

Prozedurale Verfahren zur Generierung von 3D-Infrastrukturobjekten

Andreas DONAUBAUER, Roman ESCH und Thomas H. KOLBE

Lehrstuhl für Geoinformatik · Technische Universität München ·
Arcisstraße 21 · 80333 München

E-Mail: andreas.donaubauer|roman.esch|thomas.kolbe@tum.de

Dieser Beitrag wurde durch das Programmkomitee als „reviewed paper“ angenommen.

Zusammenfassung

Bei der automatisierten Ableitung von dreidimensionalen Digitalen Landschaftsmodellen (3D-DLM) aus 2D-DLM und Digitalen Höhenmodellen (DHM) werden meist nur zweieinhalbdimensionale Objekte erzeugt. Der vorliegende Beitrag zeigt, wie 3D-DLM mittels prozeduraler Verfahren automatisiert und damit flächendeckend für große Gebiete um dreidimensionale Infrastrukturobjekte ergänzt werden können. Ziel ist es dabei, eine kohärente semantische und geometrische Repräsentation von Infrastrukturobjekten wie Hochspannungsleitungen, Brücken und Tunnel zu erhalten. Der Beitrag beschreibt zwei Arten von prozeduralen Methoden: Am Beispiel Brücken und Tunnel kommt eine Methode auf der Basis einer Formgrammatik zum Einsatz. Ein workflowbasierter Ansatz wird am Beispiel Hochspannungsleitungen vorgestellt.

Einführung

Recherchiert man im Bereich der Geoinformatik zu Verfahren für die Erstellung von semantischen 3D-DLM aus Geobasisdaten – 2D-DLM und DHM (digitalen Geländemodellen/digitalen Oberflächenmodellen) – so lassen sich die Arbeiten meist in eine der beiden Kategorien „3D-Gebäude-Rekonstruktion“ (siehe z. B. BRENNER (2000) und „Generierung von

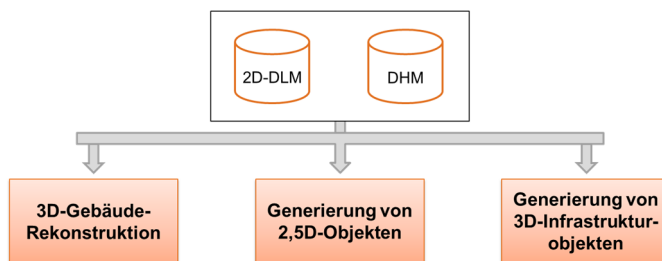


Abb. 1: Verfahren zur Erzeugung von dreidimensionalen Digitalen Landschaftsmodellen aus 2D-DLM und Digitalen Höhenmodellen.

2.5D-Objekten“, also die Integration von topographischen Objekten wie Straßen oder Gewässer mit einem Digitalen Geländemodell (siehe z. B. KOCH 2006) einteilen.

Die automatische Generierung von 3D-Modellen zur Repräsentation von Infrastrukturobjekten wie Hochspannungsleitungen, Brücken und Tunnel aus 2D-DLM und DHM wird von diesen Verfahren meist nicht abgedeckt.

Vor dem Hintergrund, dass 3D-Infrastrukturobjekte wichtige Bestandteile einer dreidimensionalen Abbildung der Landschaft darstellen und sie daher auch in bestehenden 2D-DLM repräsentiert werden, beschreibt dieser Beitrag Methoden zur Erzeugung von 3D-Infrastrukturobjekten (Hochspannungsleitungen, Brücken, Tunnel) aus vorhandenen 2D-DLM-Daten und DHM. Im Mittelpunkt des Interesses stehen dabei prozedurale Methoden. Letztere versprechen einen hohen Automationsgrad, besonders wenn die zu erzeugenden Objekte relativ standardisierte Formen aufweisen, was auf Infrastrukturobjekte häufig zutrifft. Im Unterschied zu den in der Literatur beschriebenen prozeduralen Ansätze – siehe z. B. KELLY & MCCABE 2006 – ist es das Ziel der hier dargestellten Methoden, neben der Form und Erscheinung der 3D-Infrastrukturobjekte auch ihre Semantik zu repräsentieren. Die Modellierung findet dabei nach dem Datenmodell des internationalen Standards CityGML (GRÖGER et al. 2012) statt.

1 Repräsentation von 3D-Infrastrukturobjekten in CityGML

Der internationale Standard CityGML definiert ein semantisches Modell für die Repräsentation von 3D-Stadt- und Landschaftsmodellen in fünf Levels of Detail (LOD). Das semantische Modell besteht aus einem Kern- und mehreren thematischen Modulen. Während das Kernmodul die grundlegenden Konzepte definiert, deckt jedes weitere Modul ein bestimmtes Thema ab, z. B. Gebäude, Geländemodell, Gewässer und Vegetation. Implementierungen des Standards müssen nur eine auf ihre Anforderungen zugeschnittene Teilmenge des Datenmodells implementieren. Besonders relevant für die Repräsentation von 3D-Infrastrukturobjekten sind die Module *Bridge* und *Tunnel* (für Brücken- und Tunnelbauwerke) sowie *CityFurniture* (z. B. für Hochspannungsmasten).

