

# Detallierte Repräsentation des Straßenraums in 3D Stadtmodellen

CHRISTOF BEIL<sup>1</sup> & THOMAS H. KOLBE<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Dreidimensionale semantische Stadtmodelle werden immer häufiger für Simulationen und Analysen urbaner Räume verwendet. Bislang liegt der Fokus dabei jedoch stark auf Gebäudemodellen. Für zahlreiche Anwendungsfälle wären allerdings auch 3D Modelle des Straßenraums von großem Nutzen, jedoch gibt es hierfür nur wenige Richtlinien. Relevante Standards wie GDF oder OpenDRIVE werden daher analysiert und dabei wird festgestellt, dass sich diese in erster Linie auf linienhafte oder parametrische Repräsentationen konzentrieren. Daraufhin werden 16 potentielle Anwendungen vorgestellt und der Nutzen, den diese aus einer flächenhaften 3D-Straßenraummodellierung ziehen würden, diskutiert. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wird das Transportation Datenmodell des OGC Standards CityGML2.0 hinsichtlich Verbesserungs- und Erweiterungsmöglichkeiten untersucht. Im Zuge dessen wird ein CityGML konformes Modellierungskonzept für mehrere Detailstufen (LoD) vorgestellt. Abschließend wird dieses Konzept auf Grundlage frei verfügbarer Daten (Open Data) für ein semantisches 3D-Stadtmodell von New York City implementiert. Als Ergebnis werden so über 500.000 Straßenraumobjekte vollautomatisch erzeugt. Diese umfassen u.a. Straßenflächen, erhöhte Gehwege, Parkplatzflächen und Verkehrsinseln, welche allesamt mit einer Vielzahl thematischer Attribute angereichert sowie texturiert sind. Das Modell wird zudem mit Hilfe des Open Source „WebGL Virtual Globe Cesium“ visualisiert und so für interaktive Attributabfragen und Analysen zugänglich gemacht.*

## 1 Motivation und Problemstellung

Im Rahmen mehrerer Projekte und Masterarbeiten am Lehrstuhl für Geoinformatik der Technischen Universität München wurde ein semantisches Stadtmodell für New York City im Level of Detail 1 (LoD1) erstellt. Hauptaugenmerk lag dabei im ersten Schritt auf der semantischen und weniger auf der geometrischen Genauigkeit des Modells. Dieser Artikel beschreibt die Untersuchungen und erzielten Ergebnisse der Masterarbeit des ersten Autors, die sich aus einem konzeptionellen und einem praktischen Teil zusammensetzten. Zunächst sollen Möglichkeiten zur detaillierten Repräsentation und Modellierung des Straßenraums erarbeitet werden. Hierzu sind verwandte Arbeiten und Standards zu untersuchen und zu diskutieren. Anschließend sollen Anwendungsfelder eruiert werden, die von detaillierten Straßenraummodellen profitieren würden. Dabei soll auch auf Anforderungen an die Art der Modellierung eingegangen werden. Konzeptionelle Überlegungen, z.B. wie der Straßenraum sinnvoll in Einzelobjekte zerteilt oder wie mit Kreuzungsbereichen umgegangen werden könnte, sollen daraufhin zu Verbesserungsvorschlägen des für 3D-Stadtmodelle verwendeten Standards CityGML führen. Abschließend sollen ausgewählte Teile des Konzepts anhand des erwähnten Stadtmodells von New York City auf Grundla-

---

<sup>1</sup> Technische Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik, Arcisstraße 21, D-80333 München, E-Mail: christof.beil@tum.de

ge frei verfügbarer Daten möglichst automatisiert umgesetzt werden. Ergebnis soll ein semantisch sowie geometrisch stark verbessertes Straßen- und Stadtmodell sein.

## 2 Methodik

Zunächst wird der OGC Standard CityGML sowie verwandte Standards, welche im Bereich der Straßenmodellierung relevant sind, vorgestellt und untersucht. Im Anschluss daran werden insgesamt 16 potentielle Anwendungsfelder, die von detaillierten Straßenraummodellen profitieren würden, erarbeitet. Im Zuge dessen werden auch die jeweiligen Anforderungen der einzelnen Anwendungen an solche Modelle analysiert und diskutiert sowie hierfür benötigte Objektklassen und Attribute benannt. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend wird dann ein konzeptionelles Modell zur Straßenmodellierung erstellt. Dabei wird das aktuell gültige Transportation Datenmodell des CityGML2.0-Standards hinsichtlich möglicher Defizite untersucht sowie Vorschläge für dessen Erweiterung und Verbesserung gemacht. Dieses Konzept wird abschließend auf Grundlage frei verfügbarer Daten für das gesamte Stadtgebiet von New York City automatisiert umgesetzt.

