

## Digitaler geoZwilling – Datenmodell für ein virtuelles Abbild der Stadt Wien

### Digital geoTwin – Datamodel for a virtual replica of the City of Vienna



Hubert Lehner, Sara Lena Kordasch, Charlotte Glatz, Wien und Giorgio Agugiaro, Delft

#### Kurzfassung

Die Stadtvermessung Wien arbeitet seit Ende 2019 am Projekt *Digitaler geoZwilling*. Dabei wurde eine neue Strategie sowohl in der Erstellung semantischer 3D-Objekte als auch anderer Geodatenprodukte ins Zentrum gestellt, welche bestehende Workflows komplett umstrukturiert und neu durchdenkt. Der Kern der Strategie ist es, die dreidimensionalen Messdaten der Stadtvermessung aus bestehenden aber auch potenziell neuen Messmethoden direkt zu einem Digitalen geoZwilling – einem virtuellen, semantischen 3D-Abbild aller Objekte der Stadt – zu verarbeiten und andere Geodatenprodukte (Stadtkarte, Höhenmodelle, etc.) aus diesem 3D-Abbild abzuleiten. Weiters soll der Digitale geoZwilling als geometrische und semantische Grundlage für einen Digitalen Zwilling der Stadt Wien dienen.

In dem Artikel versuchen wir das Konzept eines Digitalen Zwillings im Kontext einer Großstadt zu erläutern und den Zusammenhang zu anderen Begriffen rund um das Thema herzustellen. In weiterer Folge wird auf die Entwicklung und die Ziele des Digitalen geoZwillings eingegangen, es werden Grundlagen der 3D-Modellierung beschrieben und die Notwendigkeit von neuen Datenmodellen diskutiert. CityGML als internationaler Standard für 3D-Stadtmodelle bietet ein Fundament für die Entwicklung solcher Datenmodelle. Die Entwicklung, Konzepte und Nutzung von CityGML in der Praxis werden vorgestellt. Die Ergebnisse einer prototypischen Entwicklung eines Datenmodells für den Digitalen geoZwilling auf der Basis von CityGML bilden den Hauptteil der Arbeit.

**Schlüsselwörter:** Digitaler geoZwilling, Digitaler Zwilling, 3D-Stadtmodell, City Information Modelling, CIM, CityGML, 3D GIS, LOD

#### Abstract

The surveying and mapping department of the City of Vienna has been working on the Digital geoTwin project since the end of 2019. The new strategy focuses on both the creation of semantic 3D objects and other geodata products, which completely restructures and rethinks existing workflows. The core of the strategy is to process the three-dimensional measurement data of the surveying and mapping department from existing as well as potentially new measurement methods directly into a Digital geoTwin – a virtual, semantic 3D replica of all objects in the city – and to derive other geodata products (city map, elevation models, etc.) from this 3D model. Furthermore, the Digital geoTwin should serve as a geometric and semantic basis for a digital twin of the City of Vienna. In this article, we try to explain the concept of a digital twin in the context of a large city and to establish the connection to other terms related to the topic. Subsequently, the development and goals of the Digital geoTwin will be discussed, the basics of 3D modelling will be described and the need for new data models will be assessed. CityGML as an international standard for 3D city models offers a foundation for the development of such data models. The development, concepts and use of CityGML in practice are presented. The results of a prototypical development of a data model for the Digital geoTwin based on CityGML form the main part of this article.

**Keywords:** Digital geoTwin, Digital Urban Twin, 3D-citymodel, City Information Modelling, CIM, CityGML, 3D GIS, LOD

## 1. Einleitung

Mit dem Voranschreiten der Digitalisierung in vielen Lebensbereichen und dem technischen Fortschritt waren und sind auch Geodaten großen Veränderungen unterworfen. Wiewohl sich an dem Grundgedanken von Geodaten nichts geändert hat – sie dienen nach wie vor zur Orientierung und zur Visualisierung von räumlichen Zusammenhängen – müssen sie mit dem technischen Fortschritt auch immer mehr Aufgaben und Anforderungen erfüllen.

Das Aufkommen erster kommerzieller GIS-Systeme in den 1980er Jahren hat einen ersten Digitalisierungsschub in der Geodatenbranche ausgelöst. So ist es nicht verwunderlich, dass die meisten größeren Kommunen in den Industrieländern eine Historie an digitalen Geodaten haben, die in diese Zeit zurückreicht. Digitale Kartenwerke dienen auch in diesen Geoinformationssystemen (GIS) vor allem menschlichen Benutzer\*innen dazu Orientierung zu geben und haben sich somit zu einer Basis (Geobasisdaten) für GIS entwickelt. Darüber hinaus müssen diese Geobasisdaten auch alleine oder mit zusätzlichen Geodaten (zB. Fachdaten, Planungsdaten) analysierbar und auswertbar sein. Zu dem Zweck der Visualisierung und Orientierung ist somit auch ein Zweck der analytischen Verarbeitbarkeit durch Algorithmen dazugekommen. Während 2,5D-Daten in Form von Höhengschichtenlinien schon vor der ersten Digitalisierungswelle in analogen Geodatenzeiten produziert worden sind, gibt es tatsächliche 3D-Geodaten eigentlich erst seit den 2000er Jahren in Form von 3D-Stadtmodellen, die sich damals auf 3D-Gebäudemodelle beschränkt haben.

Rasant steigende Prozessierungsleistung und damit einhergehend neue Technologien (neuronalen Netze, Machine Learning, künstliche Intelligenz, Computer Vision) haben einen weiteren Digitalisierungsschub nicht nur in der Geodatenbranche aber auch hier sowohl in der Aufnahme, Verarbeitung und Analyse von Daten (BigData) ausgelöst. Hier stellt sich nun die Frage, welche Aufgabe müssen Geobasisdaten in dieser Zeit und in Zukunft erfüllen können.

Aus der Industrie 4.0 kommend hat sich aktuell das Konzept des Digitalen Zwillings für Städte als maßgebliches neues Thema herausgestellt. Im Zentrum dieses Konzepts steht eine digitale Kopie des zu simulierenden Produktionsworkflows oder Systems. Es geht also sowohl um die geometrische Modellierung von physischen Objekten

in einem virtuellen (3D-) Raum als auch um die Informationsmodellierung und darüber hinaus um die Modellierung von Prozessen und Zusammenhängen mit dem Ziel, diese digitalen mit Informationen angereicherten oder verknüpften Modelle als Kollaborationsplattform für viele Disziplinen zu nutzen.

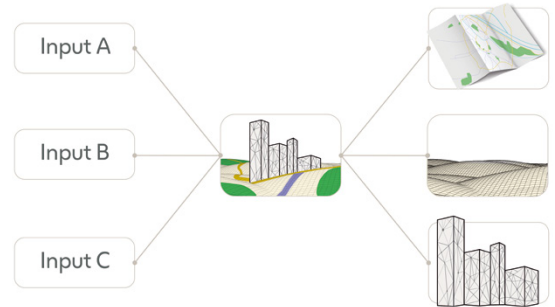


Abb. 1: Konzept zur Ableitung von Geobasisdaten aus dem Digitalen geoZwilling.

Mit dem Projekt Digitaler geoZwilling wurde nun der erste Schritt in diese Richtung gesetzt. Im Kern des Projekts geht es darum, anders als in der Vergangenheit, alle vorhandenen Messdaten zu einem semantischen, vektorbasierten Modell – einem virtuellen Abbild der Stadt – zu verarbeiten. Einfachere oder generalisierte Geodatenprodukte sollen in weiterer Folge aus dem Digitalen geoZwilling abgeleitet werden (siehe Abbildung 1). Mit dieser Strategie kann zukünftig auch die zeitliche und inhaltliche Kohärenz der mit dem Digitalen geoZwilling zusammenhängenden Geodatenprodukten gewährleistet werden. Das Präfix „geo“ für den Neologismus *Digitaler geoZwilling* wurde bewusst gewählt um den Fokus des geodätischen, geometrischen Aspekts in der Erstellung der semantischen Geobjekte hervorzuheben, aber auch um das Thema zum weiten Begriff eines gesamten Digitalen Zwillings der Stadt abzugrenzen. Zur Einbettung des Digitalen geoZwillings in einen Digitalen Zwilling der Stadt Wien wurden bereits zu Beginn des Projekts mehrere UseCases definiert um bei der Entwicklung des Digitalen geoZwillings notwendige Schnittstellen zu Fachdatensystemen, Planungsdaten oder Simulationsanwendungen vorzusehen. Erst die Nutzung des Digitalen geoZwillings als Geobasis einer kollaborativen Plattform ermöglicht es, das volle Potenzial eines Digitalen Zwillings einer Stadt zu heben.

Zur Prüfung der technischen Machbarkeit hat sich die Magistratsabteilung 41 – Stadtvermessung Wien (MA 41) im Rahmen eines Proof-of-

Concept (PoC) der Herausforderung gestellt, in einem Testgebiet aus den vorliegenden 3D-Messdaten semantische 3D-Objekte zu bilden und in weiterer Folge Datenmodelle zu finden, die die Informationen auch tragen und vorhalten können.

Mit dem Projekt des Digitalen geoZwillings stehen wir also vor einem Paradigmen-Wechsel im Vergleich zu bestehenden Produktionsschienen für Geobasisdaten. Bei jenen werden in der Regel mehrere Workflows/Softwareprodukte, die auf die Erstellung und Aktualisierung des jeweiligen Geodatenprodukts spezialisiert sind, verwendet. Dabei sind oft nicht nur die Bearbeitungsfunktionen unterschiedlich und auf das jeweilige Produkt spezialisiert, sondern auch die verwendeten Datenmodelle.

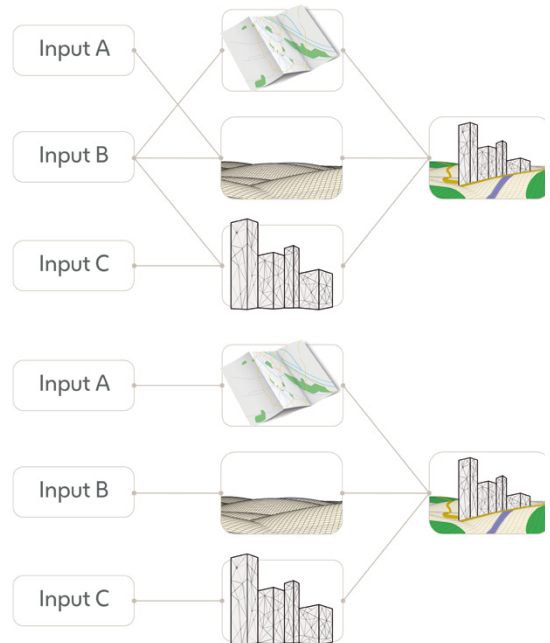
Für die Produktion von 2D-Karten werden zwar oft auch 3D-Eingangsdaten verwendet – die Bearbeitung erfolgt meist in kommerziellen GIS-Systemen, wobei die z-Koordinaten der Input-Daten in der Regel ab einem gewissen Zeitpunkt weggelassen werden. Manchmal, wie auch im Fall der Flächen-Mehrzweckkarte (FMZK)<sup>1</sup> der Stadt Wien, werden z-Koordinaten der Input-Daten aggregiert und zu einem oder mehreren Höhenattributen der 2D-Objekte zusammengefasst.