Das Modul *CityFurniture* ist sehr einfach aufgebaut. Über die Attribute *class*, *function* und *usage* lassen sich die Objekte der zentralen Klasse *CityFurniture* semantisch klassifizieren. So kann ein *CityFurniture*-Objekt z. B. der Klasse „Kommunikation“ und der Funktion „Sendemast“ zugeordnet werden. Geometrisch können *CityFurniture*-Objekte in den LODs 1 bis 4 mittels expliziter oder impliziter Geometrie repräsentiert werden. Das aus der Computergrafik entlehnte Konzept der impliziten Geometrie erlaubt es, prototypische Geometrieobjekte zu definieren (z. B. zur Repräsentation eines Hochspannungsmasts) und diese mittels Ankerpunkten beliebig oft in einem Stadt- oder Landschaftsmodell zu platzieren. Mittels einer für jeden Ankerpunkt definierten Transformationsmatrix lassen sich die prototypischen Geometrieobjekte skalieren und ausrichten.

Die Module *Bridge* und *Tunnel* sind wesentlich komplexer und weisen eine ähnliche Struktur auf, wie das Modul *Building* (für die Repräsentation von Gebäudeobjekten). Die Klassen *Bridge* und *BridgePart* beziehungsweise *Tunnel* und *TunnelPart* sind jeweils Spezialisierungen der zentralen Klassen *_AbstractBridge* beziehungsweise *_AbstractTunnel*. Komplexe Brücken- und Tunnelobjekte können so rekursiv in Teile zerlegt werden (*BridgePart*- bzw. *TunnelPart*-Objekte). Über ihre Attribute *class*, *function* und *usage* lassen sich die Objekte

der zentralen Klasse *CityFurniture* semantisch noch näher beschreiben. So dient beispielsweise das Attribut *class* bei Brückenobjekten dazu, unterschiedliche Konstruktionstypen von Brücken zu beschreiben (z. B. Hängebrücke), während das Attribut *function* die vorgesehene Nutzung der Brücke abbildet (z. B. Eisenbahnbrücke). Ab dem LOD2 besteht die Möglichkeit, die Hülle der Objekte in semantische Objekte zu gliedern, z. B. in Wand- und Dachflächenobjekte. Ab dem LOD3 sind Öffnungen in diesen Objekten modellierbar und im LOD4 kann auch der Innenraum der Objekte semantisch und geometrisch repräsentiert werden. Für die semantische Repräsentation des Innenraums weisen alle drei Module entsprechende Klassen auf, z. B. *Room* und *BridgeRoom* für die Repräsentation von Räumen innerhalb von Brücken und *HollowSpace* für die Repräsentation von Hohlräumen in Tunneln. Das Brückenmodul enthält zusätzlich die Klasse *BridgeConstructionElement*, mit der z. B. Widerlager repräsentiert werden können.

Eine detaillierte Beschreibung der Module *Bridge* und *Tunnel* kann LÖWNER et al. (2012) und GRÖGER et al. (2012) entnommen werden.

2 Prozedurale Methoden zur Erzeugung von 3D-Infrastrukturobjekten

In den folgenden Abschnitten werden prozedurale Methoden zur Erzeugung von 3D-Infrastrukturobjekten beispielhaft für die Objektklassen Brücke, Tunnel und Hochspannungsleitung beschrieben.

2.1 Prozedurale Modellierung

Die Prozedurale Modellierung beschäftigt sich mit der (halb-) automatischen Generierung von Modellen mithilfe eines Programms oder einer Prozedur. Dabei sind die Datenkompression und das Potenzial, eine Vielzahl von detaillierten Inhalten ohne manuelle Eingriffe erzeugen zu können, für die Erstellung von virtuellen Umgebungen sehr gut geeignet. Diese virtuellen Umgebungen finden zunehmend in Filmen, Spielen und Simulationen Verwendung (SMELIK et al. 2014). Die Prozedurale Modellierung hält aber auch Einzug in die Planung von Infrastrukturbauwerken, wie z. B. Eisenbahn- und U-Bahntunnel (BORRMANN et al. 2015). Die Schlüsseleigenschaft der prozeduralen Generierung ist, dass die Entitäten, ob Geometrie oder Textur, als Abfolge von Operationen dargestellt werden und nicht als statische Objekte. Die Modelle müssen nicht zwingend mit ihrer expliziten Geometrie abgespeichert werden, was ein speichereffizientes Arbeiten ermöglicht (KELLY & MCCABE 2006). Des Weiteren ist eine automatische Erzeugung verschiedener LOD möglich, da die konkrete Modellierungsgenauigkeit eingeschränkt werden kann (PARISH & MÜLLER 2001).

Die hier beschriebenen Methoden zur Erzeugung von 3D-Infrastrukturobjekten aus 2D-DLM und DHM setzen das Prinzip der Prozeduralen Modellierung auf zwei verschiedene Arten um: Für Brücken- und Tunnelbauwerke wird der in der Software CityEngine der Firma Esri implementierte und von MÜLLER et al. (2006) beschriebene Ansatz der Computer Generated Architecture (CGA)-Regeln verwendet, ein auf der Methode der Formgrammatik basierendes Verfahren. Hochspannungsleitungen werden hingegen mittels eines workflowbasierten Ansatzes erzeugt, wie er beispielsweise auf Basis der Feature Manipulation Engine (FME) der Firma Safe Software umgesetzt werden kann.

