

Topologische, raumzeitliche Repräsentation natürlicher Geoobjekte

MARC-O. LÖWNER¹ & THOMAS BECKER²

Zusammenfassung: Natürliche Geoobjekte sind für eine Vielzahl von Wissenschafts- und Ingenieurdisziplinen von großer Bedeutung. Erkenntnisse über diese Geoobjekte müssen beschrieben und miteinander vergleichbar gemacht werden. In diesem Artikel wird ein neuer Ansatz zur Repräsentation der komplexen raumzeitlichen Entwicklung von Landformen vorgestellt, durch den diese mittels einer Poincaré Dualität simplifiziert werden. Einzelne Schichten der Landform werden als Knoten (DualStructures), deren topologische Nachbarschaften als Kanten (DualStructureRelations) repräsentiert. Die Klasse „DualStructureState“ repräsentiert eine Landform, die über eine Zeitspanne konstante interne Zustände aufweist. Veränderungen von Landformen werden auf zusätzlichen Kanten, dem „Abstract_GeoProcess“ abgebildet und zwischen den Knoten der verschiedenen Schichten modelliert. Die Gesamtstruktur bildet damit einen Multilayer-Graph, der die Knoten aller N Schichten enthält, die in M Zeitscheiben zerlegt sind. Ergänzend dazu können alle dualen Repräsentationen mit entsprechenden geometrischen und semantischen Repräsentationen assoziiert werden.

1 Einleitung

Natürliche Landformen und geologische Strukturen sind für eine Vielzahl von wissenschafts- und Ingenieurdisziplinen von großer Bedeutung, da sie die natürlichen Randbedingungen bilden, auf denen Infrastrukturen gegründet werden. Ingenieur- und Geowissenschaften können dabei von GI-Technologien profitieren, um die Erkenntnisse über Landformen, ihre internen Zustände und ihre Veränderungen in Vergangenheit und Zukunft austauschbar und vergleichbar zu machen. Landformen sind durch ihre internen Strukturen, ihren topologischen Beziehungen zu anderen Landformen und ihren durch die jeweilige Klimasituation bedingten Veränderungen einzigartig. Daher ist einer physikalischen Modellierung stets die Beobachtung bestehender Landformen und die Übertragung dieser Beobachtungen auf die zukünftige Veränderung vorzuziehen oder beizustellen.

Zu einer Beschreibung einer Landform gehört nach DIKAU (1999) ihre Veränderung in der Zeit, die sich durch ihre Stratigraphie ausdrückt. Des Weiteren ist auch die Betrachtung der räumlichen Verteilung mehrerer Landformen wichtig, da diese nicht isoliert sondern in Nachbarschaft mit anderen auftreten. Mit diesen sind sie über Materialtransportprozesse miteinander verbunden. Dieser topologische Aspekt kann auch zur Aufklärung der zeitlichen Abfolge der Bildung von Geoobjekten in Form einer relativen Datierung herangezogen werden (LÖWNER 2013A).

1) Marc-O. Löwner, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Braunschweig, Pockelsstraße 3, 38106 Braunschweig; E-Mail: m-o.loewner@tu-bs.de

2) Thomas Becker, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, Technische Universität Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, E-Mail: thomas.becker@tu-berlin.de.

Die Prädiktion zukünftiger Entwicklungen einzelner Geoobjekte erfolgt in den Geowissenschaften unter Zuhilfenahme des ergodischen Prinzips, das etwa durch WELCH (1970) oder BRUNSDEN & KESEL (1973) demonstriert wurde. Hierbei werden die nicht direkt beobachtbaren, vergangenen und zukünftigen Zustände und Prozesse eines bestimmten Geoobjektes durch die Betrachtung des Raumes, also vieler anderer Geoobjekte ähnlicher Ausprägung aber anderen Alters substituiert. Dieses Prinzip folgt dem des Aktualismus, nach dem heute beobachtbare Prozesse unter gegebenen, hauptsächlich klimatischen Bedingungen auch in der Vergangenheit stattgefunden haben müssen, wenn die Randbedingungen vergleichbar waren.

Diese in der Geologie und Geomorphologie zur Anwendung kommenden Prinzipien können erheblich durch Methoden der Geoinformationswissenschaften unterstützt werden. Werden in den Fachwissenschaften die Erkenntnisse heutzutage immer noch in nahezu rein schriftlicher Form archiviert, könnten geeignete geometrisch-semantische Austauschformate und entsprechende Methoden der Repräsentation raumzeitlicher Phänomene eine Vergleichbarkeit einzelner Geoobjekte erleichtern helfen.