Mit der Entwicklung kommerzieller ALS-Systeme in den 2000er Jahren hat sich die Produktion von 2,5D-Höhenmodellen aus der luftbildbasierten photogrammetrischen Ableitung von Höhenschichtenlinien in Richtung vollautomatischer Prozessierung von Gelände- und Oberflächenmodellen auf Basis der aufgenommenen ALS-Punktwolken verschoben. Für hohe Anforderungen an Geländemodelle, welche vor allem im dicht verbauten städtischen Bereich durch eine Vielzahl an Stützmauern gegeben ist, haben sich Softwareprodukte zur Modellierung von hybriden Geländemodellen entwickelt. Dabei werden regelmäßige GRID-Daten mit Bruchkanten und Formlinien kombiniert. Hybride Geländemodelle sind somit in der Lage auch sehr scharfe Kanten im Gelände wiederzugeben. Ein bekanntes Softwareprodukt für diese Art der Modellierung ist die Software DTMaster<sup>2</sup> der Firma Inpho, welche 2007 von Trimble übernommen wurde.

Im Zusammenhang mit der Modellierung von Gebäuden für 3D-Stadtmodelle gibt es je nach Detaillierungsgrad (engl.: Level of Detail – LOD)

1) <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/stadtvermessung/geodaten/fmzk/index.html>

2) <https://de.geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-inpho>



**Abb. 2:** Klassischer Weg zur Erstellung von Geodaten und Kombination dieser Daten zu einer 3D-Szene. Beispielhafte Darstellung der Mehrfachnutzung von Input-Daten in mehreren Geobasisdaten (oben) im Vergleich zu separaten Input-Daten pro Datensatz (unten).

sehr unterschiedliche Ansätze. Einfache Blockmodelle (LOD1.1-1.4, siehe Biljecki et al. 2016 und Lehner und Dorffner, 2020) können, so wie das Baukörpermodell in Wien, durch Hinzunahme eigener Höhenattributfelder gemeinsam mit 2D-Geodaten der Stadtkarte mitverwaltet werden. Für die Erstellung von LOD2.1 Modellen (siehe Lehner und Dorffner, 2020) gibt es eine Anzahl von semi-/automatischen Ansätzen z.B. basierend auf Punktwolken aus ALS oder Bildmatching, siehe Tridicon<sup>3</sup>, welche 2012 von Hexagon übernommen und in die Software HxMap<sup>4</sup> inkludiert wurde, oder BREC<sup>5</sup> der Firma virtualcitysystems. Für höher detaillierte Gebäudemodelle (z.B. LOD 2.4, siehe Lehner und Dorffner, 2020) ist in der Regel eine interaktive Bearbeitung auf Basis von photogrammetrischer Auswertung erforderlich, siehe z.B. CityGRID<sup>6</sup> der Firma UVM Systems.

3) <https://informedinfrastructure.com/11066/tridicon-3d-building-finder-automates-3d-city-model-creation/>

4) <https://leica-geosystems.com/de-at/products/airborne-systems/software/leica-hxmap>

5) <https://vc.systems/produkte/building-reconstruction/>

6) <https://www.uvm.com/index.php/de-de/software/soft-city>

|   | CIM  | BIM  |
|---|--|--|
| Geometrie                               | hauptsächlich BREP (Boundary representation)       | hauptsächlich parametrisch modellier- te CSG (Constructive solid geometry) |
| hauptsächliche Datenquelle              | Vermessung   | Design   |
| Modellierungsdetails (d) im Bereich von | 1000 m > d > 0,1 m                                 | 50 m > d > 0,001 m   |
| Semantik                                | ausgerichtet auf Beschreibung der Stadt/Landschaft | ausgerichtet auf Beschreibung von kleinen Gebäudeteilen                    |
| Georeferenzierung                       | verpflichtend                                      | optional   |
| unterstützte Analysen                   | Stadt-level  | Gebäude-level  |
| Entwicklung aus                         | Geoinformationssysteme (GIS)                       | Computer-Aided Design (CAD)  |
| hauptsächlicher Nutzerkreis             | öffentliche Hand                                   | Industrie  |
| primäre Datenhaltung                    | datenbankbasiert                                   | filebasiert  |

Tab. 1: Vergleich zwischen CIM und BIM (angepasst von Noardo et al. 2020)

Der Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Geobasisdaten ist manchmal durch Nutzung zum Teil identer Eingangsdaten in den unterschiedlichen Prozessen gegeben oder, falls auch die Aufnahme der Eingangsdaten getrennt vorgenommen wird, gar nicht gegeben.

Eine 3D-Szene der Stadt wird folglich aus der Kombination der unterschiedlichen 2D-, 2,5D- und 3D-Daten erzielt. Ein einheitliches Datenformat für das Resultat dieser Kombination gibt es in der Regel nicht (siehe Abbildung 2).

Werkzeuge für die tatsächliche 3D-Modellierung von 3D-Szenen findet man eher im Bereich von CAD-Software im Design- und Planungsbereich. Wesentliche Unterschiede im Vergleich zur Modellierung von Geobasisdaten liegen darin, dass in lokalen Koordinatensystemen, filebasiert, kaum datenbankbasiert und in ganz anderen Maßstäben gearbeitet wird. Die Bearbeitungsfunktionen dieser Softwareprodukte sind daher eher für die Modellierung von neuen geplanten Objekten ausgerichtet, welche effizient mittels parametrisierten Bauteilen, sogenannten Constructive solid geometries (CSG), modelliert werden können, und nicht auf die Modellierung von Bestandsobjekten basierend auf Messdaten spezialisiert. Einen gu-

ten Überblick zu den Unterschieden dieser beiden Bereiche gibt der Vergleich zwischen 3D-Stadtmodellierung/City Information Modelling (CIM) und Building Information Modellierung (BIM), siehe Tabelle 1.

Für eine durchgehende 3D-Modellierung aller Objekte mangelt es somit also sowohl an Softwarelösungen als auch an Datenmodellen für die Verwaltung und Speicherung.

Bereits relativ zu Beginn der Entwicklung von 3D-Stadtmodellen vor ca. 20 Jahren wurde der Mangel an Industriestandards erkannt und von der SIG 3D (Special Interest Group 3D)<sup>7</sup> aufgegriffen. Die Arbeitsgemeinschaft mit Partnern aus der öffentlichen Verwaltung, Wissenschaft und Wirtschaft hat damals den Grundstein für CityGML gelegt. Dieser Standard wurde mittlerweile bereits 2008 von der OGC (Open Geospatial Consortium)<sup>8</sup> übernommen und seitdem fortgeführt.

Bei der Entwicklung des Standards wurde auf die oben skizzierte Bearbeitung unterschiedlicher Geodatenprodukte Rücksicht genommen und so ist die Kombination einzelner Geodaten (DGM, Gebäudemodelle, 2D-Stadtkarte, ...) durch den

<sup>7</sup>) <https://www.sig3d.org/>

<sup>8</sup>) <https://www.ogc.org/>

Standard abgedeckt. CityGML fungiert in diesem Fall als eine einheitliche Datendrehzscheibe für konventionell erstellte 2D-, 2,5D- und 3D-Geobasisdaten.

Die zentrale Frage, ob und inwieweit CityGML für die Speicherung und Verwaltung des Digitalen geoZwillings geeignet ist, wurde im PoC des Projekts untersucht und basierend auf der Modellierung eines Testgebietes geprüft. Die Ergebnisse werden in diesem Artikel vorgestellt.

Zur Einordnung in den Kontext eines Digitalen Zwillings der Stadt wird dieser Begriff in Kapitel 2 aus dem Verständnis der Autor\*innen genauer betrachtet und in weiterer Folge auch im Vergleich zu anderen Begriffen eingeordnet (siehe Kapitel 2.1). Kapitel 3 geht auf das Projekt des Digitalen geoZwillings ein und beschreibt die postulierten Konzepte. Kapitel 4 gibt einen allgemeinen Überblick zu den Möglichkeiten der geometrischen 3D-Modellierung. Die Modellierung des Datenmodells wird in Kapitel 5 diskutiert. Dieses Kapitel teilt sich in eine Beschreibung des Datenstandards CityGML (Kapitel 5.1) und der prototypischen Umsetzung des Datenmodells des Digitalen geoZwillings basierend auf CityGML (Kapitel 5.2). Kapitel 6 fasst die Ergebnisse zusammen. Das abschließende Kapitel 7 gibt einen Ausblick in die weitere Entwicklung des Digitalen geoZwillings und angrenzende Themen.

## 2. Digitaler Zwilling im Kontext einer Großstadt

Ursprünglich aus der Industrie 4.0 kommend, sind Digitale Zwillinge ein aufstrebendes internationales Konzept der Digitalisierung. Ein digitaler Zwilling beschreibt die virtuelle Repräsentation von Objekten, Prozessen und Systemen. Die Abbildung in der virtuellen Welt kann je nach Anwendung unterschiedlichen Zielen, wie der Simulation, dem Monitoring, der Erhaltung, der Planung und Weiterentwicklung des abgebildeten Systems dienen. Übergeordnetes Ziel ist dabei meist, dass die virtuelle Welt der Abbildung komplexer Systeme und der Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Disziplinen dient.

Städte sind komplexe Ökosysteme. Eine Großstadt zu managen und für nachfolgende Generationen weiterzuentwickeln ist eine Herausforderung und eine große Verantwortung. In der öffentlichen Verwaltung und in ausgelagerten Versorgungsbetrieben arbeiten viele Expert\*innen in unterschiedlichen Bereichen - alle mit speziel-

lem Wissen, speziellen Daten und Systemen. Um bereichsübergreifend auch in Zukunft die richtigen Entscheidungen für Planung, Verwaltung und Management der Infrastruktur treffen zu können, aber auch um die Stadt in die richtige Richtung weiterzuentwickeln, braucht es Methoden und technische Lösungen.

Urbane Digitale Zwillinge versuchen eine Antwort auf diese Herausforderung zu geben und spielen im Kontext der Digitalisierung von Städten eine immer zentralere Rolle. Prozesse in Stadtverwaltungen verlagern sich zunehmend in den digitalen Raum, wobei der physische, der soziale und der virtuelle Raum immer enger verknüpft werden. Modernes Stadtmanagement benötigt in diesem Umfeld immer mehr und immer aktuellere Daten. Ein Urbaner Digitaler Zwilling stellt ein lebendiges, digitales Abbild dar und ist somit nicht statisch, sondern entwickelt sich mit seinem Pendant in der physischen und sozialen Realität mit. Ein Digitaler Zwilling ist aber nicht nur eine technische Lösung, sondern auch eine neue Art der Zusammenarbeit zwischen unterschiedlichen Disziplinen. In diesem Sinne kann man einen urbanen digitalen Zwilling auch als interdisziplinäre Kollaborationsplattform verstehen. Es geht also um die Vernetzung von Fachwissen und Systemen, im weitesten Sinn also um ein System aus Systemen, welches neben dem Erhaltungsmanagement auch der Weiterentwicklung der Stadt dient. Ein Digitaler Zwilling der Stadt stellt somit auch eine virtuelle Welt zur Simulation von zukünftigen Entwicklungen dar bevor diese in der Realität umgesetzt werden, um daraus Schlüsse für Entscheidungsprozesse zu ziehen und die richtigen Entscheidungen für die Zukunft zu treffen.

Ein Digitaler Zwilling ist also nicht ein Datensatz, nicht eine Software, nicht ein System oder eine Datenbank. Vielmehr geht es darum das gewachsene Fachwissen einer Stadt zu verbinden. Es geht also um ein System aus Systemen, um Interoperabilität zwischen Datenbanken und technikbasierte Zusammenarbeit von verschiedensten Disziplinen. Daraus resultiert auch, dass es keinen Digitalen Zwilling „von der Stange“ gibt. Der Aufbau und die Entwicklung eines urbanen Digitalen Zwillings ist immer eine maßgeschneiderte Lösung, die auf die Entwicklung einer Stadt eingeht und mit ihr wachsen muss. Konzepte und Strategien sind aber übertragbar. Internationaler Austausch dazu ist daher ein wichtiger Faktor für die Entwicklung.