2.2 Erzeugung von Brücken- und Tunnelobjekten mittels CGA-Regeln

Die hier beschriebenen Methoden für die Erzeugung von 3D-Brücken- und Tunnelobjekte gehen von folgenden Quelldaten aus:

- Digitales Geländemodell (DGM),
- linienhafte 2D-Straßenobjekte, die neben der 2D-Vektorgeometrie der Straßenmittellachse ein 1D-lineares Referenzsystem aufweisen,
- punkthafte Objekte, die den Standort der Brücken bzw. Tunnel repräsentieren und mindestens folgende Sachinformationen aufweisen: Bauart der Brücke bzw. des Tunnels, Start- und Endmesswert bezogen auf das lineare Referenzsystem der Straßenobjekte.

Die Erzeugung der 3D-Modelle mithilfe von CGA-Regeln erfordert eine Datenvorverarbeitung. Die zweidimensionalen Vektordaten müssen an die Anforderungen und Besonderheiten der konkreten Erzeugung angepasst werden. Das bedeutet im Fall der Brücken und Tunnel, dass in einem ersten Schritt aus den oben genannten Quelldaten linienhafte Objekte erzeugt werden müssen, welche die Linienführung der Brücken beziehungsweise Tunnel in 2D beschreiben. Für die Start- und Endpunkte dieser Linien wird die Höhe aus dem DGM abgegriffen. Die Höhen für alle weiteren Punkte der Linien werden linear interpoliert.

Die eigentliche geometrische Modellierung erfolgt auf Basis dieser, in der vorgesehenen Bauwerksbreite gepufferten, Linienelemente. Diese Flächen, die sogenannten Primitive, werden in CGA-Regeln weiterverarbeitet um ein 3D-Modell zu erzeugen. Dabei werden geometrische Methoden wie Extrusion, Translation und Zerteilung angewendet.

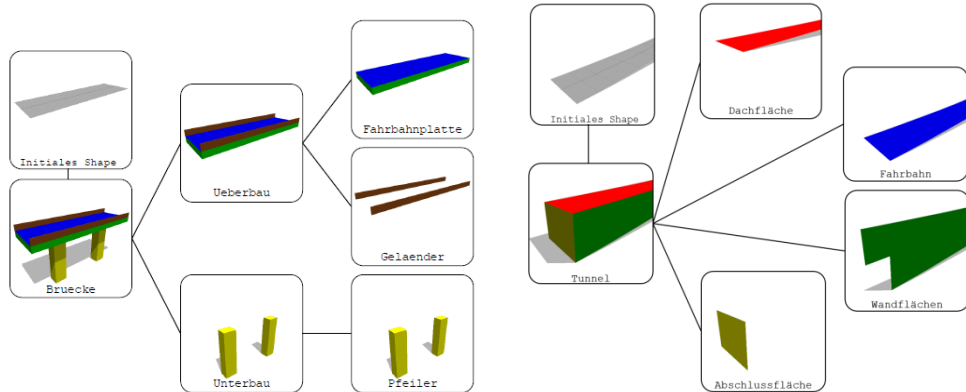


Abb. 2: Links: Hierarchischer Aufbau einer prozeduralen Brückenmodellierung (Konstruktionselemente und Begrenzungsflächen). Rechts: Hierarchischer Aufbau einer prozeduralen Tunnelmodellierung (Begrenzungsflächen).

Zudem können durch in Objektattributen enthaltene Sachinformationen individuelle Eigenschaften von Bauwerken, wie zum Beispiel die Brückenbauweise, bei der automatisierten Erzeugung berücksichtigt werden. So erfolgt die Modellierung der Brückenobjekte unter Nutzung der in Attributen gespeicherten Information zur Brückenbauweise in Anlehnung an die individuelle Konstruktionsweise für jede Bauweise, z. B. *Holztragwerkbrücke*, *Stahltragwerkbrücke*, *Bogentragwerkbrücke*, *Balkentragwerkbrücke* (siehe z. B. GEIBLER 2014) mit

einer eigenen CGA-Regel. Für die Brückenbauweise *Balkentragwerkbrücke* ist die CGA-Regel wie folgt aufgebaut: Die CGA-Regel weist eine Baumstruktur auf (vgl. Abbildung 2, linke Seite). Dabei bildet die Regel *Bruecke* das Wurzelement in der Hierarchie. Die weitere Unterteilung erfolgt anhand der Bauteile in die Äste *Ueberbau* mit den Blättern *Fahrbahnplatte* und *Gelaender* und *Unterbau* mit dem Blatt *Pfeiler*. Eine derartige hierarchische Untergliederung ist auch bei Tunnelbauwerken möglich. Hierbei können diese, zum Beispiel für das CityGML LOD2, in Begrenzungsflächen unterteilt werden (vgl. Abbildung 2, rechte Seite). Um die Funktionsweise der CGA-Regeln zu verdeutlichen, ist in Abbildung 3 ein Auszug einer CGA-Regel dargestellt. Diese ist verantwortlich für die Erzeugung des Unterbaus der Balkenbrücke gemäß Abbildung 2.

```

Unterbau --> Pfeiler

Pfeiler -->
case geometry.du(0,unitSpace)>6: Pfeiler2
else : NIL

Pfeiler2 -->
split(u, unitSpace, 0) { ~(Abstand/2) : NIL | 2.5 : split(v, unitSpace, 0) { ~2.5 :
NIL | 2: Pfeiler3 | ~2.5: NIL} | ~(Abstand/2) : NIL}*

Pfeiler3 -->
t(0,-1,0)
extrude(y, -elevation)

comp(f){
  bottom: color("#ffff00") x| # GELB für piers_Wall
  top: color("#ff00ff") x| # MAGENTA für piers_Ground
  front: color("#ffff00") x| # GELB für piers_Wall
  back: color("#ffff00") x| # GELB für piers_Wall
  left: color("#ffff00") x| # GELB für piers_Wall
  right: color("#ffff00") x # GELB für piers_Wall
}