### 2.1 Untersuchung verwandter Arbeiten, Standards und Richtlinien

Zu Beginn werden einige Standards und Richtlinien, die sich mit der Straßenraummodellierung befassen, vorgestellt und analysiert. Es zeigt sich dabei, dass Straßen in den meisten Standards durch linienhafte oder parametrische Repräsentationen dargestellt werden. Zudem wird das Transportation Modell von CityGML vorgestellt. Die teilweise sehr umfangreichen Vorgaben der verwandten Standards enthalten zahlreiche Konzepte und Ideen, die in der Folge als Grundlage für eigene Weiterentwicklungen des CityGML Transportation Modells dienen. Folgende Standards und Richtlinien werden ausführlich untersucht: **City Geography Markup Language (CityGML)** ist ein XML-basiertes Format zur Repräsentation, Speicherung und zum Austausch semantischer 3D-Stadt- und Landschaftsmodelle. Der derzeit gültige Standard CityGML2.0 wurde im Jahr 2012 vom Open Geospatial Consortium (OGC) verabschiedet. Darin werden zahlreiche Klassen und Beziehungen unterschiedlicher thematischer Objekte im Hinblick auf deren räumlichen, semantischen und visuellen Eigenschaften in insgesamt 5 Detailgraden (LoD) definiert (GRÖGER et al. 2012). Zur Modellierung des Straßenraums steht das sogenannte Transportation Datenmodell zur Verfügung, welches den Straßenraum in LoD0 durch Liniennetze und ab LoD1 durch flächenhafte Repräsentationen modelliert. Es stehen dabei vier thematische Oberklassen (Road, Square, Track und Railway) zur Verfügung. Ab LoD2 kann der Straßenraum zudem in thematische Unterklassen (TrafficArea und AuxiliaryTrafficArea) feiner untergliedert werden. **Geographic Data Files (GDF)** ist ein Standard, der vor allem im Bereich der Fahrzeugnavigation weit verbreitet ist. Objekte werden darin konzeptionell in drei Detailgrade (Level-0, Level-1 und Level-2) unterteilt. Der Straßenraum kann dabei durch ein sogenanntes „Road Network“ repräsentiert werden (ISO 14825, 2011). Das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen stellt Richtlinien zur einheitlichen Aufnahme, Bearbeitung und Vorhaltung der Merkmale von Straßen bereit. Hierin wird der Straßenraum durch die **Anweisung Straßeninformationsbank (ASB)** aus technischer und durch den **Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen (OKSTRA)** aus fachlicher Sicht beschrieben (BAST 2016; BMVI 2014). **OpenDRIVE** wird als offenes Datenformat häufig für Anwendungen im Bereich von Fahrsimula-

tionen verwendet. Straßen werden darin durch eine Referenzlinie repräsentiert, welche sich aus mehreren Abschnitten geometrischer Primitive, wie Linien, Kurven oder Klothoiden, zusammensetzt. Relativ zu dieser Referenzlinie werden Straßeneigenschaften, wie z.B. Fahrspuranzahl parametrisch gespeichert (DUPUIS et al. 2015). Eine ausführliche Diskussion kann in BEIL (2017) nachgelesen werden.

## 2.2 Anwendungsperspektiven für Straßenraummodelle

Im folgenden Abschnitt wird untersucht, welchen Nutzen eine detaillierte Repräsentation des Straßenraums für unterschiedliche Anwendungen mit sich bringen würde und welche Anforderungen diese an die Art der Modellierung stellen. Insgesamt werden 16 Anwendungsfelder betrachtet, welche von detaillierten Modellen des Straßenraums und insbesondere flächenhaften 3D-Repräsentationen profitieren würden. Jede Anwendung und der jeweilige Mehrwert, den diese aus Straßenmodellen ziehen würden, wird unter Angabe einschlägiger Quellen vorgestellt. Die beschriebenen Anwendungen stellen Anforderungen an die Art der Modellierung, welche sich in einzelne Kategorien zusammenfassen lassen. Als Anforderungen werden Lagegenauigkeit, thematische Genauigkeit, Aktualität, zusätzliche Attribute, Zeit als 4. Dimension sowie eine ansprechende Visualisierung definiert und deren jeweilige Wichtigkeit mit Hilfe der in Tabelle 1 dargestellten Punktetabelle zusammengefasst. Weiterhin werden benötigte Objektklassen, Attribute und Geometrien recherchiert und diskutiert, indem diese benannt werden, untersucht wird, ob sie bereits im aktuellen CityGML2.0 Standard enthalten sind und falls dies nicht der Fall ist, aufgezeigt wird, wie diese integriert werden könnten.

Tab. 1: Anforderungen an Straßenraummodelle für die jeweilige Anwendung (BEIL 2017)

Anwendung	Lagegenauigkeit	Thematische Genauigkeit	Aktualität	Zusätzl. Attribute	Zeit	Visualisierung
1) Flächennutzung	●●●●	○●●●	●●●●	○●●●	●●●●	○●●●
2) Hitzeeinwirkung	○●●●	○●●●	○●●●	●●●●	○●●●	○●●●
3) Kommunale Aufgaben	○●●●	●●●●	○●●●	●●●●	○●●●	○●●●
4) Lärmkartierung	○●●●	○●●●	○●●●	●●●●	○●●●	○●●●
5) Verkehrssimulationen	○●●●	○●●●	○●●●	○●●●	●●●●	○●●●
6) Fahrdynamik	○●●●	○●●●	○●●●	●●●●	○●●●	○●●●
7) Autonomes Fahren	●●●●	●●●●	●●●●	○●●●	○●●●	○●●●
8) Fahrtraining	○●●●	●●●●	○●●●	○●●●	○●●●	●●●●
9) Beschilderung	○●●●	○●●●	●●●●	○●●●	○●●●	○●●●
10) Instandhaltung	○●●●	○●●●	●●●●	●●●●	○●●●	○●●●
11) Belastbarkeit	●●●●	○●●●	●●●●	●●●●	○●●●	○●●●
12) Navigation	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	○●●●	○●●●
13) Notfallplanung	●●●●	○●●●	●●●●	●●●●	○●●●	○●●●
14) Feinstaubbelastung	○●●●	○●●●	○●●●	●●●●	●●●●	○●●●
15) Aquaplaning	○●●●	○●●●	○●●●	●●●●	○●●●	○●●●
16) Lichtraumprofile	●●●●	○●●●	●●●●	○●●●	○●●●	○●●●