Durch die Komplexität des Themas ist der Begriff des Digitalen Zwillings im Kontext von Städten sehr vielfältig und sehr unterschiedlich in Verwendung. Während die Nutzung des Begriffs zum Teil aus einem zu einfachen Verständnis oder Unverständnis des Konzepts rührt, ist die aus unserer Sicht falsche Nutzung in manchen Bereichen auch dem Marketing geschuldet. Zum Teil wurde der Begriff Digitaler Zwilling als Rebranding von bestehenden Produkten, Techniken, Software, etc. eingesetzt. Dieser Umstand verstärkt daher, dass der Begriff des Digitalen Zwillings und auch die Idee und das Konzept dahinter noch schwerer greifbar werden.

Für das Ziel ein geodätisches, geometrisches Grundlagemodell für einen Digitalen Zwilling einer Stadt zu bilden, war es also – wie eingangs erwähnt – erforderlich mit dem Neologismus **Digitaler geoZwilling** einen neuen Begriff zu finden um das Projekt und unser Konzept von dem Digitalen Zwilling einer Stadt, welcher viel mehr umfasst, abgrenzen und dadurch auch genauer definieren zu können.

## 2.1. Zusammenhang zu weiteren Begriffen

Der Begriff Digitaler Zwilling findet seit den letzten Jahren in einem sehr breiten Feld Einsatz – von der Industrie 4.0 bis hin zu Städten und grenzüberschreitenden, urbanen Regionen und Projekten. In diesem Zusammenhang werden unter dem Kernbegriff Digitaler Zwilling diverse Umsetzungsvarianten vermarktet – von einer Punktwolke, über ein reines Visualisierungsmodell bis hin zu einem 3D-Gebäudemodell.

Aus diesem Grund wurde im Projekt Digitaler geoZwilling – sowohl zur Positionierung als auch zur Abgrenzung der einzelnen Begriffe – ein Glossar erarbeitet. Da, wie schon erwähnt, ein Digitaler Zwilling auch zur Vernetzung zwischen unterschiedlichen Disziplinen dient, war die Erstellung des Glossars für die Arbeit in dem Projekt von großer Bedeutung. Wo vorhanden wird auf bestehende Begriffsdefinitionen verwiesen. Nachfolgend die ausgearbeiteten Definitionen und Beschreibungen der Begriffe in tabellarischer Form:

| Begriff   | Definition  |
|---|---|
| Schlagworte   |   |
| <b>3D-Stadtmodell</b><br>Geometrie                            | Bei einem <b>3D-Stadtmodell</b> handelt es sich um ein vektorbasiertes, dreidimensionales, digitales Modell einer Stadt. Das Modell enthält definierte, reale Objekte (z.B. Gebäude, Vegetation, Brücken etc.) in einer festgelegten Qualität. Der Begriff 3D-Stadtmodell sagt jedoch nichts darüber aus, welche Objekte in dem Modell abgebildet werden. Oftmals werden 3D-Gebäudemodelle einer Stadt als 3D-Stadtmodell bezeichnet.<br>Der Begriff 3D-Stadtmodell wird oft als Überbegriff für verschiedene Ausprägungen verwendet und sagt nicht unbedingt aus, ob das Modell auch Semantik und Attribute enthält (siehe <b>semantisches 3D-Stadtmodell</b> ). |
| <b>Semantisches 3D-Stadtmodell</b><br>Geometrie +<br>Semantik | Ein <b>semantisches 3D-Stadtmodell</b> spezifiziert genauer, dass neben der Form (Geometrie) der 3D-Objekte auch die Bedeutung (Semantik) eben dieser im Modell enthalten ist. Während die Geometrie nach dem „wo“ fragt, bezieht sich die Frage der Semantik nach dem „was“.   |
| <b>Visualisierungsmodell</b><br>Geometrie +<br>Textur         | Ziel eines <b>Visualisierungsmodells</b> ist die realitätsnahe Darstellung (bei bestehenden Objekten der Wiedererkennungswert). Neben der Geometrie sind dazu Texturen entweder in Form von Fotos oder generischen Texturen üblich. Die Geometrien müssen dazu keine weiteren Informationen oder Gliederung enthalten.<br>Ein texturiertes 3D-Mesh stellt eine spezielle Ausprägung eines Visualisierungsmodells dar.   |

|   |  |
|---|--|
| <p><b>3D-Mesh</b></p> <hr/> <p>Dreiecksvermaschung, 3D-TIN, 3D-Orthophoto</p> | <p><b>3D-Meshes</b> sind Modelle, welche die Geometrie von Oberflächen durch hochauflösende Dreiecksvermaschung (3D-TIN) darstellen. Texturierte 3D-Meshes enthalten zusätzlich Bildinformation und geben dadurch ein äußerst realitätsnahes Abbild der dargestellten Objekte wieder.</p> <p>Im Kontext von Städten werden 3D-Meshes vielfach aus photogrammetrisch aufgenommenen Luftbilddaten (eventuell durch Ergänzung von Laserscanning Punktwolken) abgeleitet. Ihr wesentliches Merkmal ist, dass alle Oberflächen texturiert sind. Dies geschieht meist über Befliegungen, bei denen eine Schrägluftkamera die üblichen Senkrechttbilder (Nadir) ergänzt.<sup>9</sup></p>  |
| <p><b>3D-Punktwolke</b></p> <hr/>   | <p>Bei <b>3D-Punktwolken</b> handelt es sich um eine irregulär im virtuellen Raum verteilte Ansammlung von Punkten. Diese entstehen u.a. bei der Digitalisierung von Objekten durch unterschiedliche Aufnahmeverfahren oder Sensoren (Laserscanning, Bildmatching, Lichtschnittverfahren, ...). Die Punkte können je nach Entstehungsart noch zusätzliche Information wie Farbwerte oder Intensität (Signalstärkemessung) enthalten.</p>   |
| <p><b>Digitalisierung</b></p> <hr/> <p>Daten/Informationen</p>                | <p>Unter <b>Digitalisierung</b> versteht man die Umwandlung von analogen Informationen in digitale Formate, d.h. Formate, welche sich zu einer Verarbeitung oder Speicherung in digitaltechnischen Systemen eignen.<sup>10</sup></p> <p>Im Prinzip ist jede Datenaufnahme und -auswertung, welche von der Stadtvermessung durchgeführt wird, eine Digitalisierung des Naturstands von Wien (Laserscanning, Luftbildbefliegung, photogrammetrische Auswertung, Straßenbefahrung, terrestrische Vermessung, etc.).</p>   |
| <p><b>Digitalisierung</b></p> <hr/> <p>Prozesse</p>                           | <p>„<b>Digitalisierung</b> ist im Kern der Vorgang, in dem ein Prozess nach Prüfung auf Notwendigkeit bzw. Anwendungsfreundlichkeit und Effizienz und Effektivität unter Einsatz aktueller technologischer Werkzeuge, höchstem Automatisierungsgrad und mit dem Fokus auf Einfachheit und Bequemlichkeit neugestaltet wird. Die Prüfung bzw. Neugestaltung umfasst, beispielsweise bei Bürger*innenservices, die Antragstellung, den Bearbeitungsablauf, die Bezahlung bis hin zur Zustellung alle Teilaspekte des Prozesses.</p> <p>Nicht darunter zu verstehen ist die bloße Elektronifizierung eines bestehenden Teilprozesses oder eventuell eines Gesamtprozesses ohne die vorher erwähnten Begleitprüfungen.“ (siehe Hagler 2018).</p> |
| <p><b>Digitaler Zwilling</b></p> <hr/>  | <p><b>Digitale Zwillinge</b> sind ein aufstrebendes Konzept zur Digitalisierung von Objekten, Prozessen und Systemen. Diese Digitalen Zwillinge (virtuelle Umgebung) können in weiterer Folge für Analysen und Simulation und als gemeinsame Plattform für viele Fachanwendungen genutzt werden.</p> <p>Das Konzept eines Digitalen Zwillings wird mittlerweile in vielen Disziplinen und Bereichen angewandt wie z.B. der Fertigungsindustrie, der Medizin, der Transportwirtschaft, der Fahrzeugindustrie, der Bauwirtschaft (siehe BIM), ... (siehe Lehner und Dorffner, 2020)</p>  |

<sup>9</sup> <https://www.business-geomatics.com/2020/12/08/mit-plexmap-von-geoplex-bundesstadt-bonn-erstellt-3d-mesh/>

<sup>10</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Digitalisierung>

|  |   |
|--|---|
| <p><b>Digitaler geoZwilling</b><br/>Urheber: Lehner und Dorffner, 2020</p> | <p>Der Digitale geoZwilling ist ein semantisches, vektorbasiertes 3D-Stadtmodell, welches neben Gebäuden alle Objekte der Stadt enthält.</p> <p>Der <b>Digitale geoZwilling</b> ist also ein virtuelles Abbild der Stadt und umfasst alle Bestandsobjekte in standardisierter Form. Damit bildet der Digitale geoZwilling die geometrische und semantische Basis/Grundlage für den Digitalen Zwilling der Stadt Wien und knüpft über Schnittstellen („Antennen“) an diesen an.<br/>(siehe Lehner und Dorffner, 2020)</p>  |
| <p><b>Planungszwilling</b><br/>Urheber: Lehner und Kordasch 2021</p>       | <p>Der <b>Planungszwilling</b> ist ein virtuelles Abbild der Zukunft der Stadt. Er verändert sich im Zuge der Planungsphasen. Zu manchen Zeitpunkten können mehrere Varianten gleichzeitig existieren. Dadurch ermöglicht er Szenario-Analysen, die als Entscheidungsgrundlage dienen können.<br/>(siehe Lehner und Kordasch 2021)</p>  |
| <p><b>Digitaler Zwilling der Stadt Wien</b></p>                            | <p>Der <b>Digitale Zwilling der Stadt Wien</b> ist ein lebendiges digitales Abbild der Stadt, das erlaubt, bestehende Prozesse in der Stadt zu monitoren, neue Daten zu generieren, Planungen in Szenarien zu simulieren und damit datenbasiert bessere Entscheidungen zu treffen. Dadurch bietet er einen hohen Mehrwert für die interne Aufgabenerledigung und die Zusammenarbeit mit Bevölkerung, Wirtschaft und Wissenschaft.<br/>(siehe Digitaler Zwilling der Stadt Wien, Leitprojekt Strategie WIEN 2030 – Wirtschaft &amp; Innovation<sup>11</sup>)</p> |
| <p><b>Verknüpfung von Geodaten und Fachdaten</b></p>                       | <p>Unter <b>Fachdaten</b> versteht man alle Daten, welche in Dienststellen gemäß ihren Aufgaben erfasst oder verarbeitet werden.<sup>12</sup></p> <p>Die <b>Verknüpfung von Fachdaten</b> mit Geoobjekten erfolgt über räumliche Zusammenhänge der Datensätze, über eindeutige, in beiden Datensätzen vorkommende Schlüssel oder Verknüpfungstabellen. Das Ergebnis stellt einen Mehrwert in Bezug auf Datenreichtum, Datenhandling und Datennutzung dar.</p>   |
| <p><b>LOD (Level of Detail)</b><br/>Detailierung / Generalisierung</p>     | <p>Das <b>Level of Detail (LOD)</b> von 3D-Stadtmodellen beschreibt die geometrische Detailierung/Generalisierung von 3D-Stadtobjekten. Bezogen auf Gebäudemodelle ist das LOD-Konzept von CityGML das am weitesten verbreitete.<br/>(siehe Lehner und Dorffner, 2020)</p> <p>Vorsicht: Level of Detail (LOD) hat in anderen Disziplinen andere Bedeutungen. In BIM wird LOD z.B. für Level of Development also den Grad der Fertigstellung eines Bauwerksmodells verwendet.<sup>13</sup></p>   |
| <p><b>LOG (Level of Geometry)</b><br/>Detailierung / Generalisierung</p>   | <p>Als <b>Level of Geometry (LOG)</b> wird in BIM der geometrische Detaillierungsgrad, d.h. die Genauigkeit der geometrischen Abbildung eines Objekts in einem digitalen Modell bezeichnet. Er definiert, wie viele geometrische Informationen ein Element besitzt.<sup>14</sup></p> <p>LOG in BIM entspricht damit LOD bei Stadtmodellen.</p>  |