```

Abb. 3: Ausschnitt einer CGA-Regel für Balkentragwerkbrücken.

Der Unterbau wird in der CGA-Regel unterteilt. Hierbei besteht der Unterbau aus dem Teil *Pfeiler*, welcher mehrere Pfeiler beinhalten kann. Diese Zuordnung wird durch die Regel *Unterbau* definiert, in der das zugrundeliegende Primitiv an die Regel *Pfeiler* übergeben wird. In der Regel *Pfeiler* wird zunächst geprüft, ob das Shape mindestens 6 m lang ist. Falls ja wird es an die Regel *Pfeiler2* übergeben. Darin wird das Shape quer zur Fahrtrichtung aufgeteilt um die Pfeilerposition unter der *Fahrbahnplatte* festzulegen. Konkret wird definiert, dass die Pfeiler um den Wert des Attributes *Abstand* voneinander entfernt sind. Des Weiteren wird definiert, dass die Pfeiler 2,5 m vom jeweiligen Brückenrand entfernt sind. Die resultierenden Pfeilergrundflächen werden der Regel *Pfeiler3* übergeben. In *Pfeiler3* werden die zuvor extrahierten Pfeilergrundflächen um 1 m in negative Z-Richtung verschoben sowie um das Attribut *elevation* in negative Z-Richtung extrudiert. In einem weiteren Schritt werden die Pfeiler in ihre Begrenzungsflächen unterteilt und diese wiederum eingefärbt. Danach liegen die Pfeiler als eingefärbte Volumenkörper vor.

Nach der Ausführung der Regeln entsteht je Brücke bzw. Tunnel ein einzelnes 3D-Modell, das die Attribute des jeweiligen Quell-Shapes enthält. Um aus den erzeugten 3D-Modellen

semantisch untergliederte Modelle bilden zu können, bedarf es jedoch mehr als nur der Übernahme der jeweiligen Objektattribute aus den Quelldaten. So ist es zum Beispiel sinnvoll und mit dem CityGML-Datenmodell möglich, Bauwerke in Konstruktionselemente und Begrenzungsflächen zu unterteilen, die selbst wieder Attribute aufweisen können. Eine Möglichkeit, diese Unterteilung vorzunehmen und damit Brücken- bzw. Tunnelobjekte semantisch und geometrisch kohärent als Aggregationen von Bauteilen bzw. Begrenzungsflächen aus den entstandenen 3D-Modellen zu rekonstruieren, ist es, in den CGA-Regeln Farbcodes für die jeweiligen Objektklassen einzuführen. In einem der prozeduralen Modellierung nachgelagerten Prozess, können die Geometrien dann den Farbcodes entsprechend zerlegt und entsprechende semantische Objekte erzeugt werden. Die eingefärbte Brücke in Abbildung 2 erlaubt zum Beispiel eine Einteilung in Konstruktionselemente (Blau, Grün und Rot für die Fahrbahnplatte; Gelb und Magenta für die Pfeiler sowie Braun für die Geländer) und Begrenzungsflächen (Blau für Fahrbahnflächen; Grün, Gelb und Braun für Wandflächen; Rot für Deckenflächen sowie Magenta für Bodenflächen). Der Tunnel in Abbildung 2 ermöglicht zum Beispiel nur eine Einteilung in Begrenzungsflächen (Rot für Dachflächen; Grün für Wandflächen; Blau für Fahrbahnflächen sowie Gelb für Abschlussflächen).

Die Integration von 3D-Modellen in Geländemodelle erfordert Anpassungen an den Geländemodellen. Es kann zum Beispiel bei der Integration von Brückenmodellen vorkommen, dass noch Strukturen im betreffenden DGM enthalten sind, die eigentlich zum Brückenbauwerk gehören. Ein möglicher Ansatz, um die Brückenkörper aus einem DGM zu entfernen, ist die Betrachtung des Brückenumfeldes. Hierbei werden zwei Linien parallel, links und rechts der Brückenmittelachse erzeugt. Entlang der Linien werden dann die Höheninformationen des DGM gespeichert. Die Höhen der Linien, beziehungsweise die Knotenpunkte dieser, werden dann verglichen und einander angepasst. Die korrigierten Seitenlinien fließen dann als Bruchkanten in die Neuberechnung des DGM ein. Dies wird nötig, weil der Brückenkörper zwischen den Linien zuvor gelöscht wird (vgl. Abb. 4).

