fassen können. Darüber hinaus lautet der Titel des Buches „*Computational and Machine Learning Tools for Archaeological Site Modeling*“. Doch leider hält das Buch das Versprechen auf „*Werkzeuge*“ für die archäologische Forschungen nicht ein. Stattdessen handelt es sich um eine gut gemachte Fallstudie zum *Predictive Modelling*, die mit einer (!) Methode des maschinellen Lernens arbeitet. Das ist für die regionale Schweizer Forschung und Denkmalpflege sicherlich sehr interessant und

auch als Anregung für ähnliche Forschungen in anderen Regionen gut zu nutzen, aber das Buch vergibt eine Chance. Mit diesem Titel hätte es als eine Art Handbuch sehr viel relevanter für die archäologische Forschung allgemein sein können. Trotzdem ist es ein Verdienst dieser Arbeit, das Thema „*Maschinelles Lernen*“ in den Kontext der archäologischen Forschung und besonders der Vorhersagemodellierungen einzubringen (auch wenn es keineswegs der erste oder einzige Ansatz in diesem Bereich ist, siehe z. B. BICKLER, 2021). Sicherlich können anhand dieses Beispiels weitere Studien und Untersuchungen entwickelt werden. Leider wird man sich für Hinweise oder Anleitungen bei der konkreten Umsetzung jedoch auf andere Werke beziehen müssen. Teile der Arbeit sind bereits unter dem Titel „*An Explorative Application of Random Forest for Archaeological Predictive Modeling. A Swiss Case Study*“ veröffentlicht worden (CASTIELLO & TONINI, 2021). Ein daran angelehnter Titel wäre für die vorliegende Publikation sicherlich günstiger, da näher am Inhalt gewesen.

## Literatur

- Bickler, S. H. (2021). Machine Learning Arrives in Archaeology. *Advances in Archaeological Practice*, 9 (2), 186–191. <https://doi.org/10.1017/aap.2021.6>
- Castiello, M. E. & Tonini, M. (2021). An Explorative Application of Random Forest Algorithm for Archaeological Predictive Modeling. A Swiss Case Study. *Journal of Computer Applications in Archaeology*, 4 (1), 110–125. <http://doi.org/10.5334/jcaa.71>
- Serrano, L. G. (2021). *Grokking machine learning*. Shelter Island: Manning. <https://livebook.manning.com/book/grokking-machine-learning/grokking-machine-learning> [26.4.2023].

Dr. Sebastian Kriesch  
Museum für Vor- und Frühgeschichte – SMB  
Archäologisches Zentrum  
Geschwister-Scholl-Straße 6  
D-10117 Berlin  
[s.kriesch@smb.spk-berlin.de](mailto:s.kriesch@smb.spk-berlin.de)

<https://orcid.org/0000-0003-0465-0804>