11) <https://www.wien.gv.at/wirtschaft/standort/pdf/wien2030-leitprojekte.pdf>

12) [https://digitales.wien.gv.at/wp-content/uploads/sites/47/2020/12/3\\_DatenVerstehen\\_StW-BasicSchulung\\_20201204\\_OGDoc\\_v1.0-6.pdf](https://digitales.wien.gv.at/wp-content/uploads/sites/47/2020/12/3_DatenVerstehen_StW-BasicSchulung_20201204_OGDoc_v1.0-6.pdf)

13) <https://www.drivecon.de/de/lexikon/lod>



|  |   |
|--|---|
| <b>LOA (Level of Accuracy)</b><br><hr/> Messgenauigkeit          | Das <b>Level of Accuracy (LOA)</b> ist ein Maß dafür, wie nah und richtig ein angegebener Wert zum tatsächlichen, realen Wert gemessen wurde.   |
| <b>Level of Information (LOI)</b><br><hr/> Informationsreifegrad | Das <b>Level of Information (LOI)</b> beschreibt in BIM den alphanumerischen Informationsreifegrad von virtuellen Bauteilen. Pro Planungsphase werden mehr und mehr Eigenschaften definiert, bis schließlich alle Informationen vorliegen, um das Element zu errichten. Nach Errichtung werden (unter der Voraussetzung einer sog. As-Built-Dokumentation) üblicherweise noch weitere, für den Betrieb nötige Informationen hinzugefügt, der LOI steigt also auch nach der Ausführung noch weiter. <sup>15</sup>  |
| <b>CIM (City Information Modeling)</b><br><hr/>                  | Durch die Anreicherung von thematischen Sachinformationen wie Mobilität, Wirtschaft, Umwelt, oder Energie an geometrische Modelle / Geoobjekte, entsteht der Prozess des <b>City Information Modeling (CIM)</b> .<br>CIM fokussiert also auf die Modellierung von Geoobjekten UND Informationen und erstellt dadurch intelligente Daten-angereicherte virtuelle Stadtmodelle, die für Simulationen und Analysen genutzt werden können.<br>(siehe Lehner und Dorffner, 2020)   |
| <b>BIM (Building Information Modeling)</b><br><hr/>              | „Unter <b>Building Information Modeling (BIM)</b> wird in der Baubranche eine innovative Arbeitsmethode im Planungs-, Abwicklungs- und Betreiberprozess verstanden, welche auf digitalen Gebäudemodellen basiert. Das Bauwerk wird vor der Realisierung als Modell im Computer gebaut – „build digitally first“. (...) Diese Modelle enthalten nicht nur rein geometrische Daten für eine dreidimensionale Darstellung oder die Ermittlung von Mengen, wie aus CAD-Systemen bereits bekannt, sondern darüber hinaus werden alphanumerische Daten zu den einzelnen Bauteilen wie Materialeigenschaften, Kosten, Termine und dergleichen in das Modell integriert.“ <sup>16</sup> |

Auf weitere Begriffsdefinitionen zu angrenzenden Disziplinen und Fachrichtungen wie etwa des Informations- und Datenmanagements, der Mixed Reality oder der Echtzeit- und Sensordaten wird an dieser Stelle verzichtet.

### 3. Digitaler geoZwilling – ein virtuelles Abbild der Stadt Wien

Das Konzept des Digitalen geoZwillings wurde bereits 2020 veröffentlicht (Lehner und Dorffner, 2020). Ziel dabei war, die Erstellung der Geodaten der Stadtvermessung, losgelöst von bestehenden gewachsenen Systemen und Strukturen, komplett neu durchzudenken. In Lehner und Dorffner, 2020 wird auch die Geschichte und Entwicklung der Geodaten der Stadtvermessung skizziert. Im Wesentlichen hat es in diesem Bereich zwei markante Meilensteine gegeben. Der erste in den 1980er

Jahren war die Entwicklung der Mehrzweckkarte (MZK) (Belada 1994), die im Kern die noch heute in Verwendung befindlichen Hauptinput-Quellen Photogrammetrie und Terrestrische Vermessung zu einem Kartenprodukt kombiniert hat. Der revolutionäre Ansatz damals bestand darin, Vektordaten von Messverfahren unterschiedlicher Genauigkeit zu einer einheitlichen linien-basierten Kartendarstellung zu verarbeiten. Der zweite Meilenstein war etwa 20 Jahre später als 2002 die Entwicklung weiterer Geodatenprodukte gestartet wurde (Dorffner und Zöchling 2004): die Flächenmehrzweckkarte (eine polygonale Aufbereitung der linienbasierten Mehrzweckkarte unterstützte die Nutzung in GIS-Software), das Baukörpermodell (eines durch Zuweisung von Höhenattributen an die Gebäudeflächen erstellten Gebäude-Blockmodells) und ein hybrides Geländemodell.

14) <https://www.drivecon.de/de/lexikon/log>

15) [https://www.bimpedia.eu/-/1005-lod-\\_\\_\\_-level-of-development#block-36](https://www.bimpedia.eu/-/1005-lod-___-level-of-development#block-36)

16) <https://www.wko.at/branchen/gewerbe-handwerk/bau/BIM-Broschuere.pdf>

Ziel war es, die Input-Datenquellen möglichst mehrfach in verschiedenen Produkten zu verwenden. Für die Erstellung von Gebäudemodellen mit Dachformen wurde ein Ansatz basierend auf zusätzlicher photogrammetrischer Auswertung der Dachlandschaft gewählt. Aufgrund des hohen Ressourcenbedarfs wurden diese Gebäudemodelle nicht flächendeckend, sondern nur für das Stadttinnere, für besondere Gebäude und bei projektbezogenen Anforderungen erstellt. Als flächendeckender Dachmodell Datensatz wurden 2014 und 2015 mit einem halbautomatischen Ansatz generierte einfachere Dachmodelle der ganzen Stadt ergänzt.

Wieder 20 Jahre später – 20 Jahre nach dem zweiten Meilenstein – stehen wir nun vor der nächsten großen Änderung im Bereich der Geodatenproduktion. Im Vergleich zum damaligen Ansatz die gleichen Input-Daten in möglichst vielen Produkten zu verwenden, ist der Kern der Strategie nun diese und potenziell noch weitere Input-Daten auch aus weiteren Messverfahren zur Erstellung von flächendeckenden 3D-Geoobjekten der ganzen Stadt zu verwenden und in einem weiteren Schritt aus diesem Datensatz die bekannten Geodatenprodukte der Stadtvermessung automatisiert abzuleiten. Das Ziel ist also, mehr Ressourcen in die Erstellung, Wartung und Servicierung eines einzigen semantischen, vektorbasierten 3D-Objektbestands zu stecken und die anderen einfacheren oder generalisierten Geodaten daraus abzuleiten. Die Vorteile liegen nicht nur darin, dass nur ein Datensatz und nicht mehrere seriell erstellte Datensätze gepflegt werden müssen, sondern auch, dass für den zentralen 3D-Objektdatensatz und die daraus abgeleiteten Produkte zeitliche und inhaltliche Kohärenz gewährleistet werden kann.

Mit dem Konzept des Digitalen geoZwilling verfolgt die Stadtvermessung Wien somit einen einzigartigen, innovativen Ansatz, zu dem es nach aktuellem Kenntnisstand bis dato weder national noch international vergleichbare Beispiele gibt. Dementsprechend war es nicht oder nur in wenigen Teilbereichen möglich, auf Referenzen zurückzugreifen. In dem PoC wurde daher erarbeitet, ob technische Lösungen für diesen invertierten Ansatz verfügbar sind und das Konzept in weiterer Folge auch produktiv umgesetzt werden kann.

Beim Aufsetzen des Projekts wurde bewusst zwischen nach innen und nach außen gerichteten Projektzielen unterschieden.

Bei den nach innen gerichteten Projektzielen handelt es sich um die notwendigen Bestandteile von der Erstellung des 3D-Objekte bis zur automatisierten Ableitung weiterer Geodatenprodukte:

- Modellierung von semantischen, vektorbasierten 3D-Geoobjekten aller Objekte der Stadt basierend auf 3D-Messdaten (kodierte Punkte und Linien),
- Nutzung von Punktwolken aus unterschiedlichen Technologien in der Modellierung zur Unterstützung bei fehlenden Inhalten in den 3D-Messdaten,
- Entwicklung eines Datenmodells und einer 3D-Objektdatenbank zur Vorhaltung der semantischen 3D-Geoobjekte,
- Konzeption der automatisierten Ableitung von Geodaten aus dem 3D-Objektdatenbestand.

Die Modellierung von flächendeckenden 3D-Geoobjekten hat andere Anforderungen an die Messdaten im Vergleich zu den bisher aus den Messdaten erstellten Geodatenansätzen. Da bewusst auch auf den bestehenden Messdatenschatz der Stadtvermessung aufgebaut werden soll, neue Aufnahme Richtlinien nur bei Neuvermessungen zum Einsatz kommen und ein neuer Standard daher erst langsam über die ganze Stadt aufgebaut werden kann, wurde bei der Modellierung der semantischen, vektorbasierten 3D-Geoobjekte bewusst das zusätzliche Ziel der Nutzung von Punktwolken eingefügt.

Hinsichtlich des Messdatenbestands der Stadtvermessung sei an dieser Stelle erwähnt, dass für diesen Punkt ein parallel laufendes Projekt mit dem Titel “Zentrale Geodatenbank” für Messdaten initiiert wurde. Ziel dieses Projekts ist die Harmonisierung der Objektcodes über alle Messverfahren und Fachbereiche der Stadtvermessung Wien, welche projektbezogene oder flächendeckende Messungen durchführen. Die Grafik in Abbildung 3 skizziert die Vision einer zukünftigen Geodatenlandschaft der Stadtvermessung. In dieser Abbildung sind nicht nur die etablierten Input-Daten aus terrestrischer Vermessung und Photogrammetrie, sondern bereits zusätzliche Digitalisierung von Objekten aus (ALS-)Punktwolken und Mobile Mapping Systemen (MMS) als auch zukünftig angedachte automatisierte Objektextraktionen aus Künstlicher Intelligenz (KI) oder anderen objektbasierten, automatisierten Bild- und Punktwolke-Analysetechniken vorgesehen.