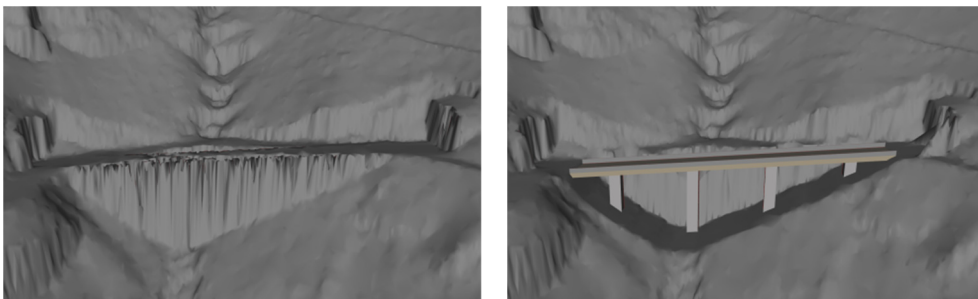


Abb. 4: DGM-Korrektur mit Ansatz 1. Links: Original DGM mit enthaltenem Brückenkörper. Rechts: Korrigiertes DGM ohne Brückenkörper, aber mit Brückenmodell.

Ein weiterer Ansatz basiert auf der klassifizierten Punktwolke, wobei Brückenpunkte explizit markiert sein müssen. Hierbei werden zunächst die Klassen Brücke und Gewässer extrahiert. Alle Punkte der Klasse Brücke können für die weitere Verarbeitung entfernt werden. Die Punkte der Klasse Gewässer, vor und nach jeder Brücke, werden dann verbunden. Diese verbundenen Punkte dienen in der Neuberechnung des DGM wiederum als Bruchkanten. Mit

dieser Methode können Flussbetten genauer wiederhergestellt werden. Neben den Brückenmodellen spielen auch Tunnelkörper bei der DGM-Korrektur eine Rolle. Hierbei sollte das DGM an den Portalflächen, beziehungsweise an den Durchstoßflächen, überarbeitet werden. Die Korrektur ist notwendig, um eine „freie Fahrt“ durch die Tunnel zu gewährleisten. Weitere Details können ESCH (2016) entnommen werden.

2.3 Workflowbasierte Erzeugung von Hochspannungsleitungen

Im Folgenden wird ein workflowbasiertes Verfahren für die Erzeugung von Hochspannungsleitungen und -masten auf Basis von 2D-DLM und DGM vorgestellt. Das Verfahren setzt voraus, dass in einem 2D-DLM linienhafte Objekte existieren, welche die Achsen der Leitungstrassen repräsentieren, und punkthafte Objekte, die Maststandorte darstellen. Als Sachinformationen sollten die Anzahl der Leiterseile bei den linienhaften und die Bauart und relative Masthöhe bei den punkthafte Objekten enthalten sein. Fehlen diese Informationen, so können sie z. B. aus der Literatur entnommen und damit grob geschätzt oder manuell aus weiteren Datenquellen, wie Schrägluftaufnahmen oder klassifizierten LIDAR-Punktwolken, extrahiert werden.

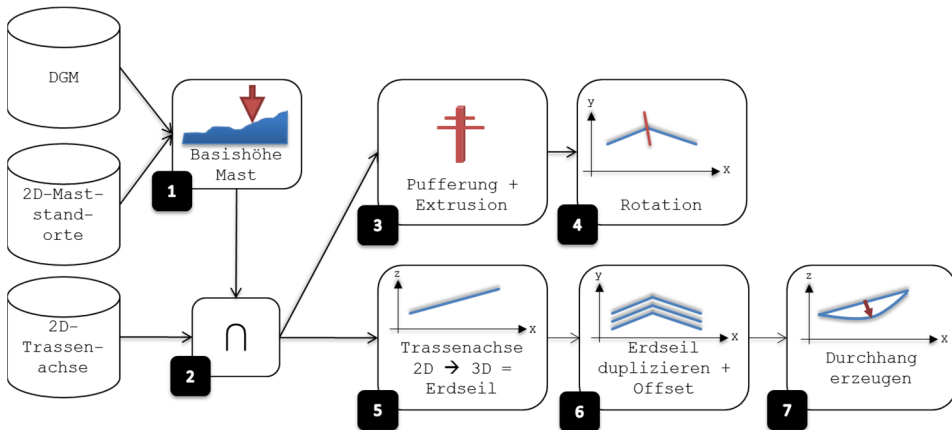


Abb. 5: Workflow für die Erzeugung der Objektgeometrie von Leitungsmasten (Schritte 1 bis 4) und Leitungsseilen (Schritte 1, 2 und 5-7).