Legende: ●●●● sehr wichtig, ○●●● wichtig, ○●●● neutral, ○●●● unwichtig

Digitale 3D-Stadtmodelle können als Grundlage für Stadtplanungen und Landmanagement dienen (ROSS 2010). Neben Gebäuden wird der urbane Raum hauptsächlich durch Straßen und Verkehrswege geprägt. Digitale Simulationen unterschiedlicher Szenarien können dabei vor allem im Bereich von Straßenplanungen zur Aufwands-, Kosten- und Nutzenanalyse verwendet werden. In diesem Zusammenhang können auch einzelne Großbauprojekte wie Brücken oder Autobahnen digital konzipiert werden. Die 3D-Visualisierung solcher Projekte kann zur frühzeitigen

Bürgerbeteiligung genutzt und so helfen, sachlichere Auseinandersetzungen zu führen. Für Kommunen besteht die gemeindliche Beleuchtungs-, Reinigungs-, Räum- und Streupflicht. Detaillierte Straßenraummodelle können Gemeinden bei der kostengünstigen und effektiven Wahrnehmung dieser Pflichten unterstützen. Dabei stellt auch die Schadenskartierung und Instandhaltung von Straßen einen beachtlichen Kostenpunkt dar. Straßenflächen eines digitalen Modells können mit weiteren Informationen, zum Beispiel über den Straßenzustand, kombiniert werden und so Aussagen über zu erwartende Reparaturkosten getroffen werden. Weiterhin können vielfältige räumliche Analysen wie etwa Solarpotential- oder Sichtbarkeitsanalysen durchgeführt werden. So können zum Beispiel lokale Hitzeinseln oder optimale Schildstandorte ermittelt werden. Weitere Anwendungsgebiete kommen aus der Automobilindustrie. Die Kenntnis über den exakten Verlauf von Straßen sowie deren Fahrbahnträger ist interessant für den wachsenden Bereich des autonomen Fahrens. Informationen über Straßenlängen und Anzahl an Fahrbahnen kann zudem von Fahrassistenzsystemen bei der Unterstützung des Fahrers bei Überholvorgängen verwendet werden. RANDT et al. (2007) beschreiben wie virtuelle 3D-Landschaftsmodelle für Fahrsimulatoren und Training von Notfallsituationen für Einsatzkräfte dienen können. Ein weiteres Anwendungsfeld sind Fahrdynamiksimulationen bei der Fahrzeugentwicklung (Butz et al. 2004). Auf alle weiteren in Tabelle 1 aufgelisteten potentiellen Anwendungsfelder sowie deren jeweilige Anforderungen an die Art der Straßenraummodellierung wird in BEIL (2017) ausführlich eingegangen.

### 2.3 Konzeptionelle Modellierung des Straßenraums mit CityGML

Ein Konzept zur CityGML konformen Repräsentation des Straßenraums wird auf der Basis von vier Säulen erarbeitet. Diese sind der momentan gültige OGC Standard CityGML2.0, der vor allem im Bereich des Transportation Datenmodells eingehend untersucht wird, relevante Standards im Bereich der Straßenmodellierung, Anforderungen an die Art der Modellierung aus Anwendersicht sowie die zur späteren Umsetzung verfügbaren Daten. Im Zuge der Konzepterarbeitung werden u.a. zahlreiche realitätsnahe Szenarien, wie Einfahrten, Kreisverkehre, Kreuzungen, Überführungen oder Straßengabelungen schematisch modelliert und beispielsweise festgelegt, wie diese in CityGML LoD0, LoD1 oder LoD2-4 modelliert werden sollten. Hierzu macht der momentane Standard nur vage oder unzureichende Angaben. Diese Defizite werden aufgezeigt und Lösungen präsentiert.

#### 2.3.1 Defizite des aktuellen Transportation Datenmodells in CityGML2.0

Das Transportation-Modell von CityGML stellt in erster Linie einen einheitlichen Rahmen zur konzeptionellen Modellierung des Straßenraums dar und soll bestehende Standards wie beispielsweise GDF ergänzen aber nicht ablösen. Dennoch lassen sich einige Schwächen identifizieren. Es ist unklar welche Achse einer Straße (Fahrbahn oder Fahrspur) zur Modellierung in LoD0 verwendet werden soll. Weiterhin werden linienhafte Gehwegs-Repräsentationen nicht berücksichtigt. Road Objekte können ab LoD1 flächenhaft durch *MultiSurface* Geometrien modelliert werden. Es ist jedoch nicht klar definiert, welche Objekte des Straßenraums dabei zu berücksichtigen sind. Ob beispielsweise Gehwege hierbei mit einzuschließen sind, wird nicht festgelegt. Ein gravierendes Problem des gültigen Standards ist die fehlende Definition von Segmenten oder Abschnitten, in die ein Straßennetzwerk unterteilt sein könnte. Bislang ist es

möglich alle Straßenraumobjekte einer ganzen Stadt lediglich einem einzigen *Road* Objekt zuzuweisen. Zudem werden bislang Kreuzungsbereiche oder Kreisverkehre nicht explizit repräsentiert. Dies führt zu Unklarheiten in Bereichen in denen sich mehrere Straßen denselben Kreuzungsbereich teilen. Geometrische Feinheiten wie Gullydeckel oder Schlaglöcher werden bislang nicht berücksichtigt. Weiterhin ist die Definition der Klasse *Square* ungenau.