Die Definition eines semantischen Datenmodells stellt allerdings aufgrund des komplexen Aufbaus natürlicher Geoobjekte sowie der sie verändernden Materialtransportprozesse eine erhebliche Herausforderung dar. Ein Problem dabei ist etwa die Integration feldbasierter Ansätze in Verbindung mit der Repräsentation als Boundary Representation (REQUICHA, 1980). Letztere kann hervorragend zur Repräsentation von gebauter Infrastruktur verwendet werden, die diskrete Phänomene darstellen. CityGML ist hierfür ein erfolgreiches Beispiel (GRÖGER ET AL., 2012; LÖWNER ET AL. 2012). Die Bodenschichten natürlicher Geoobjekte weisen dagegen oft unscharfe Grenzen auf und sind dazu auch schwer zu detektieren. Trotz dieser Schwierigkeiten können semantische Informationen, topologische Beziehungen und die zeitliche Abfolge in einer Ontologie abgebildet werden.

In diesem Artikel wird ein 4D-Datenkonzept vorgeschlagen, dass die topologische Repräsentation von natürlichen Geoobjekten mit deren geometrisch-semantischen Repräsentation verbindet. Mittels der topologischen Beschreibung ist es möglich, Abfolgen geologischer Schichten sowie die Nachbarschaften einzelner Landformen zu beschreiben, ohne dass exakte geometrische Informationen vorliegen. Diese topologischen Beschreibungen können darüber hinaus dafür verwendet werden, relative Datierungen der natürlichen Geoobjekte vorzunehmen (LÖWNER 2013A). Zusätzlich ist eine geometrische Beschreibung weiter möglich und wird durch die topologische Analyse sogar unterstützt (LÖWNER 2013B). Durch die Kombination eines Multilayer-Graphen Modells für Innenraumnavigation (BECKER ET AL. 2008) mit einem GML-basierten geometrisch-semantischen Datenmodell für natürliche Geoobjekte (LÖWNER, 2005; LÖWNER, 2010) wird eine raumzeitliche Repräsentation von natürlichen Geoobjekten und ihrer internen Zustände ermöglicht. Ein solch formales Datenmodell stellt einen wesentlichen Schritt in Richtung interoperablen Austausches und damit der Vergleichbarkeit von wissenschaftlichen Ergebnissen im Bereich der Geomorphologie und Geologie dar.

2 Anwendung des Modells auf ein geomorphologisches Beispiel

Das entwickelte Modell eines Multilayer-Graphen in Verbindung mit einem geometrisch-semanticen Datenmodell zur Beschreibung natürlicher Geobjekte wird hier auszugsweise anhand eines Hangsystems illustriert, das mit geophysikalischen und sedimentologischen Methoden untersucht und dessen etwa 10.000 Jahre währende Genese entschlüsselt wurde (LÖWNER ET AL., 2005). Eine vollständige Dokumentation des Modells findet sich in LÖWNER & BECKER (2013).

Abb. 1 zeigt das durch Bohrungen rekonstruierte Querprofil des Hangsystems, das eine mehrfache Überformung in verschiedenen Zeitabschnitten dokumentiert. Die Untergrenze bildet oligozäner Trachyt Tuff (etwa 23 Mio. Jahre alt) der von äolischem Sediment, dem Löss, überdeckt wird, der etwa 10.000 Jahre alt ist (SIEBERTS, 1983). Dieses Gestein ist nach oben begrenzt durch einen B_v-Horizont, der eine hunderte von Jahren währende Bodenbildung reflektiert. Weiter wird er begrenzt durch holzkohleführende kolluviale Bodenschichten, die eine vormals entstandene lineare Bodenerosionsform, einen Graben, ausfüllen. Die oberste Schicht besteht aus einer kalkhaltigen Schicht, die durch flächenhafte Bodenerosion transportiert und abgelagert wurde. Die untere Grenze des Gullys konnte durch optische Thermolumineszenz (LANG & WAGNER 1996) auf ca. 1250 Jahre vor heute datiert werden (PRESTON 2001). Die Entstehung des Hanges wurde folgendermaßen rekonstruiert (LÖWNER 2000):