Die Erzeugung der Objektgeometrie findet vollautomatisch in folgenden Schritten statt (siehe auch Abbildung 5):

- (1) Für die Erzeugung der Mastgeometrie werden in einem ersten Schritt für die punkthafte Objekte aus dem 2D-DLM die den Koordinaten der Punkte entsprechenden Höhenwerte aus dem DGM extrahiert. Sowohl die Bodenhöhe am Maststandort, als auch die absolute Masthöhe (Summe aus Bodenhöhe und relativer Masthöhe) werden als Attribute bei den punkthafte Objekten gespeichert. Aus den 2D-Punktobjekten und der in einem Attribut gespeicherten Bodenhöhe werden 3D-Punkte erzeugt.
- (2) Sodann werden durch geometrische Überlagerung der Linien- und Punktobjekte die Sachinformationen der Leitungen an die Masten übertragen und umgekehrt.
- (3) Anschließend werden die Punkte mit einem dem jeweiligen Masttyp entsprechenden Wert als quadratische Grundform gepuffert. Um eine Geometrie für den Mastschaft zu

erstellen, werden die entstandenen Quadrate bis zur absoluten Masthöhe extrudiert. In Abhängigkeit der Anzahl der Leiterseile und des Masttyps werden die Masttraversen als horizontale Linien mit entsprechender Länge und in der entsprechenden Höhe erzeugt. Die Linien werden mit einem Standardwert in 3D gepuffert, wodurch horizontale Zylinder entstehen, die mit der Geometrie des Mastschafts aggregiert werden.

- (4) Die aggregierten Geometrien werden im nächsten Schritt so um die Z-Achse gedreht, dass die Traversen in Richtung der Winkelhalbierenden zwischen den beiden Segmenten der Trassenachse zeigen, die am jeweiligen Mast zusammenstoßen.
- (5) Das über die Mastspitzen laufende Erdseil und die an den Traversen hängenden Leiterseile werden aus den linienhaften 2D-Objekten erzeugt, welche die Achsen der jeweiligen Trassen repräsentieren, wobei für den horizontalen Verlauf des Erdseils die 2D-Geometrie der Trassenachse direkt verwendet werden kann. Um den Höhenverlauf des Erdseils zu bestimmen, wird für die Eckpunkte der Linie des entsprechenden 2D-Linienzugs die absolute Höhe der entsprechenden Mastpunkte übernommen.
- (6) Die Leiterseile werden, ausgehend vom Erdseil, mit für die Bauart der Masten und der Anzahl der Leiterseile typischem horizontalen und vertikalen Versatz als Parallelen zum Erdseil erzeugt.
- (7) Um einen realistischen Durchhang der Seile anzunähern, werden die Liniengeometrien in kurze Segmente (z. B. 5 m) zerlegt. Für jeden Anfangs- und Endpunkt eines Segments kann sodann der Durchhang berechnet werden. Dies geschieht unter der Annahme eines genormten Seils und einer typischen Leiterzugkraft mit folgender Formel nach KIEBLING (2001):

$$f = \frac{H}{m_c g} \left[\cosh\left(\frac{m_c g \cdot a}{2H}\right) - \cosh\left(\frac{m_c g \cdot x}{H}\right) \right]$$

mit

f	lotrechter Durchhang
H	Leiterzugkraft
$m_c g$	Seilgewichtskraft
a	Spannweite
x	Abszisse des Seilkurvenscheitels (zur Vereinfachung wird von einer symmetrischen Seilkurve ausgegangen, d. h. von gleich hohen Aufhängepunkten)

Auf der Grundlage des CityGML-Datenmodells kann eine Hochspannungsleitung wie folgt repräsentiert werden:

- Jeder Mast wird auf ein *CityFurniture*-Objekt abgebildet. Wegen der relativ groben Annäherung an die wahre Form des Mastes und der Entstehung durch Extrusion kann sie als LOD2-Geometrie bezeichnet werden. Für höhere LODs können prototypische Geometrieobjekte verwendet werden.
- Da der CityGML-Standard keine spezielle Klasse für die Repräsentation von Leitungen vorsieht, werden die Seile semantisch als generische Stadtobjekte (Klasse *GenericCityObject*) modelliert. Die verschiedenen Seile werden geometrisch durch *MultiLineString*-Objekte repräsentiert.

Im letzten Schritt des Workflows werden die erzeugten Objekte auf die genannten CityGML-Objekte semantisch und geometrisch abgebildet. Alle Attribute der Quelldaten können entweder mittels Wertzuweisungslisten auf die CityGML-Attribute *class*, *function* und *usage* oder auf generische CityGML-Attribute abgebildet werden. Um auch Clients, die zwar eine

3D-Visualisierung, aber die dritte Dimension nicht bei räumlichen Selektionen unterstützen, eine Abfrage der Art „Selektiere alle Objekte oberhalb von 500 Metern Höhe“ zu ermöglichen, wird bei jedem Objekt die minimale und maximale absolute Höhe als Attribut gespeichert.

3 Ergebnisse

3.1 Ein semantisches 3D-Landschaftsmodell für Vorarlberg

Die oben beschriebenen prozeduralen Methoden wurden auf der Basis der kommerziellen Softwareprodukte FME und CityEngine implementiert und auf ein 175 km² großes Testgebiet im Land Vorarlberg angewendet. Die Abbildungen 6 und 7 zeigen Beispiele der erzeugten Brücken-, Tunnel-, Mast- und Leitungsobjekte des Vorarlberger 3D-Landschaftsmodells (VoDLM3D).