Bei den nach außen gerichteten Projektzielen handelt es sich um Schnittstellen zu Anwendungs-

## Geodatenlandschaft der Stadtvermessung (Vision)

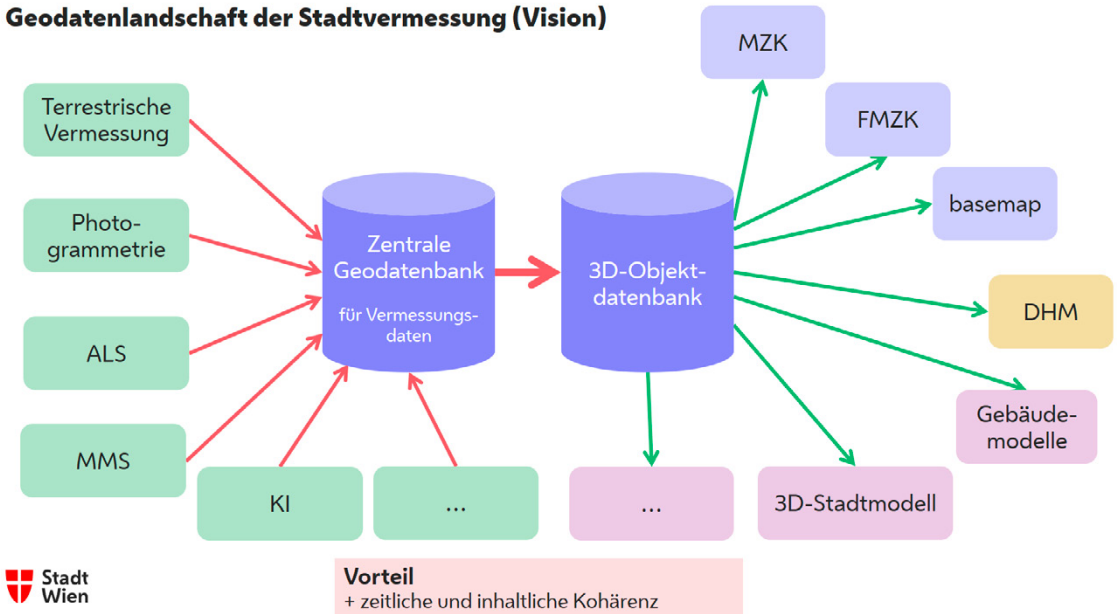


Abb. 3: Vision der Geodatenlandschaft der Stadtvermessung Wien

szenarien eines Digitalen Zwillings der Stadt Wien. Diese sollten von Beginn an mitgedacht werden, da sie auch Auswirkungen auf den Erstellungs- und Reambulierungsprozess des Digitalen geozwillings haben können.

- Durch das Ziel, ein semantisches Modell zu erstellen, hat dieses Modell quasi bereits eine Grundintelligenz. In einer großen öffentlichen Verwaltung gibt es für viele Objekte des öffentlichen Raums aber auch darüber hinaus spezialisierte Fachinformationssysteme, die in der Regel zum Zweck des Erhaltungsmanagements oder als Grundlage für Planungsaufgaben geführt werden. Erst die **Verknüpfung von Geodaten mit diesen Fachdaten** schöpft das volle Potenzial eines Stadtinformationsmodells (**City Information Modelling – CIM**) und trägt zur wechselseitigen Qualitätssteigerung der verknüpften Daten bei. Damit trägt diese Anwendung sowohl hinsichtlich des Abbaus von Datensilos durch die Verknüpfung von Geodaten und Fachdaten als auch durch die Qualitätssteigerung der Datensätze wesentlich zur Data Excellence (DX) Strategie der Stadt Wien (siehe Lutz, 2019) bei.
- 3D-Bestandsdaten sind für viele Hoch- und Tiefbauplanungsprozesse erforderlich. Diese sind auch der Grund, warum öffentliche Verwaltungen hoch qualitative Geodaten erstellen

und pflegen. Planungsprozesse laufen, wie eingangs erwähnt (siehe Tabelle 1), mit anderen Konzepten und Methoden ab. Gegenseitiger Nutzen von Bestandsdaten und Planungsdaten gibt es in vielerlei Hinsicht: Bestandsdaten als Grundlage für Planungen, Planungsdaten nach Realisierung als Unterstützung bei der Reambulierung von Bestandsdaten, Analyse und Vergleich von Planungsszenarien im Kontext des umliegenden Bestands, etc.

Aufgrund der Bedeutung dieses Anwendungsfalls wurde ein zweites Projekt mit dem Titel „Digitaler geoZwilling – UseCase Planung“ bzw. kurz „**Planungszwilling**“ initiiert. Dieser wird mit einer Fördersumme vom Innovationsmanagement der MA 23 – Magistratsabteilung für Wirtschaft, Arbeit und Statistik der Stadt Wien unterstützt.

- Der dritte Anwendungsfall der **urbanen Simulation** bildet die Klammer über die beiden vorhergenannten. Dabei steht sowohl flächendeckende als auch kleinräumige Analysen und Simulationen sowohl des Bestands als auch im Planungskontext zur Beurteilung und Bewertung von Planungsszenarien im Fokus.

Schwerpunkt dieser Publikation sind die Ergebnisse zum Datenmodell. Ergebnisse anderer Projektziele werden zu gegebener Zeit veröffentlicht. Das erste Projektziel der Modellierung von seman-



Abb. 4: Testgebiet rot umrandet (Quelle: Stadtplan3D Grundkarte – Stadtvermessung Wien)

tischen, vektorbasierten 3D-Geoobjekten aller Objekte der Stadt basierend auf 3D-Messdaten (kodierte Punkte und Linien) unter Einbeziehung von Punktwolken sei daher an dieser Stelle nur kurz vorgestellt. Als Basis dieser Aufgabe wurde eine umfangreiche Studie möglicher Software-Werkzeuge am Markt durchgeführt und basierend auf einem Testgebiet prototypisch umgesetzt.

Für die Erstellung eines PoC wurde ein Testgebiet im dritten Wiener Gemeindebezirk entlang des Donaukanals bei der Stadionbrücke definiert (siehe Abbildung 4).

Das Gebiet ist 0.314 km<sup>2</sup> groß. Auf der orographisch linken Seite des Donaukanals befinden sich die grünen Ausläufer des Praters und eine Kleingartensiedlung. Auf der orographisch rechten Seite dicht verbautes Siedlungsgebiet mit alten und neuen Wohnanlagen, als auch öffentlicher Nahverkehr mit vielen Gleisanlagen. Bei der Selektion des Gebietes wurde darauf geachtet, dass möglichst viele Stadtobjekte darin enthalten sind. Dazu zählen: Gebäude mit unterschiedlichen Fassaden-, und Dachdetails, eine Brücke, Straßenbahnschienen, diversestes Straßenmobiliar, Stiegen, Gebäudeinnenhöfe, Gewässer, Wald und inhomogenes Gelände (siehe Abbildung 5).

Die auf Basis der kodierten Messdaten und Punktwolken (siehe Abbildung 6) modellierten 3D-Geoobjekte waren die Grundlage für die Entwicklung des Datenmodells.

#### 4. 3D-Modellierung

Bei der Modellierung von 3D-Objekten einer Stadt, können im Wesentlichen zwei unterschiedliche Modellierungsstrategien angewandt werden:

##### ■ Explizite (direkte) Modellierung: Individuelle Geometrie

Hat jedes Objekt einer Klasse individuelle Ausmaße, Gestalt und Form, so wird es in der Regel explizit, also direkt auf Basis der individuellen Vermessung des Objekts erstellt. Das ist



Abb. 5: Schrägluftbildaufnahme eines Ausschnitts des Testgebietes (Quelle: Schrägluftbild 2020 – Stadtvermessung Wien)

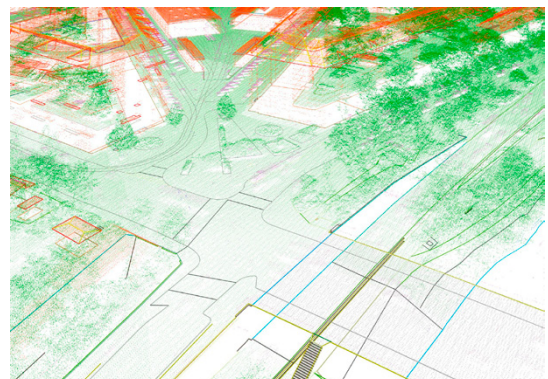


Abb. 6: Darstellung der 3D-Messdaten überlagert mit einer klassifizierten ALS-Punktwolke des Gebiets

klassischerweise bei Gebäuden der Fall. Aber auch bei der Modellierung von semantischen Geländeteilobjekten wie etwa Straßenflächen, Gehsteigen und Wiesenflächen wurde diese Art der Modellierung verwendet.

#### ■ Implizite (indirekte) Modellierung: Implizite Geometrie | Templates | Instanzobjekte

Implizite Modellierung kann dann angewandt werden, wenn eine Objektklasse durch eine gewisse Anzahl von Templates dargestellt werden kann, welche dann z.B. auf Basis von Attributen auf das einzelne Objekt dieser Klasse angepasst, gedreht und skaliert werden. Diese Art der Modellierung wird im Zusammenhang mit 3D-Stadtmodellen sehr oft für die Modellierung von Baummodellen angewandt. In der Regel gibt es hier eine definierte Anzahl von Baum-Templates, die für die Darstellung aller Einzelbäume einer Stadt genutzt werden. Diese Art der Modellierung kann aber auch bei weiteren Objekten der Stadt wie z.B. bei der Modellierung von Straßenmobiliar eingesetzt werden. Im Prinzip handelt es sich hierbei um eine einfache Form der prozeduralen Modellierung. Der große Vorteil dieser Art der Modellierung ist, dass es datenspeicher-technisch eine effiziente Möglichkeit ist, komplexe Templates einmal abzulegen aber unbegrenzt oft zu verwenden. Im Bereich der Planung kann prozedurale Modellierung auch für komplexere Objekte wie Gebäude gut angewandt werden. Für den Zweck der Bestandsmodellierung sind die implizite und die prozedurale Modellierung auf bestimmte Objektklassen beschränkt.

Für diese beiden Modellierungsstrategien werden die in Tabelle 2 angeführten Geometrie-Typen benötigt. Ein Datenmodell und eine 3D-Objekt-datenbank muss also mit allen Geometrie-Typen

und explizit und implizit modellierten Objekten umgehen können.

Stadler und Kolbe (2007) beschreiben räumlich-semantische Kohärenz als Qualitätskriterium für qualitativ hochwertige semantische Modelle. Das bedeutet, dass semantische Information und geometrische Information auf demselben Level der Hierarchie korrelieren müssen. Um das Ziel einer semantischen, vektorbasierten Modellierung des Digitalen geoZwillings erfüllen zu können, muss diese Anforderung durch das Datenmodell und die 3D-Objekt-datenbank realisiert werden können.

## 5. Datenmodell

Die Entwicklung des Datenmodells des Digitalen geoZwillings wurde basierend auf vorab im Zuge des Projektes definierten Anforderungen umgesetzt. Von besonderer Bedeutung ist die Verwendung von offenen Standards, um die Kompatibilität mit Softwareprodukten und Systemen sicherzustellen und potentielle Technology-Lock-ins weitgehend zu vermeiden. Auch eine zukünftige Integration in die Plattform des Digitalen Zwillings der Stadt Wien sowie die Anbindung von Fach-, wie Realtime- und Internet of Things (IoT) Daten über offene Schnittstellen waren ein ausschlaggebender Faktor bei der Auswahl des Datenmodells.

### 5.1 CityGML

CityGML ist ein offener, internationaler OGC-Standard zur Vorhaltung als auch zum Austausch von semantischen 3D-Stadtmodellen. Der Standard basiert auf dem GML (Geography Markup Language) Anwendungsschema, einem erweiterbaren, XML-basierten OGC-Standard und ISO TC211 für den Austausch räumlicher Daten (siehe Gröger et al. 2012).

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| Punkte mit Attributen           | als Einsetzpunkte für Instanzobjekte, z.B. Einzelbäume, Masten, Poller, etc.   |
| Linien mit Attributen           | als Grundlinie von extrudierten vertikalen Flächen, z.B. Zaun, Geländer, etc.  |
| Flächen (BREP) – Space Boundary | zur Beschreibung von Flächenelementen, z.B. Geländeteilflächen, etc. aber auch zur Beschreibung von Grenzflächen von Volumenobjekten |
| Volumen – Space                 | zur Beschreibung von volumenhaften Objekten, z.B. Gebäude, Brücke, Tunnel, Wasserkörper etc.   |

Tab. 2: Geometrie-Typen zur 3D-Modellierung

Der Bedarf an einem Standard für semantische 3D-Stadtmodelle entstand, da jene in der Vergangenheit meist ein rein geometrisches Modell für Visualisierungszwecke darstellten. Dies impliziert, dass sie für nahezu keine Analysen, Simulationen etc. herangezogen werden konnten.