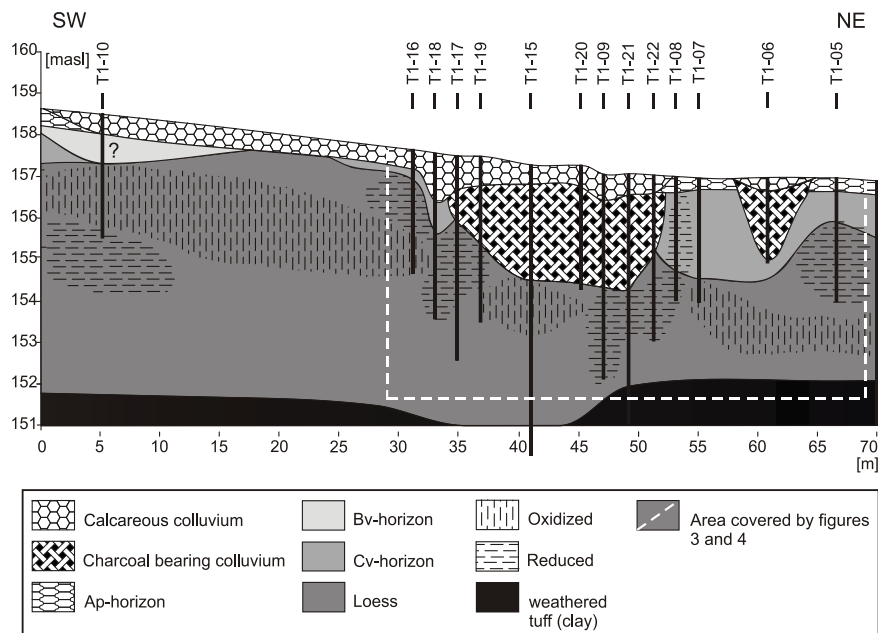


Abb. 1: Querprofil eines durch Bodenerosion und Akkumulation überformten Hangsystems im Pleiser Hügelland, Bonn (aus LÖWNER ET AL., 2005).

1. Erosion des entkalkten Oberbodens und Eintiefung der linearen Erosionsform. Da die Methode der Thermolumineszenz die letzte Exposition von Mineralien zum Tageslicht ermittelt, kann der Beginn der Verfüllung des Grabens auf 1250 vor heute angenommen werden.

2. Verfüllung des Grabens mit Material, das vom Oberhang nach 1250 vor heute erodiert wurde. Da diese Füllung, das Kolluvium, Holzkohlestückchen enthält, lässt sich auf Brandrohung als entscheidende Randbedingung dieses Prozesses schließen.

3. Anhaltende flächenhafte Erosion am Ober- und Mittelhang sowie Akkumulation des erodierten Materials am Hangfuß. Da dieses Material ebenso wie das Ausgangsgestein Löss kalkhaltig ist, muss von geänderten Randbedingungen ausgegangen werden.

Dieses Beispiel zeigt, dass die heute zu beobachtenden Landformen, wie etwa Hänge, das Ergebnis einer komplexen Genese sind. Neben der Geometrie werden dabei auch topologische Beziehungen und Materialeigenschaften verändert. Die beteiligten Prozesse, die diese Landformen durch Erosion und Akkumulation aber auch durch innere Veränderungen, wie Verwitterung beeinflussen, sind ein wesentlicher Schlüssel zur Aufdeckung der Entstehungsgeschichte natürlicher Geoobjekte.

Die Repräsentation des ersten Abschnitts der oben geschilderten Genese nach dem hier entwickelten Multilayer-Graphen Ansatz ist in Abb. 2 dargestellt.

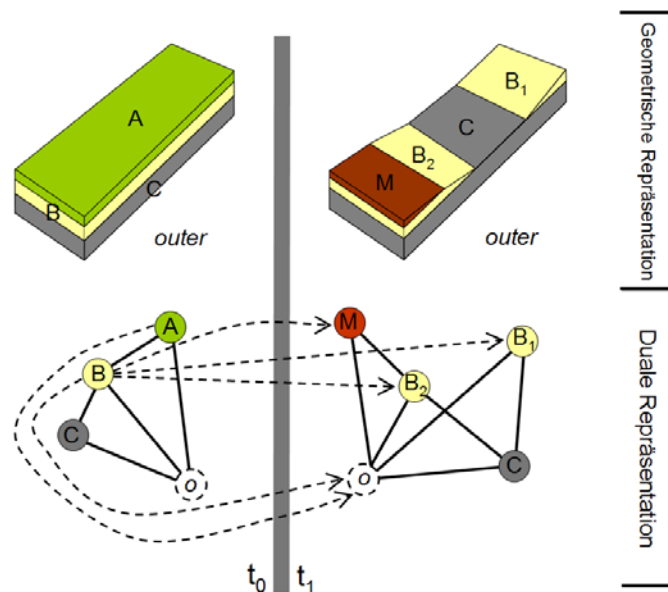


Abb. 2: Repräsentation des ersten Abschnitts der Genese des heute sichtbaren Hangs von t_0 zu t_1 durch den Multilayer-Graphen Ansatz (verändert nach LÖWNER & BECKER, 2013).