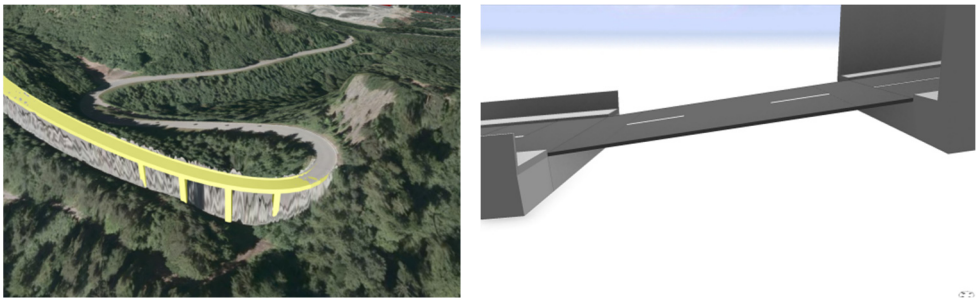


Abb. 6: Links: automatisch erzeugtes LOD2-Brückenmodell mit DGM und digitalem Orthophoto. Rechts: automatisch erzeugte, texturierte Modelle für Brücke, Straße und Tunnel, exemplarisch im LOD3.

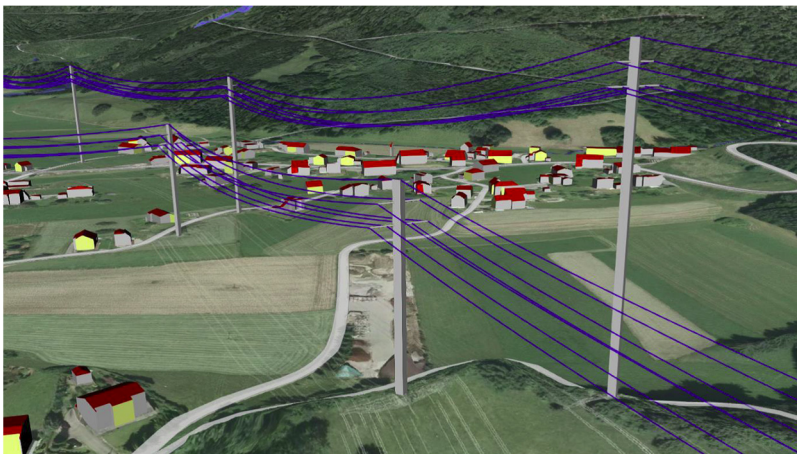


Abb. 7: Leitungsmasten und -seile, automatisch erzeugt aus 2D-DLM-Daten und DGM des Landes Vorarlberg. Visualisierung im 3D-Web-Client der TUM.

Zusätzlich zu den hier beschriebenen Objektarten wurden mittels workflowbasierter Methoden weitere 3D- bzw. 2.5D-Infrastrukturobjekte erzeugt. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die erzeugten Objekte.

Tabelle 1: 3D- bzw. 2.5D-Infrastrukturobjekte im VoDLM3D

Objektart	CityGML Feature Type	Geometrische Repräsentation
Brücken	Bridge, BridgeConstructionElement, Roof-, Wall- und GroundSurface	lod2Geometry, lod2MultiSurface
Tunnel	Tunnel, Roof-, Wall-, Ground- und ClosureSurface	lod2Solid, lod2Multisurface
Forstwege	Road	lod1MultiSurface
Güterwege	Road	lod1MultiSurface
Landesstraßen	Road	lod0Network, lod1MultiSurface
Ortsstraßen	Road	lod0Network, lod1MultiSurface
Skipisten	Track	lod0Network
Seilbahnen: Stützen	CityFurniture	lod1Geometry
Seilbahnen: Seile	TransportationComplex	lod0Network
Hochspannungsleitungen: Masten	CityFurniture	lod2Geometry
Hochspannungsleitungen: Seile	GenericCityObject	lod2Geometry

Die erzeugten CityGML-Daten können mittels des 3D-Web-Clients der Technischen Universität München (TUM) (YAO et al. 2016) exploriert werden. Hierzu wurden sie mittels der Werkzeuge der 3DCityDB¹ in eine ORACLE-Datenbank importiert und in KML- bzw. gITF-Dateien sowie Google-Spreadsheet-Tabellen bzw. Google-Fusion-Tables umgewandelt.

3.2 Diskussion

Mit den oben beschriebenen prozeduralen Methoden können vollautomatisch aus DGM und 2D-DLM-Daten 3D-Infrastrukturobjekte erzeugt werden. Dies gilt gleichermaßen für die mittels der workflowbasierten Methode generierten Hochspannungsleitungen, wie für die mittels CGA-Regeln erzeugten Brücken und Tunnel. Der Detaillierungsgrad der Objekte entspricht dabei dem CityGML LOD 2, wobei für eine realistische Formgebung jeweils aus der Literatur entnommene Informationen zur Konstruktion der jeweiligen Objekte berücksichtigt wurden (z. B. Durchhang der Seile, Aufbau der Brückenobjekte). Vergleicht man den Implementierungsaufwand für die Erzeugung semantischer 3D-Objekte im LOD2 auf der Basis