Die Entwicklung des CityGML-Standards wurde von der SIG 3D initiiert, das Resultat war 2008 der CityGML-Standard in der Version 1.0 (siehe Gröger et al. 2008). Aktuell ist CityGML in der Version 2.0 gültig (siehe Gröger et al. 2012), wobei 2022 CityGML 3.0 Standard vom OGC im Conceptual Model veröffentlicht wurde (siehe Kolbe et al. 2022). Jedoch sind in Version 3.0 noch Encoding Standards für Core und einzelne Module ausständig.

Löwner et. al (2012) beschreiben, dass der Anwendungsbereich von CityGML – da es neben der reinen geometrischen Visualisierung auch die Objektsemantik mitspeichert – reine Visualisierungszwecke übersteigt. So bildet der Standard für Anwender\*innen die Grundlage, um 3D-Stadtmodelle für Analysen, Simulationen und Anwendungen einzusetzen. Diese Anwendungsszenarien und Funktionalitäten des Datenmodells unterstützen jene in Kapitel 3 genannten Vorgaben sowie die Vision der Einbettung des Digitalen geoZwilling in einen zukünftigen Digitalen Zwilling der Stadt Wien.

### 5.1.1 Aufbau

CityGML fungiert zuallererst als konzeptuelles Datenmodell. Der Standard bildet sich aus einem Core und diversen thematischen Modulen für die Gliederung diverser Objektgruppen und dem Appearance Modul zur Abbildung objektspezifischer Farben und Texturen (siehe Abbildung 7).

Zudem ist CityGML neben einem Datenmodell auch ein Austauschformat und ein Datenschema für eine 3D-Objektdatenbank. In jenem Bereich wurde die OpenSource Datenbank 3DCityDB von den Partnern TU München, virtualcitysystems und M.O.S.S. entwickelt, welche auf dem CityGML-Datenschema in seiner jeweiligen Version aufbaut, wobei die Einrichtung einer 3DCityDB sowohl auf PostgreSQL und Oracle Instanzen unterstützt wird.<sup>17</sup>

17) <https://www.3dcitydb.org/3dcitydb/>

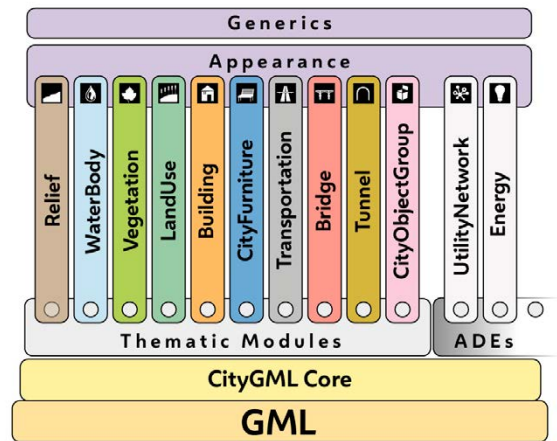


Abb. 7: CityGML 2.0 Thematische Module, abgewandelt nach Löwner et al. 2012

### 5.1.2 Module, Profile & Application Domain Extension (ADE)

CityGML definiert Klassen und semantische sowie topologische Beziehungen von allen Objekten einer Stadt oder Region. Dies wird in den diversen semantischen Modulen des Standards definiert (siehe Tabelle 3). Die Module selbst gliedern sich in ein CityGML-Basismodul und thematische Erweiterungsmodule (siehe Gröger et al. 2012).

Durch jene Modularisierung des Standards können, je nach Anwendungsbereich, neben dem CityGML Core einzelne, benötigte Module angewandt werden. Somit müssen nicht alle CityGML-Module genutzt werden, um dem Standard gegenüber konform zu sein. Handelt es sich um eine Teilimplementierung einzelner thematischer Erweiterungsmodule, so spricht man von einem CityGML-Profil (siehe Gröger et al. 2012).

Neben der Verwendung von CityGML-Profilen, bietet der CityGML-Standard für die Abbildung spezifischer Anwendungsfälle die Möglichkeit der Erweiterung des Datenmodells durch ADE's. (Application Domain Extensions). Diese erweitern das bestehende CityGML-Datenmodell durch die Ergänzung neuer Eigenschaften bestehender CityGML-Klassen oder durch die Einführung und Spezifizierung neuer Klassen (siehe Gröger et al. 2012).

### 5.1.3 Konzepte

CityGML als Datenmodell unterstützt die Vorkhaltung von semantischen 3D-Objekten in verschiedenen Detaillierungsstufen. Allgemein ist der Level of Detail (LOD) eines 3D-Objekts sein

| CityGML Core (Pflichtmodul)   | Relief  | WaterBody   |
|---|---|---|
| Basiskomponenten des CityGML Datenmodells.  | Thematische und semantische Abbildung der Erdreliefs durch Raster, TIN, Bruchlinien oder Massenpunkten. | Thematische und semantische Repräsentation von diversen Gewässerobjekten.                               |
| Vegetation  | LandUse   | Building  |
| Thematische und semantische Abbildung des Geländes in Form von Einzelobjekten (z.B. Baum) und Vegetationsflächen (Wald) | Thematische und semantische Abbildung des Geländes mit zugewiesener Landnutzung.                        | Thematische und semantische Vorhaltung von Gebäude- und Gebäudeteilobjekten                             |
| CityFurniture   | Transportation  | Bridge  |
| Thematische und semantische Repräsentation von Straßenmobiliar, in Form von Modellierungen oder Template-Objekten.      | Thematische und semantische Vorhaltung von diversen Transportwegen als Netzwerk oder 3D-Oberfläche.     | Thematische und semantische Vorhaltung von Brücken- und Brückenteilobjekten                             |
| Tunnel  | CityObjectGroup   | ADE   |
| Thematische und semantische Vorhaltung von Tunnel- und Tunnelteilobjekten.  | Thematische und semantische Sammlung von user-definierten Objekten. (Gruppenkonzept)                    | Thematische und semantische Erweiterung des CityGML-Datenmodells durch Eigenschaften & CityGML-Klassen. |

Tab. 3: CityGML 2.0 Module (siehe Gröger et al. 2012)

primäres Charakteristikum. CityGML 2.0 unterstützt die Vorhaltung von Objekten in fünf Levels of Detail – LOD0 bis LOD4 (siehe Abbildung 8). Der Anstieg der LOD-Stufe impliziert hierbei eine granuliertere geometrische und semantische Definition. Die Notwendigkeit entstand, da modellierte 3D-Objekte je nach Datenverfügbarkeit und Anwendungsbereich in einer unterschiedlichen Detaillierung vorgehalten werden müssen. So ist es möglich, dass ein und dasselbe 3D-Objekt in einem CityGML-Datensatz in verschiedenen LOD-Stufen repräsentiert wird, wodurch jenes für verschiedene Visualisierungsansätze und Analysen eingesetzt werden kann (siehe Gröger et al. 2012).



Abb. 8: LOD-Konzept CityGML 2.0 am Beispiel eines Gebäudes (Biljecki et al, 2016)

LOD0 repräsentiert die planare 2,5D-Darstellung des Footprints von 3D-Objekten, wohingegen LOD1 einen Volumenkörper jener LOD0 Objekte, extrudiert in der Höhe, darstellt (siehe Baukörpermodell). In LOD2 wird bereits eine vereinfachte

Dachformmodellierung und Semantik einzelner Objektbestandteile beschrieben, wobei LOD3 im Vergleich hierzu ein detaillierteres Modell mit modellierten Fassaden- und Dachausprägungen repräsentiert. LOD4 als Endstufe, ergänzt hierzu die Innenraummodellierung, um die Objektmodellierung zu vervollständigen. (Biljecki et al. 2016)

Je nach thematischem Modul können Objekte als **explizite** oder **implizite Geometrie** modelliert werden. Beide Arten der Modellierung können auch unabhängig voneinander in unterschiedlichen LOD-Stufen eines Objekts verwendet werden. Das heißt, die Anforderung der beiden Modellierungsarten ist durch CityGML erfüllt.

Ebenfalls abhängig vom thematischen Modul bzw. auch abhängig von der Größe und Lage eines Objekts kann man als Zusatzinformation zum Objekt auch die **TerrainIntersectionCurve (TIC)**, also die Verschnittlinie des Objekts mit dem Gelände ablegen.

Ein weiteres wichtiges Konzept in CityGML sind **ClosureSurfaces**. Bei diesen Flächen handelt es sich um Flächen, die es in der Realität eigentlich gar nicht gibt und die hauptsächlich dazu verwendet werden, um das Volumen eines Objekts virtuell zu schließen. Diese Art der Flä-

che findet Anwendung z.B. bei der Öffnung eines Tunnels. Hier entspricht die ClosureSurface also der virtuellen Schließfläche, die das Tunnelportal versiegeln würde. Die Begrenzung der Tunnel-ClosureSurface ist dabei durch das Tunnelportal definiert. Eine weitere Anwendung findet sich bei größeren Gewässern. Die WaterClosureSurface entspricht hier allerdings eher der Begrenzung des modellierten Bereichs. Falls also ein Gewässer über den erfassten Bereich hinausgeht, kann an dieser Grenze eine WaterClosureSurface gebildet werden, um das Volumen des modellierten Gewässers zu erfassen. An dieser Stelle ist also auch die Begrenzung der ClosureSurface willkürlich festgelegt und hat keine Repräsentanz in der Natur.

Um Geometrien, die in mehreren Objekten verwendet werden, nicht doppelt speichern zu müssen, verwendet CityGML das Konzept von xLinks aus dem GML-Standard (Gröger et al. 2012). Dabei wird die Geometrie nur bei einem Objekt gespeichert und in dem zweiten Objekt mittels xLink auf die Geometrie im ersten Objekt verwiesen. Bei Gebäudemodellen können damit die thematischen Flächen (Wand, Dach, Boden) mittels xLink auf das Volumen referenziert werden. Weitere Beispiele für die Nutzung von xLinks sind laut Beschreibung im Standard gemeinsame Fassadenflächen von aneinander gebauten Gebäuden bzw. wird im LandUse Modul empfohlen Linienstücke einer Begrenzung zwischen zwei Flächen nur einmal zu speichern und mittels xLink auf das zweite Polygon zu referenzieren. Während das Beispiel der Verlinkung von thematischen Gebäudeflächen zum Gebäudevolumen in der Praxis sehr häufig verwendet wird, werden die anderen beiden im Standard erwähnten Beispiele kaum verwendet. Während diese Art von komplex aufgebauten Datenstrukturen für die Nachführung und Aktualisierung von flächendeckenden semantischen Modellen, wie sie im Digitalen geoZwilling angedacht sind, von Vorteil sind, sind sie für die Abgabe der fertigen Modelle kaum geeignet, da von den meisten Softwareprodukten diese komplexe hierarchische Art der Modellierung nicht gelesen und daher nicht unterstützt wird.

Bei der Befüllung von Attributen gibt es neben Attributfeldern, die abhängig vom Feldtyp (Integer, String, etc.) frei befüllt werden können, auch die Möglichkeit vordefinierte Listen zu hinterlegen. Handelt es sich um eine fix vorgegebene Liste wird sie **Enumeration** bezeichnet. Diese Listen können nicht erweitert werden und Werte, die nicht auf

der Liste enthalten sind, können nicht vergeben werden. **Codelists** auf der anderen Seite enthalten ebenfalls eine vordefinierte Liste an Werten. Diese Listen sind aber flexibler und können auch angepasst werden.