Die *Landform* und die sie aufbauenden *LandformLayers* sind hier als Blockmodelle dargestellt, um die durch die entsprechenden Klassen (entsprechend der Normen des ISO TC211) repräsentierte Geometrien zu verdeutlichen. Der Graph, der die durch die Knoten (*DualStructure*) A, B, C, und o sowie die verbindenden Kanten (*DualStructureRelations*, durchgezogene Linien) gebildet wird, ist die duale Struktur des Zustandes eines Geoobjektes (*LandformState*) innerhalb einer veränderungsfreien Zeitspanne. Man beachte den Knoten (o)uter, der die unbekanntes Landformen repräsentiert, die an die betrachtete Landform angrenzen.

Die Veränderungen der Landform von einem zeitlich begrenzten Zustand in den anderen wird durch einen Prozess (*Abstract_GeoProcesses*) verursacht, der hier als gestrichelte Linien

zwischen den Schichten der einzelnen Zustände dargestellt ist. Diese Kanten können weiter spezialisiert werden, etwa durch Angabe des Prozesstyps und die Rate in Form von Attributen (LÖWNER, 2008).

Der hier repräsentierte Hang ist in seinem Anfangszustand zur Zeit t_0 aus den drei Bodenschichten A, B und C aufgebaut. Dies ist die typische Situation eines lössbedeckten Hanges unter Wald nach entsprechender Bodenbildung. Folglich besteht der Graph der Landform aus vier Knoten, den drei dualen Repräsentationen und dem Äußeren (o). Die Veränderung wird durch fünf, die Prozesse repräsentierenden Inter-Layer-Kanten gebildet, den *DualStructureRelations*, $A-B$, $B-C$, $A-o$, $B-o$, und $C-o$. Ganz allgemein repräsentiert das Äußere den umgebenden Raum und damit andere Landformen, die entweder nicht betrachtet werden oder zur Zeit der Untersuchung unbekannt sind.

Zu einem gewissen Zeitpunkt wird das bestehende System durch die Rodung des Waldes und die damit verbundene Sensibilisierung gegenüber erosiven Kräften gestört. Das Ergebnis ist die Landform zum Zeitpunkt t_1 . Der A-Horizont ist völlig erodiert, der B-Horizont ist in zwei disjunkte Geometrien zerschnitten und ein Teil des Materials ist am Hangfuß akkumuliert worden. Der andere Teil ist aus dem System heraus ins Äußere (o) transportiert worden. Der Graph der diesen Zustand zum Zeitpunkt t_1 abbildet (*LandformState*) weist sieben Relationen zwischen den dualen Strukturen (*DualStructureRelations*) auf: B_1-C , B_2-C , $M-B_2$, B_1-o , B_2-o , $C-o$, und $M-o$.

Die Prozesse, die diese Veränderung der Geometrie und der topologischen Beziehungen herbeiführen (*Abstract_GeoProcesses*) werden durch gerichtete Kanten (gestrichelte Linien) repräsentiert. Von t_0 zu t_1 können fünf dieser *Abstract_GeoProcesses* oder deren Spezialisierungen identifiziert werden:

- $A_{t_0} \rightarrow o_{t_1}$, (Erosion): Das gesamte Material des A-Horizonts (*Structure*) ist erodiert und zum Äußeren (o), also aus dem System heraus transportiert worden.
- $B_{t_0} \rightarrow B_{1t_1}$ und $B_{t_0} \rightarrow B_{2t_1}$ (Erosion): Der Horizont B_{t_0} ist dergestalt erodiert, dass er in zwei disjunkte Teile zerfällt (*LandformLayers*). Allerdings bleiben die Materialeigenschaften der Schichten B_{t_0} , B_{1t_1} und B_{2t_1} erhalten.
- $B_{t_0} \rightarrow M_{t_1}$ (Erosion und Akkumulation): Ein Teil des von B_{t_0} erodierten Materials ist als sog. Migrationshorizont (M) akkumuliert worden. Grund dafür ist die am Hangfuß abnehmende Fließgeschwindigkeit des Wassers und die damit einher gehende verringerte Transportkapazität.
- $B_{t_0} \rightarrow o_{t_1}$ (Erosion): der größte Anteil des von der Schicht B erodierten Materials ist aus dem System heraus transportiert worden.