### 2.3.2 Datenmodell des weiterentwickelten Transportation Datenmodells

Abbildung 1 zeigt das UML-Diagramm eines weiterentwickelten CityGML Transportation Modells. Die darin enthaltenen Neuerungen und Weiterentwicklungen werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

### 2.3.3 Übergang zu vier Levels of Detail

LÖWNER et al. (2016) schlagen ein neues LoD Konzept für CityGML mit lediglich vier Detailgraden vor. Dieser Idee folgend wird vorgeschlagen auch das Transportation Modell auf LoD0 bis LoD3 zu beschränken. Der linke Teil von Abbildung 2 zeigt ein „reales“ Straßenstück mit unterschiedlichen thematischen Bestandteilen wie Fahrbahnen oder Gehwegen. In LoD1 sollte die gesamte Breite der Straße, inklusive der Gehwege, als eine Fläche repräsentiert werden. Eine detailliertere Aufteilung in *TrafficSpaces* und *AuxiliaryTrafficSpaces* wird ab LoD2 möglich. In LoD3 sollen zusätzlich geometrische Feinheiten wie Gullydeckel oder Schlaglöcher modelliert werden können. Diese Art der Repräsentation, mit feiner werdender thematischer Einteilung von Objekten in höheren LoD Stufen, ist sehr ähnlich zur Gebäudemodellierung in CityGML. Zusätzlich zu flächenhaften Repräsentationen zeigt der rechte Teil von Abbildung 2 welche Achsen für linienhafte Modellierungen verwendet werden sollten. Im Gegensatz zum bisherigen Standard sollen Linienrepräsentationen in allen LoDs möglich werden. Solange Fahrbahnen nicht mehrere Meter voneinander getrennt verlaufen, sollen diese in LoD0 und LoD1 durch eine Mittelachsenlinie modelliert werden. Ab LoD1 ist sowohl eine linien- als auch eine flächenhafte Repräsentation des Straßenraums möglich. Zusätzlich zur Straßenmittelachse können ab LoD2 auch Gehwege durch Linien modelliert werden. Dies ist speziell für Fußgängernavigationsanwendungen relevant. In LoD3 kann schlussendlich jede einzelne Fahrspur durch eine eigene Linie repräsentiert werden.

Neu ist im vorgestellten Datenmodell zudem die Möglichkeit auch Löcher in der Straßenoberfläche, also zum Beispiel Schlaglöcher (*RoadwayDamage*), Abflüsse (*Drain*) oder auch Gullydeckel (*Manhole*), explizit modellieren zu können. Weiterhin wird eine eigene Klasse für Lichtraumprofile (*ClearanceSpace*) ab LoD2 vorgeschlagen, welche durch Volumenkörper modelliert werden sollen.