¹ <http://www.3dcitydb.org>

der genutzten Softwareprodukte FME (workflowbasierte Methode) und CityEngine (CGA-Regeln), so kann folgendes festgehalten werden: Die workflowbasierte Methode hat ihre Stärken in der Erzeugung der semantischen Struktur (z. B. Zerlegung komplexer Objekte als Aggregation von Objektteilen). Die Werkzeuge zur Manipulation sind für den betrachteten Detaillierungsgrad ausreichend. Die Methode der CGA-Regeln ist komplementär dazu: die Erzeugung semantisch stark differenzierter Objekte ist umständlich, da die CGA-Regeln auf die Erzeugung von Geometrie und Erscheinung (Farben, Texturen) ausgerichtet sind. Die Erzeugung semantischer Objekthierarchien wurde in den hier beschriebenen Arbeiten mittels nachgelagerter Verarbeitungsschritte in FME durchgeführt. Die Stärken der Methode der CGA-Regeln liegen in der Erzeugung geometrisch detaillierter Modelle, was sich erst bei der automatischen Erzeugung von Objekten mit einem höheren Detaillierungsgrad als LOD2 zeigt (vgl. Abb. 6, rechte Seite).

Unabhängig von der Wahl der konkreten prozeduralen Methode könnte eine weitere Steigerung der Realitätstreue der Objekte erreicht werden, wenn die 2D-DLM-Daten bereits mehr Informationen enthalten würden. Beispielsweise könnte bei den 2D-Tunnelobjekten Informationen zur Bauart und des damit zusammenhängenden Tunnelprofils sowie Informationen zum Längsprofil erhoben werden. So könnte der Höhenverlauf im Berg z. B. durch die Berücksichtigung eines dachförmigen Längsprofils mit Angaben zur beiderseitigen Neigung realitätsnäher gestaltet werden, als dies bei der momentanen Lösung mit linearer Interpolation zwischen Start- und Endpunkt der Fall ist. Bei Brücken sollten beispielsweise, neben Informationen wie Lage und Höhe der Straßenmittelachse, Pfeiler und sonstiger elementarer Bauteile, auch Informationen zur Ausrichtung von Bauteilen vorhanden sein.

Dank

Die Autoren danken dem Landesamt für Vermessung und Geoinformation (Vorarlberg) für die Förderung des Projekts VoDLM3D sowie Frau Caroline Marx, Herrn Zhihang Yao und der Firma virtualCITYSYSTEMS für ihre Beiträge zu diesem Projekt.

Literatur

- BORRMANN, A., KOLBE, T. H., DONAUBAUER, A., STEUER, H., JUBIERRE, J. R. & FLURL, M. (2015), Multi-scale geometric-semantic modeling of shield tunnels for GIS and BIM applications. In: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30 (4), 263-281.
- BRENNER, C. (2000), Dreidimensionale Gebäuderekonstruktion aus digitalen Oberflächenmodellen und Grundrissen. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 530, München.
- ESCH, R. (2016), Prozedurale Generierung von 3D-Sträßennetzwerken unter Berücksichtigung von Brücken und Tunneln am Beispiel Vorarlberg. Masterarbeit, Lehrstuhl für Geoinformatik, Technische Universität München.
- GEIBLER, K. (2014), *Handbuch Brückenbau: Entwurf, Konstruktion, Berechnung, Bewertung und Ertüchtigung*. Ernst & Sohn, Berlin.
- GRÖGER, G., KOLBE, T. H., NAGEL, C. & HÄFELE, K.-H. (2012), *OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, Version 2.0.0*. Open Geospatial Consortium.

- KELLY, G. & MCCABE, H. (2006), A survey of procedural techniques for city generation. In: Institute of Technology Blanchardstown Journal, 14, 87-130.
- KIEBLING, F., NEFZGER, P. & KAJINTZYK, U. (2001), Freileitungen – Planung, Berechnung, Ausführung. Springer, Berlin/Heidelberg.
- KOCH, A. (2006), Semantische Integration von zweidimensionalen GIS-Daten und Digitalen Geländemodellen. Dissertation, Universität Hannover.
- 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. In: zfv, 6/2012, 340-349.
- MÜLLER, P., WONKA, P., HAEGLER, S., ULMER, A. & VAN GOOL, L. (2006), Procedural Modeling of Buildings. In: ACM SIGGRAPH 2006 Papers, 614-623.
- PARISH, Y. I. & MÜLLER, P. (2001), Procedural modeling of cities. In: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM, 301-308.
- SCHILLING, A. (2014), 3D Spatial Data Infrastructures for Web-Based Visualization. Dissertation an der Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultät der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
- SMELIK, R. M., TUTENEL, T., BIDARRA, R. & BENES, B. (2014), A survey on procedural modelling for virtual worlds. In: Computer Graphics Forum, 33 (6), 31-50.
- YAO, Z., CHATURVEDI, K. & KOLBE, T. H. (2016), Browser-basierte Visualisierung großer 3D-Stadtmodelle durch die Erweiterung von Cesium Web Globe. In: Kolbe, T. H., Bill, R. & Donaubaue, A. (Hrsg.): Geoinformationssysteme 2016 – Beiträge zur 3. Münchner GI-Runde. Wichmann, Berlin/Offenbach, 77-90.