3 Diskussion

Das im Beitrag vorgestellte Model kombiniert eine geometrisch-semantische Modellierung natürlicher Geoobjekte mit einem Ansatz aus der Innenraumnavigation und stellt somit eine wesentliche Neuerung in der Repräsentation von Landformen dar. Dies kann zu einem verbesserten interoperablen Austausch und Vergleich wissenschaftlicher Ergebnisse von natürlichen Geoobjekten führen. In Betrachtung existierender Modelle kann dieser Ansatz als übergeordneter Ansatz verstanden werden, der ohne eine Veränderung bestehender Modellierungen die Repräsentation zeitlicher Abläufe ermöglicht. Die grundlegende

Funktionalität des Ansatzes wird im Beitrag anhand eines realen Geoobjektes aufgezeigt, kann aber auch auf andere Objektarten, etwa Gebäude übertragen werden.

4 Literaturverzeichnis

- BRUNSDEN, D. & KESEL, R. H., 1973: The evolution of a Mississippi river bluff in historic time. *Journal of Geology* **81**, S. 576-597.
- DIKAU, R., 1999: The need for field evidence in modelling landform evolution. In: HERGARTEN, S. & NEUGEBAUER, H., (HRSG.): Process modelling and landform evolution, Lecture Notes in Earth Sciences **78**, S. 3-12.
- LÖWNER, M.-O., 2000: Geophysikalische und sedimentologische Untersuchungen zu Sedimentspeichern auf Gut Frankenforst. Diplomarbeit an der Universität Bonn, (unveröffentlicht), 141 S.
- LÖWNER 2005, Semantische Modellierung von steilen Hangbereichen in einem Geoinformationssystem (GIS) unter besonderer Berücksichtigung von Wänden und steilen Hangbereichen. Doktorarbeit an der Universität Bonn, 146 S.
- LÖWNER, M.-O., 2008: Towards a GML3-based application model for geomorphic objects. In: LEE, J. & ZLATANOVA, S. (HRSG.): Proceedings of the 3rd International Workshop on 3D Geo-Information. Nov. 13.-14. 2008, University of Seoul, S. 11-15.
- LÖWNER, M.-O., 2013A: On problems and benefits of 3D topology on under-specified geometries in geomorphology. In: POULIOT, J., DANIEL, S., HUBERT, F. & ZAMYADI, A. (Hrsg.): Progress and New Trends in 3D Geoinformation Sciences. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, S. 155-170.
- LÖWNER, M.-O., 2013B: 3D topological relationships of landforms and their Spatial Schema based representation. *Geo-spatial Information Science*, **16**(4), 238-246.
- LÖWNER, M.-O., BENNER, J., GRÖGER, G., GRUBER, U., HÄFELE, K.-H. & SCHLÜTER, S., 2012: CityGML 2.0 - ein internationaler Standard für 3D-Stadtmodelle, Teil 1: Datenmodell. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 6/2012, S. 340-349.
- LÖWNER, M.-O., PRESTON, N. J., DIKAU, R., 2005. Reconstruction of a colluvial body using geoelectrical resistivity. *Z. Geomorph. N. F.*, **49**(2), S. 225-238.
- LÖWNER, M.-O. & BECKER, T., 2013: A topological framework for the temporal aspects of landform development, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-2/W1, S. 237-246.
- PRESTON, N. J., 2001: Geomorphic Response to Environmental Change: the Imprint of Deforestation and Agricultural Land Use on the Contemporary, Landscape of the Pleiser Hügelland, Bonn, Germany. Doktorarbeit an der Universität Bonn, 125 S.
- REQUICHA, A. A. G., 1980: Representation for rigid solids: Theory, methods and systems, *ACM Computing Surveys*, **12**, 437 S.
- SIEBERTS, H., 1983: Neue sedimentologische Untersuchungsergebnisse von weichselzeitlichen äolischen Deckensedimenten auf dem Niederrheinischen Höhenzug. *Arbeiten zur Rheinischen Landeskunde*, **51**, S. 51-97.
- WELCH, D. M., 1970: Substitution of space for time in a study of slope development. *Journal of Geology*, **78**, S. 234-239.