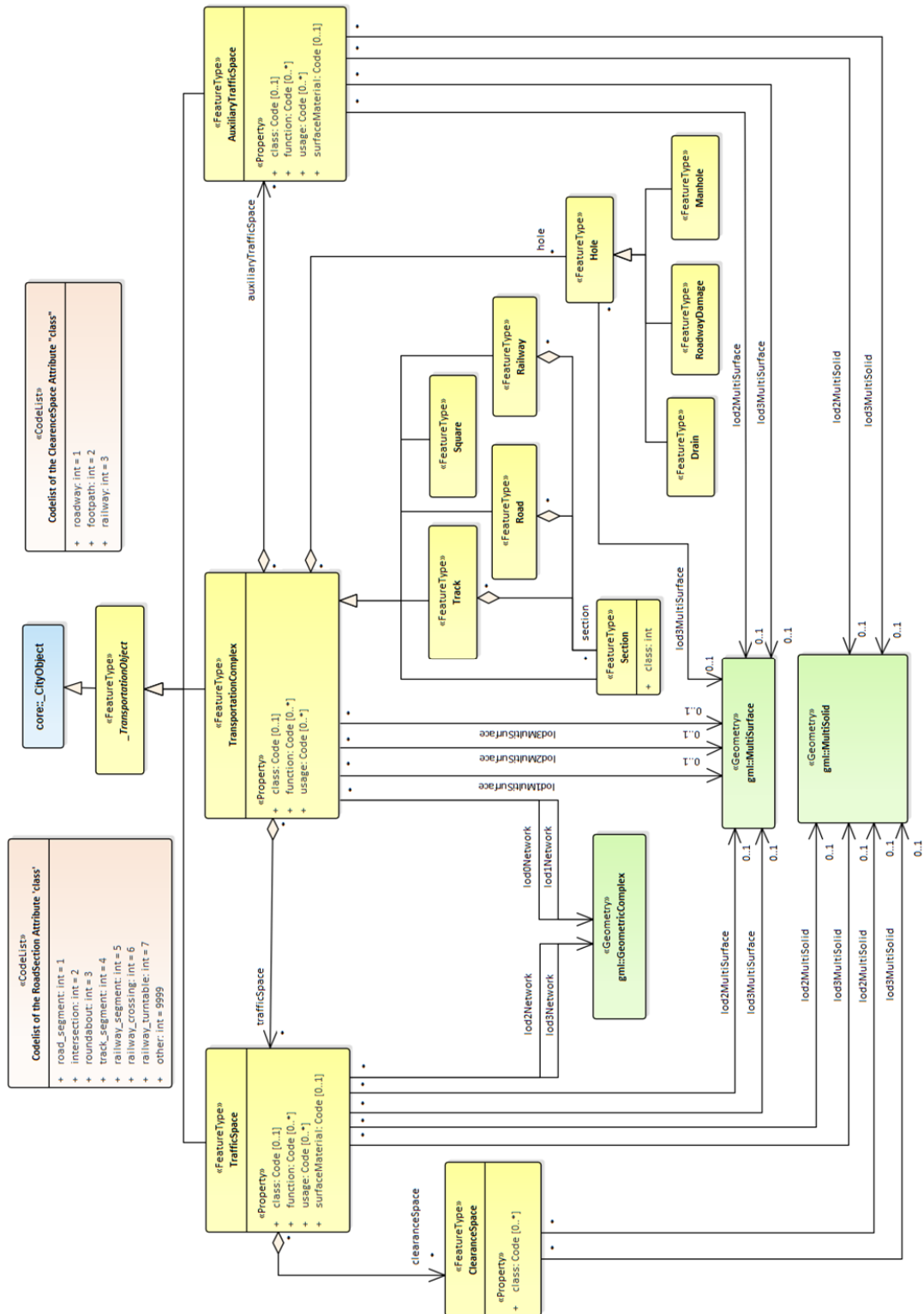


Abb. 1: UML-Diagramm des weiterentwickelten CityGML Transportation Modells (BEIL & KOLBE 2017)

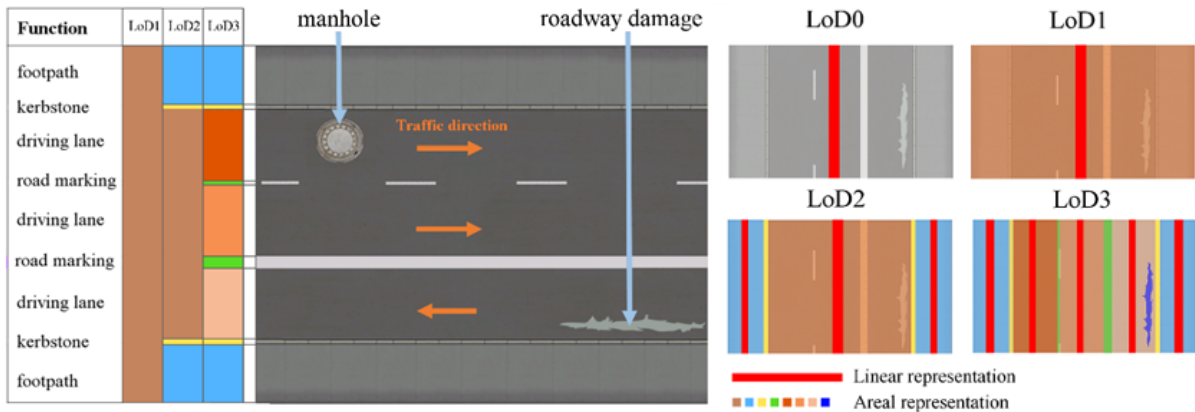


Abb. 2: Straßenabschnitt in LoD1-3 (links), Linien- und flächenhafte Repräsentation in LoD0-LoD3 (rechts) (BEIL & KOLBE 2017)

### 2.3.4 Einführung von Abschnitten und XLink-Konzept

Der linke Teil von Abbildung 3 zeigt wie ein Straßennetzwerk in einzelne Abschnitte unterteilt werden könnte. Eine Straße würde dabei durch ein *Road* Objekt repräsentiert werden, welches aus mehreren Abschnitten (Sections) besteht. Um welchen Typ es sich bei den jeweiligen Abschnitten handelt, kann durch passende Attributwerte festgelegt werden. Diese sind „road\_segment“ (Nr. 1, 2, 4, 5, 6, 8 und 9), „intersections“ (Nr. 3) sowie „roundabout“ (Nr. 7). Im gegebenen Beispiel besteht Road A aus den Abschnitten 1, 3, 5, 7 und 9 während Road B aus den Abschnitten 2, 4 und ebenfalls 3 aufgebaut ist. Um für diesen Fall eine redundante Repräsentation von Abschnitt 3 zu vermeiden, wird das bereits im CityGML-Standard erläuterte und im rechten Teil von Abbildung 3 dargestellte XLink-Konzept vorgeschlagen. Mit Hilfe von XLinks kann die redundante Repräsentation von Geometrien und Geobjekten, welche gleichzeitig mehreren Objekten zugehörig sind vermieden werden. Die betreffende Geometrie bzw. das Teilobjekt wird dabei nur für ein Geobjekt explizit repräsentiert, alle weiteren Geobjekte besitzen lediglich Verweise darauf. Dies wird im dargestellten Instanzdiagramm in Abbildung 3 verdeutlicht.

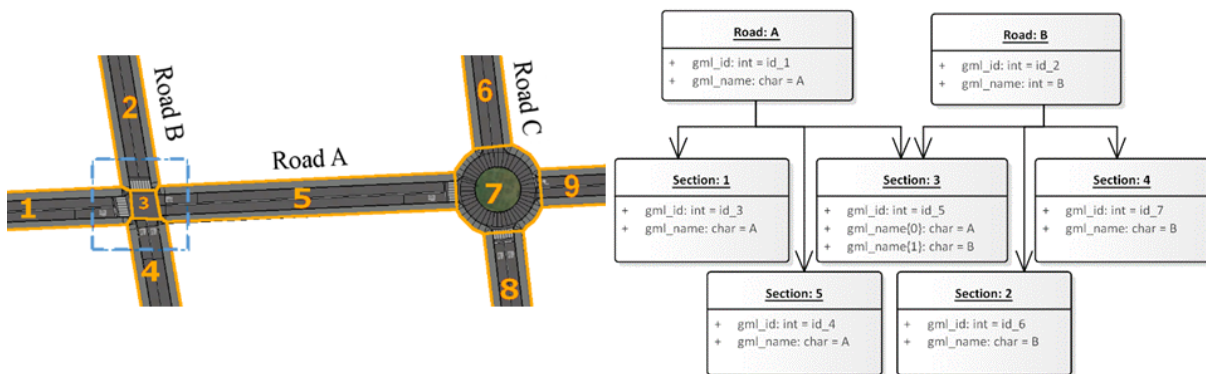


Abb. 3: Straßenabschnitte (links), Instanzdiagramm des XLink-Konzepts für zwei Straßen, die sich einen Kreuzungsbereich teilen (rechts) (BEIL & KOLBE 2017)