#### 5.1.4 Weiterentwicklung – CityGML 3.0

Im September 2021 wurde CityGML 3.0 Conceptual Mode veröffentlicht (siehe Kolbe et al. 2022), die Encoding Standards der einzelnen Module sind jedoch noch ausständig. Diese werden für eine Unterstützung in Softwareprodukten und die Entwicklung des neuen Datenbankschemas benötigt. Neuerungen umfassen die Überarbeitungen einzelner Module und die Entwicklung neuer Module. Es wurden aber auch grundlegende konzeptuelle Änderungen in manchen Bereichen durchgeführt. Eine weitere nennenswerte Innovation ist, dass 3D-Objekte im CityGML-Standard in verschiedenen Austauschformaten (GML, CityJSON, GeoJSON, Geopackage etc.) encodiert werden können.

Jenes vorher beschriebene LOD-Konzept wurde in CityGML 3.0 komplett revidiert. LOD4 wurde als eigenständiger Level of Detail der Innenraummodellierung aufgelassen, hingegen unterstützt CityGML 3.0 eine Innenraummodellierung in LOD0 bis LOD3 (Kutzner & Kolbe 2018; Löwner et al. 2016).

Das Geometrie-Konzept wurde zum einen stark vereinfacht, aber auch ausgebaut. Es wird nun nur mehr zwischen *Space* und *SpaceBoundary* unterschieden. Ein *Space* ist definiert als Volumen-Objekt, welches von *SpaceBoundaries* umschlossen ist. Im Falle eines Gebäudes kann die Außenhülle durch *SpaceBoundaries* beschrieben werden, während das Gebäudevolumen durch einen *Space* abgebildet ist. Das *Space*-Konzept unterscheidet nun weiter in *logical* und *physical spaces*. Im Zusammenhang mit der Modellierung von Bestandsobjekten kommen die *physical spaces* zum Tragen. *Logical Spaces* erlauben nun aber eine Vielzahl an zusätzlichen Möglichkeiten zur Modellierung von rechtlichen oder technischen 3D-Körpern wie Lichtraumprofilen entlang eines Verkehrsweges oder eines Flächenwidmungsplans. *Physical spaces* können weiter in *occupied spaces* und *unoccupied spaces* unterschieden werden. Volumen-Objekte, die Raum besetzen, z.B. Straßenmobiliar, Baum, Haus, werden durch *occupied spaces* beschrieben während Freiräume wie das Volumen eines Innenraums durch *unoccupied spaces* beschrieben werden.



In einem *unoccupied space* kann man sich also bewegen, in einem *occupied space* nicht. Dieses *Space* Konzept stellt daher eine umfangreiche Erweiterung des bestehenden Standards auf nicht physische Objekte dar (Kutzner et al 2020).

CityGML 3.0 wurde auch noch durch zusätzliche Module erweitert. Das Versioning-Modul ermöglicht es nun auch die "Geschichte" also den zeitlichen Verlauf eines Objekts abzubilden. Dies ist also für eine zeitliche Abbildung von Veränderung des Bestands interessant und ergänzt die vierte Dimension. Die Module Dynamizer und PointCloud spielen für Bestandsmodellierung allerdings im Moment keine besondere Rolle und sind hier daher nur namentlich erwähnt.

### 5.1.5 Nutzung

Wie bereits in der Einleitung (Kapitel 1) erwähnt, ist CityGML bereits zu Beginn der Entwicklung von 3D-Stadtmodellen entstanden. Damals vorhandene 2D und 2,5D GIS-Datenmodelle waren nicht in der Lage Gebäudemodelle einer Stadt abzubilden. Diese Lücke wurde durch CityGML geschlossen. Dennoch war CityGML bereits in der Fassung 1.0 hinsichtlich der Abbildung anderer Stadtobjekte sehr umfangreich. Abgesehen der thematischen Module für Brücken und Tunnel waren bereits alle Module enthalten, die auch in Version 2.0 und 3.0 abgebildet sind.

Dennoch lag der Fokus zu Beginn der Entwicklung von 3D-Stadtmodellen ganz klar bei den Gebäuden. Dieser Umstand lässt sich dadurch erklären, dass Gebäude eine Stadt am stärksten repräsentieren und somit die prägendste Objektklasse darstellen, wodurch die Gebäudemodelle lange dem Begriff 3D-Stadtmodell gleichgesetzt wurden. Dadurch hat sich sehr viel Software-Entwicklung zu 3D-Stadtmodellen in der Tat primär mit Gebäudemodellen beschäftigt und sehr wenig mit anderen Objektklassen.

Obwohl CityGML so flexibel gehalten ist und, wie bereits in der Einleitung erwähnt, auch historisch gewachsene Geodatenlandschaften unterstützt, das heißt, die Verwaltung vom 2D, 2,5D und 3D Geodaten in einer Datenbank, wurde und wird CityGML auch heute noch hauptsächlich für Gebäudemodelle verwendet. Dies lässt sich auch leicht durch frei verfügbare OGD-Datensätze nachvollziehen. Auf CityGML Wiki<sup>18</sup>, Github<sup>19</sup> und der 3D Geoinformation Forschungsgruppe

18) [https://www.citygmlwiki.org/index.php?title=Open\\_Data\\_Initiatives](https://www.citygmlwiki.org/index.php?title=Open_Data_Initiatives)

19) <https://github.com/OloOcki/awesome-citygml>

der TU Delft<sup>20</sup> verlinkte Datensätze von Städten, Regionen oder vereinzelt auch ganzen Staaten enthalten bis auf wenige Ausnahmen ausschließlich Gebäudemodelle. Neben Gebäuden ist laut diesen Referenzlisten manchmal das Gelände in den CityGML Daten enthalten und vereinzelt auch Baummodelle oder Verkehrsflächen. Die Referenzlisten stellen natürlich keinen Anspruch auf Vollständigkeit und zeigen auch nicht, ob es nicht frei verfügbare Datensätze gibt, die mehr thematische Module einsetzen. Dennoch erhält man einen guten Eindruck darüber, wo CityGML auch praktisch zum Einsatz kommt.

Klassische 2D und 2,5D Geodaten werden also nach wie vor eher in etablierten GIS-Datenbanken vorgehalten und nur vereinzelt nach CityGML konvertiert. Ein zweiter Grund für die geringe Nutzung anderer thematischer Module ist trotz des 20-jährigen Bestehens von CityGML die mangelnde Unterstützung in großen Softwareprodukten, zumindest abseits des Gebäude-Moduls.

## 5.2 Digitaler geoZwilling – Datenmodell

Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, ist eines der Ziele des Digitalen geoZwillings die zeitlich und inhaltlich kohärente Bereitstellung diverser Geobasisdatenprodukte (siehe Abbildung 3) – dies inkludiert unter anderem die automatisierte Ableitung eines flächendeckenden, geschlossenen Geländemodells. Mit Fokus auf das Schlagwort "geschlossen" impliziert dies, dass der Digitale geoZwilling alle Geoobjekte der Stadt vorhält und die Summe dieser Objekte insgesamt eine geschlossene Oberfläche ergeben muss.

Folgende Anforderungen wurden daher an das Datenmodell gestellt:

- Ablage aller 3D-Geoobjekte der Stadt.
- Geländeobjekte sollen basierend auf ihrer Begrenzung als semantische 3D-Meshes erzeugt werden und bei nicht-ebenen Objekten durch die Nutzung von Bruchkanten und Stützpunkten in der Fläche eine Form erhalten.
- Vertikale Flächen im Gelände bei Stützmauern sollen abgebildet werden.
- Stellen im Gelände, die durch volumenhafte Objekte verdeckt sind, sollen eine virtuelle Schließfläche erhalten um auch beim Ausblenden der Stadtobjekte ein durchgehendes Geländemodell abbilden zu können.

20) <https://3d.bk.tudelft.nl/opendata/opencities/>

- Attribute der originalen Messdaten zu Messgenauigkeit, Messdatum und Datum der letzten Überprüfung sollen aggregiert an die 3D-Objekte angebracht werden.

Basierend auf diesen Anforderungen wurde geprüft, ob und in welcher Art CityGML geeignet ist die Objekte des Digitalen Zwillings vorzuhalten, wo es sinnvoll ist ein Profil von CityGML zu nutzen bzw. auch wo eine Erweiterung mittels **DigitalgeoTwin ADE** erforderlich ist.

Der zum Zeitpunkt der Entwicklung des Datenmodells des Digitalen geoZwillings gültige CityGML-Standard war jener in Version 2.0. Das Datenmodell wurde basierend auf dieser Version entwickelt, da für die Modellierung und Vorhaltung der Geoobjekte sowohl Software- als auch Datenbankunterstützung des Datenmodells zwingend erforderlich sind. Die Weiterentwicklung von CityGML in Version 3.0 ist für den Digitalen geoZwilling sehr interessant, weswegen eine Überführung des für den Digitalen geoZwilling entwickelten Datenmodells in den zukünftigen Standard in der Version 3.0 vorgesehen ist. Zudem wurde von Seite des Consortiums kommuniziert, dass ein verlustfreies Überführen von CityGML 2.0 in 3.0, wenn auch teilweise Adaptierungen im Datenmodell erforderlich sind, möglich sei.

Die folgenden Unterkapitel beschreiben detailliert die auf CityGML basierte Entwicklung des Datenmodells des Digitalen geoZwillings.

### 5.2.1 LandUse, Transportation & WaterBody

Geländeobjekte im Testgebiet wurden, wie beschrieben, mittels geschlossener 3D-Polylinie und Bruchkanten und Stützpunkten für nicht ebene Geländestücke modelliert und als 3D-Meshes aufbereitet. Die Stützpunkte der Geländeobjekte können dabei aus verschiedenen prozessierten Laserscanning Aufnahmen (ALS, MLS, TLS) stammen oder auch durch diskret vermessene Geländepunkte repräsentiert sein. Es können also auch Fußpunkte anderer Stadtobjekte z.B. Masten als Stützpunkte eines Objekts verwendet werden. In der klassischen hybriden Geländemodellierung werden regelmäßige GRID-Punkte verwendet. Das ist ebenso möglich wie die Nutzung unregelmäßiger Stützpunkte. Unregelmäßige Stützpunkte sind sogar zu bevorzugen, da in diesem Fall nur Stützpunkte eingefügt werden müssen, wo sich die Geländeform tatsächlich ändert. Hinreichend ebene Geländeobjekte können auch ohne Stützpunkte und Bruchkanten erstellt werden. Vertikale

Stützmauern wurden durch vertikale Flächen modelliert.

Das Ziel ist diese 3D-Meshes gemeinsam mit ihrer Semantik in CityGML abzulegen. Da die Geländeobjekte mehrere thematische Module umfassen, wurden sie entsprechend ihrer Semantik auf die Module **LandUse**, **Transportation** und **WaterBody** aufgeteilt (siehe Abbildung 7).

Innerhalb der Transportation-Objekte wurde entsprechend dem CityGML-Standard weiter zwischen **TrafficArea** – also tatsächlichen Verkehrsflächen wie Straßenflächen, Gehsteigflächen, Stiegen, etc. – und **AuxilliaryTrafficArea** – also angrenzenden Flächen wie Verkehrsinseln, etc. – unterschieden. Innerhalb der verschiedenen Module wurde die CityGML class für die Semantik der einzelnen Objekte genutzt. Die Untergliederung in die drei Module als auch die Ablage der meshes als multisurface war bereits durch den CityGML-Standard gedeckt und wurde in dieser Art umgesetzt.