## 2.4 Implementierung des Konzepts für New York City

Für die Umsetzung von ausgewählten Teilen des Konzepts werden drei Hauptdatenquellen herangezogen. Dies sind zum einen die in vorangegangenen Arbeiten (vgl. BURGER 2015, CANTZLER 2015) erstellten und mit Attributen angereicherten Straßenmittelachsen im CityGML-Format, zum anderen umfangreiche flächenhafte Shapefiles, welche in Form einer sogenannten „Planimetric Database“ auf dem New York City Open Data Portal<sup>2</sup> zum Download bereitstehen und z.B. Straßenflächen, Gehsteige oder Parkplätze in 2D enthalten sowie weitere Datensätze, in denen zusätzliche Informationen wie beispielsweise Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Straßenzustandsdaten enthalten sind. Weiterhin macht das „NYC Street Design Manual“ Angaben zu Ausmaßen einzelner Straßenraumobjekte sowie zu verwendeten Materialien.

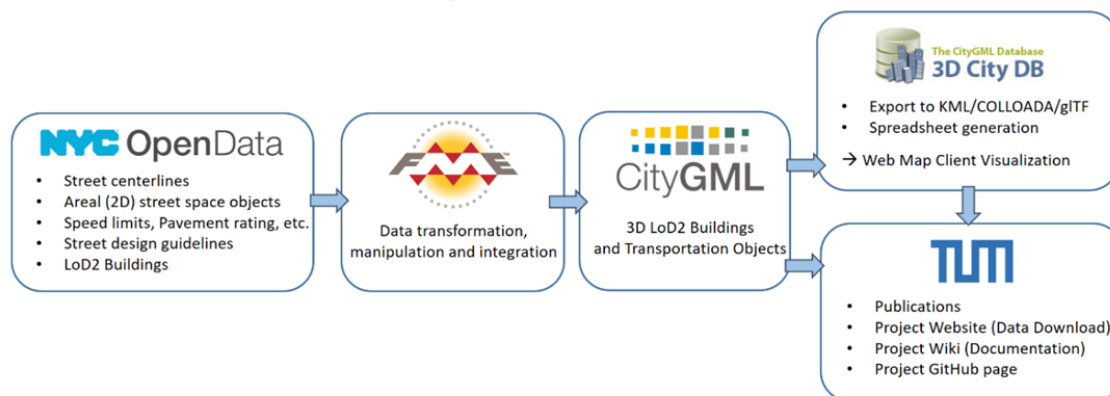


Abb. 4: Workflow zur automatischen Erzeugung eines semantischen Straßenraummodells für NYC

Abbildung 4 zeigt den Ablauf der automatischen Erzeugung eines semantischen Straßenraummodells für New York City. Die vielfältigen Informationsquellen müssen integriert und dabei erarbeitete Vorgaben aus konzeptioneller Sicht berücksichtigt werden. Ziel ist die möglichst automatische Ableitung eines CityGML-konformen Straßenraummodells für das gesamte Stadtgebiet von New York City. Alle Datentransformationen und -manipulationen werden mit der Software „Feature Manipulation Engine 2016.1“ (FME) durchgeführt. Zur späteren Speicherung und Integration der teilweise sehr großen Datenmengen wird die Open Source Geodatenbank „3DCityDB Version 3.3“ verwendet. Die tatsächliche Umsetzung des Konzepts muss im Rahmen des aktuell gültigen Standards CityGML2.0 umgesetzt werden, Ideen des Konzeptkapitels werden jedoch soweit möglich bereits berücksichtigt. Zunächst werden die Daten der „Planimetric Database“ in das verwendete Koordinatensystem (EPSG:32118) transformiert sowie geeignete Testgebiete ausgewählt, mit denen in überschaubarer Datenmenge experimentiert werden kann. Zu komplexe Szenarien wie Autobahnkreuze werden zudem aus den Straßenmittelachsen-daten herausgefiltert und gesondert bearbeitet. Die zur Verfügung stehenden Straßenmittelachsen werden zunächst um zahlreiche weitere semantische Informationen angereichert, indem Attribute aus unterschiedlichen Datensätzen mit Hilfe gemeinsamer Identifikatoren wie Straßennamen oder Objekt-ID übertragen werden. Dies umfasst u.a. Angaben zu Geschwindigkeitsbegrenzungen, dem Straßenzustand oder der Anzahl an Fahrspuren. Die so erzeugten „neuen“ Straßenmit-

<sup>2</sup> <https://opendata.cityofnewyork.us/>



telachsendaten werden anschließend mit einer räumlichen Korrelationsmethode den zugehörigen Straßenflächen aus den Daten der „Planimetric Database“ zugeordnet und so semantische Informationen übertragen. Mit Hilfe unterschiedlicher Verfahren wie räumlicher Überlagerung, Nachbarschaftsanalysen oder Abstandsmessungen werden dann sämtliche Objektklassen ebenfalls geometrisch bearbeitet und mit semantischen Informationen angereichert. Gehsteige liegen in den Originaldaten beispielsweise als zweidimensionale Flächen mit Loch vor, die z.B. einen Häuserblock umschließen, aber keinerlei Attribute besitzen. Diese Flächen werden daher zunächst so zerlegt, dass kleinere Einzelflächen entstehen, welche dann eindeutig einer benachbarten Straßenfläche zugeordnet werden können. Attributwerte wie Straßennamen werden daraufhin übernommen und neue Kenngrößen, wie der Flächeninhalt des jeweiligen Objekts, berechnet. Abschließend werden Gehsteigflächen auf Grundlage der Angabe im „NYC Street Design Manual“ um 0,1528m (= 6 Inch) extrudiert und mit passenden Betontexturen versehen. Auf ähnliche Weise werden sämtliche Straßenraumobjekte wie z.B. Parkplätze oder Straßenmarkierungen bearbeitet. Zusätzlich werden weitere Objektklassen, welche in den ursprünglichen Ausgangsdaten nicht enthalten sind, abgeleitet. So überlagern sich Parkplatzflächen in den Zufahrtsbereichen mit den Straßenflächen. Diese Bereiche werden als semantisch eigenständige Objekte (Zufahrten) gespeichert. Bei der geometrischen und semantischen Bearbeitung werden die zuvor erarbeiteten konzeptionellen Überlegungen umgesetzt.

### 3 Ergebnisse

Insgesamt entstehen so elf thematische Objektklassen mit 508.660 Einzelobjekten, die jeweils der entsprechenden CityGML-Oberklasse des Transportation-Modells (also *Road*, *Square* oder *Track*) zugeordnet werden und im CityGML-Format gespeichert werden. Tabelle 2 zeigt eine Auflistung aller erstellten Objekte mit den jeweiligen Datenmengen (\*komprimierte CityGML zip-files).

Alle Objekte werden zudem mit passenden Texturen versehen um eine möglichst realistische Visualisierung zu gewährleisten.

Tab. 2: Zusammenfassung aller erzeugten Straßenraumobjekte mit zugehörigen Datenmengen

CityGML Klasse	Anzahl Objekte	Datenmenge*
Curb (Randstein)	126'626	2,02 GB
Parking Lot Entrance (Einfahrt)	24'185	5,5 MB
Intersection (Kreuzung)	22'854	7,9 MB
Grass (Grasfläche)	258	0,3 MB
Road Marking (Markierung)	7'826	3,9 MB
Dividing Strips (Verkehrinsel)	8'841	74,8 MB
Roadbed (Straßenfläche)	72'580	134,9 MB
Sidewalk (Gehsteig)	169'056	1,3 GB
Parking Lot (Parkplatz)	19'951	32,2 MB
Plaza (öffentl. Platz)	1'360	5,5 MB
Interior Sidewalk (Gehweg)	6'205	15,8 MB
Building (Gebäude)	> 1'000'000	2,4 GB

Mit Hilfe der Software 3DCityDB werden daraus KML-/COLLADA-Daten sowie korrespondierende Spreadsheets erzeugt, welche verwendet werden können, um geometrische und semantische Informationen in Form einer gekachelten Visualisierung darzustellen. Hierzu wird der Open Source „WebGL Virtual Globe Cesium“ und der 3DCityDB-Web-Map-Client verwendet. Alle Objekte des Straßenraummodells können hierin, wie in Abbildung 5 dargestellt, individuell ausgewählt und deren hinterlegte Attributinformationen abgerufen werden. In der linken Abbildung ist ein Teil des Stadtmodells im Bereich des Columbus Circle in der Nähe des Central Parks abgebildet. Die rechte Graphik zeigt ein Straßenstück der 5<sup>th</sup> Avenue vor dem berühmten Flatiron Building in Manhattan. Durch Anklicken können Informationen über Straßennamen, Fläche, Straßenzustand usw. aufgerufen werden. Der Web Client erlaubt interaktive SQL-Abfragen, die zudem kombiniert werden können. So können beispielsweise alle Straßenstücke, welche zur 5<sup>th</sup> Avenue gehören und sich in schlechtem Zustand befinden, selektiert und deren Gesamtfläche aufsummiert werden. Kreuzungsflächen sind explizit modelliert und besitzen Informationen darüber, welche Straßen sich jeweils kreuzen.

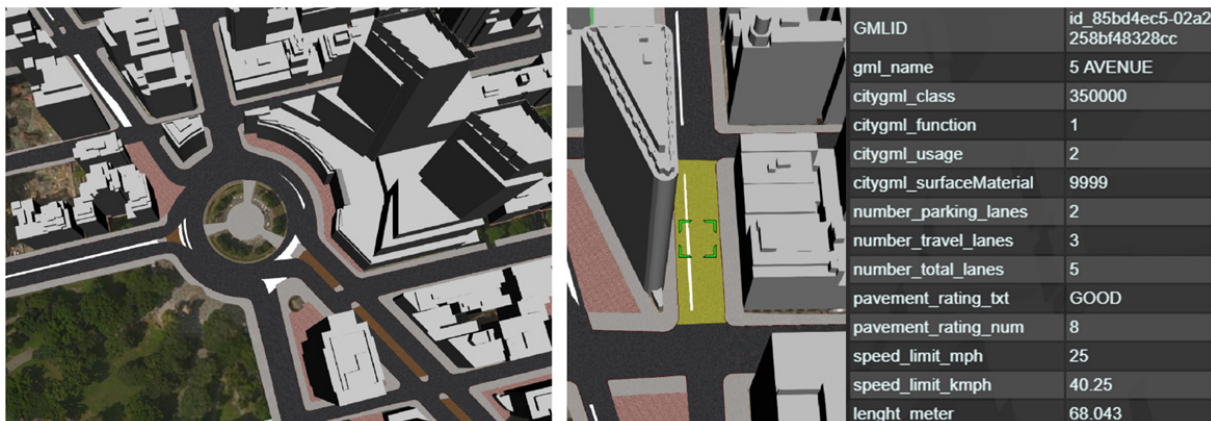


Abb. 5: Columbus Circle (links) und Straßenstück vor Flatiron Building mit Attributabfrage (rechts)

## 4 Fazit & Ausblick

Die Arbeit befasst sich zunächst mit relevanten Standards im Bereich der Straßenmodellierung und zeigt, dass Straßen zumeist durch linienhafte oder parametrische Repräsentationen dargestellt werden. Eine Analyse potentieller Anwendungsfelder verdeutlicht jedoch den Nutzen, den diese aus flächenhaften Repräsentationen ziehen würden. Eine anschließende Analyse des CityGML2.0 Transportation Datenmodells führt zu zahlreichen Verbesserungs- und Erweiterungsvorschlägen sowie konzeptionellen Überlegungen hinsichtlich möglicher Zerlegungen des Straßenraums in Einzelobjekte. Diese Erkenntnisse werden schlussendlich am Beispiel eines semantischen 3D- Stadtmodells für das gesamte Stadtgebiet von New York City auf Grundlage frei verfügbarer Daten umgesetzt. Die Ergebnisse der Arbeit wurden im Rahmen der 3DGeoInfo Konferenz in Melbourne 2017 vorgestellt. Das hierzu eingereichte Paper (BEIL & KOLBE 2017)

wurde mit dem „Runner-up for the Best Paper Award“ ausgezeichnet<sup>3</sup>. Weitere Informationen können auf der Projektwebsite<sup>4</sup> sowie der Projekt-Wiki-Seite<sup>5</sup> eingesehen werden. Hier finden sich auch mehrere Videos, die im Rahmen des Projekts entstanden sind. Zudem stehen auf der Projektwebsite sämtliche erzeugte Datensätze für das gesamte Stadtgebiet zum Download zur Verfügung. In der Folge wurden und werden die Ergebnisse der Arbeit weitergeführt; so etwa für Verkehrssimulationen oder Solarpotentialanalysen. Die zunehmende Verfügbarkeit von Straßendaten z.B. aus Mobile Mapping Systemen bietet zahlreiche Möglichkeiten, die in dieser Arbeit gesetzten Grundlagen der Straßenraummodellierung aufzugreifen und weiterzuführen. Die Erkenntnisse der Arbeit spielen bei der aktuellen Weiterentwicklung des CityGML Standards eine Rolle.

## 5 Literaturverzeichnis

- BAST, 2016: Objektkatalog für das Straßenwesen, Version 2.017. Bundesanstalt für Straßenwesen.
- BEIL, C., 2017: Detaillierte Repräsentation des Straßenraums in 3D Stadtmodellen. Lehrstuhl für Geoinformatik, Technische Universität München.
- BEIL, C. & KOLBE, T.H., 2017: CityGML and the Streets of New York – A Proposal for detailed Street Space Modelling, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **IV**(4/W5), 9-16.
- BMVI, 2014: Anweisung Straßeninformationsbank Kernsystem Version 2.03. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- BURGER, B., 2015: Erzeugung eines semantischen 3D-Stadtmodells der Stadt New York auf der Basis von Open Data - DGM, Straßen und Zonierung. Lehrstuhl für Geoinformatik, Technische Universität München.
- CANTZLER, B., 2015: Erzeugung eines semantischen 3D-Stadtmodells der Stadt New York auf der Basis von Open Data - DGM, Gebäude, Flurstücke, Gewässer, Parks und Bäume. Lehrstuhl für Geoinformatik, Technische Universität München.
- DUPUIS, M., BAHRAM, M., GREZLIKOWSKI, H., RICHTER, A., GOLDBERG, A., KLAERNER, E., BOCK, B. & KAELLGREN, L., 2015: OpenDRIVE – Format Specification, Rrev. 1.4. VIRES Simulationstechnologies GmbH.
- GRÖGER, G., KOLBE, T.H., NAGEL, C. & HÄFELE, K.-H., 2012: OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, OGC 12-019.
- ISO 14825, 2011: Intelligent transport systems – Geographic Data Files (GDF) – GDF5.0 International.
- LÖWNER, M.-O., GRÖGER, G., BENNER, J., BILJECKI, F. & NAGEL, C., 2016: Proposal for a new LoD and multi-representation concept for CityGML. ISPRS Annals of the Photogramme-

---

<sup>3</sup> [https://www.gis.bgu.tum.de/aktuelles/news-single-view/?tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=97&cHash=b7bc6358ec84a142dced5e2c7143f3cc](https://www.gis.bgu.tum.de/aktuelles/news-single-view/?tx_ttnews%5Btt_news%5D=97&cHash=b7bc6358ec84a142dced5e2c7143f3cc)

<sup>4</sup> <https://www.gis.bgu.tum.de/projekte/new-york-city-3d/>

<sup>5</sup> <https://wiki.tum.de/display/gisproject/3D+City+Model+of+New+York+City>

try, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **IV**(2/W1), 11<sup>th</sup> 3DGeoinfo Conference in Athens, Greece.

RANDT, B., BILDSTEIN, F. & KOLBE, T.H., 2007: Use of Virtual 3D Landscapes for Emergency Driver Training. Proc. of the Int. Conference on Visual Simulation IMAGE in Scottsdale, Arizona.

ROSS, L., 2010: Virtual 3D City Models in Urban Land Management - Technologies and Applications. Ph.D. Thesis, Technische Universität Berlin, Germany.