Durch den CityGML-Standard nicht gedeckt war die Anforderung Stellen im Gelände, die durch volumenhafte Objekte verdeckt sind, mittels virtueller Schließfläche zu beschreiben und zu schließen. Um diese virtuellen Flächen ablegen zu können, wurde das Konzept der *ClosureSurfaces* verwendet. Da im LandUse Modul im Standard keine *ClosureSurfaces* definiert sind, wurde mittels der **DigitalgeoTwin ADE** eine eigene **LandUseClosureSurface**-Klasse geschaffen (siehe Abbildung 10).

Topologisch gesehen ist die **LandUseClosureSurface** ein 3D-Mesh, dessen Begrenzung ident zur **TerrainIntersectionCurve** des jeweiligen volumenhaften Stadt-Objekts ist, welches darüber liegt. Eine exakte topologische Modellierung und Verwendung der Messdaten ist also zwingend erforderlich und muss durch die Verarbeitung der Messdaten zu unterschiedlichen Geoobjekten gewährleistet sein. Abbildung 9 zeigt einen Ausschnitt der modellierten Geländeteilobjekte aus dem Testgebiet. Die **LandUseClosureSurfaces** sind darin rot dargestellt.

Da es keine genaueren Angaben zur Unterscheidung der LOD-Stufen bei LandUse gibt, wurden die 3D-Meshes als LOD2-multiSurface abgelegt (siehe Abbildung 10).

Anders als in den Modulen LandUse und Transportation wurde der im Testgebiet befindliche Donaukanal durch zwei in der Begrenzung kongruente Flächen modelliert: einer **WaterSurface**

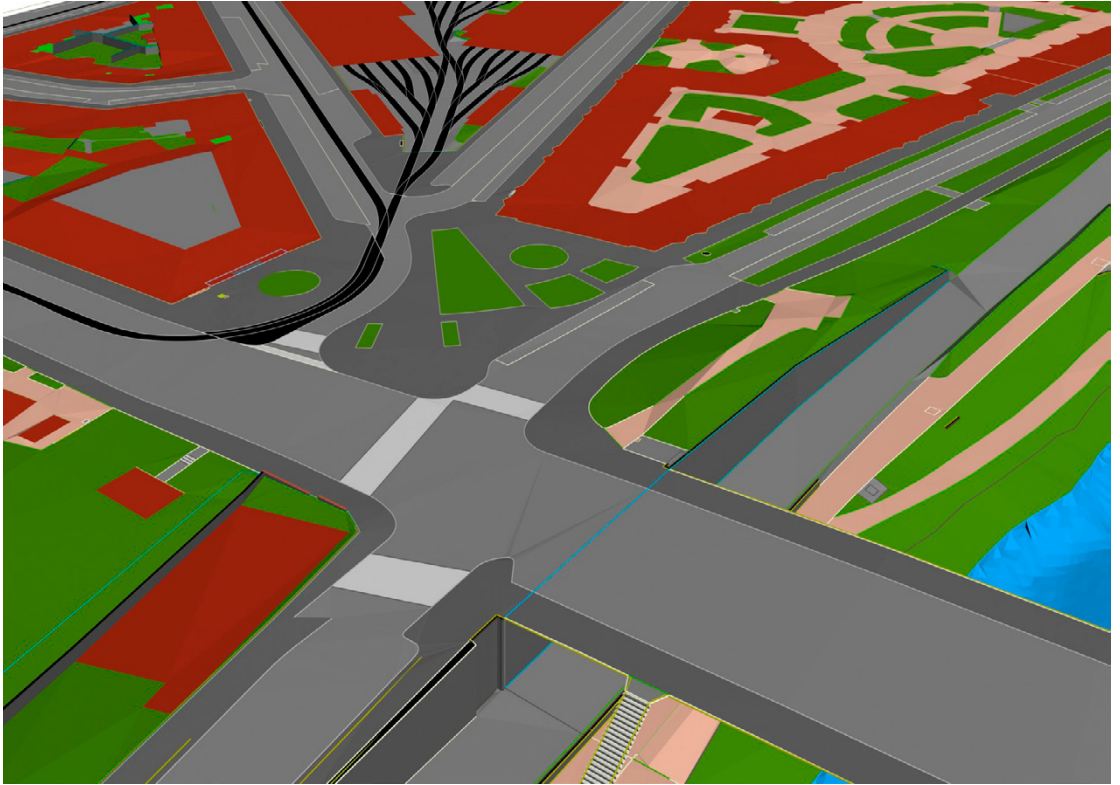


Abb. 9: Modellierte LandUse, Transportation, WaterBody und LandUseClosureSurface Objekte im Testgebiet. LandUseClosureSurface Objekte sind rot dargestellt.

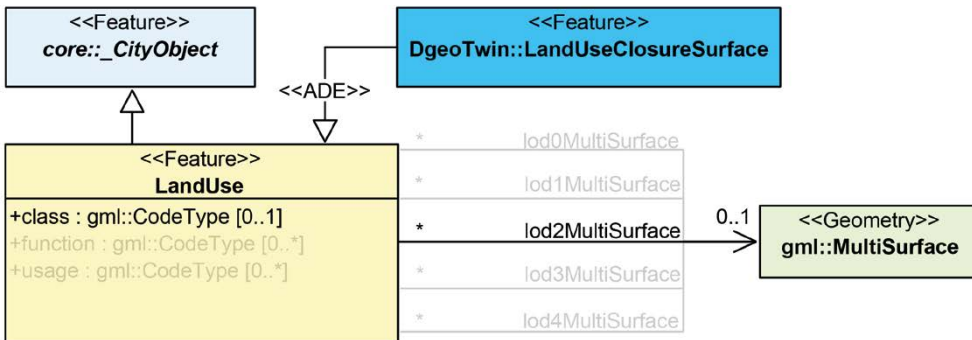


Abb. 10: DigitalgeoTwin Profil und ADE des CityGML Modul LandUse (abgewandelt von Gröger et al. 2012)

für die Wasseroberfläche und einer WaterGroundSurface für das Gewässerbett. Zur Modellierung des Gewässerbetts wurde eine gefilterte und zu einem 1 × 1 m GRID prozessierte Fächerecholotaufnahme herangezogen. Abgesehen davon, dass gerade bei großen Gewässern das Gewässerbett zwingend notwendig ist, um ein Gesamtbild der Natur abbilden zu können, bringt diese Vorgangs-

weise auch den Vorteil, dass das erstellte Modell auch für hydrologische Anwendungen geeignet ist.

Wie in Kapitel 5.1.3 erwähnt, ist im WaterBody Modul eine WaterClosureSurface vorgesehen, um das Gewässer an der Grenze des modellierten Bereichs schließen zu können. Diese wurden auch im Testgebiet für den Abschluss des Donaukanals

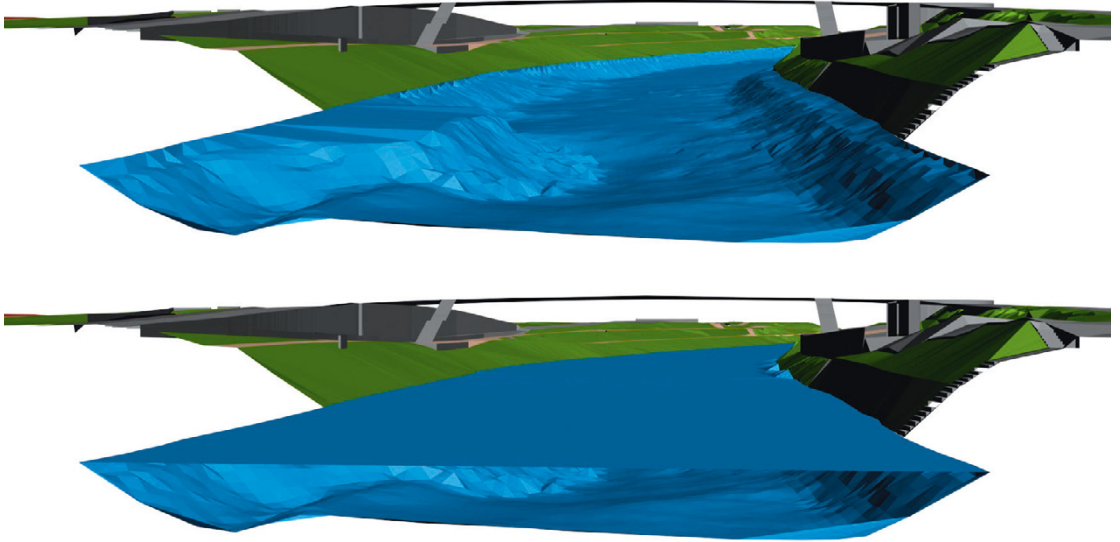


Abb. 11: Modellierter Donaukanal (WaterBody) im Testgebiet: (oben) WaterGroundSurface, (unten) WaterGroundSurface und WaterSurface

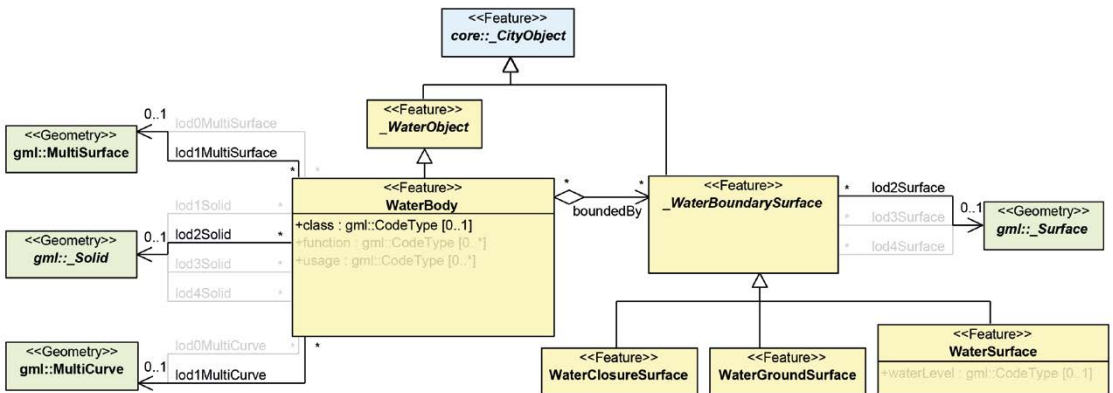


Abb. 12: DigitalgeoTwin Profil des CityGML Modul WaterBody (abgewandelt von Gröger et al. 2012)

verwendet. In Abbildung 11 ist die WaterClosureSurface nicht dargestellt um die Sicht in das Innere des Gewässerkörpers nicht zu behindern.

Zur Modellierung von 3D-Gewässervolumen sind Daten des Gewässerbetts erforderlich, welche nur für größere Gewässer in Wien vorliegen. Neben Echolotaufnahmen können dazu auch Profilmessungen herangezogen werden. Kleinere Gewässerflächen oder Flussverläufe ohne Gewässerbett-daten werden als LOD1 MultiSurface und Bachverläufe ohne flächenhafte Ausdehnung als LOD1 MultiCurve modelliert (siehe Abbildung 12). Objekte dieser Art waren im Testgebiet aber nicht vorhanden.

Alle Geländeteilobjekte wurden also explizit mittels BREP modelliert. Im Fall des Donaukanals wurden zwei Flächen (WaterSurface und WaterGroundSurface) mit kongruenter Begrenzungslinie explizit mittels BREP modelliert und mit einer WaterClosureSurface zu einem Volumen geschlossen.

Um eine Information über den Versiegelungsstatus (SurfaceSealing) bei den Geländeteilobjekten ablegen zu können wurde mittels DigitalgeoTwin ADE ein zusätzliches Attribut definiert, welches mittels codelist SurfaceSealingTypeValue befüllt werden kann. Da dieses Attribut für alle drei Module LandUse, Transportation und WaterBody

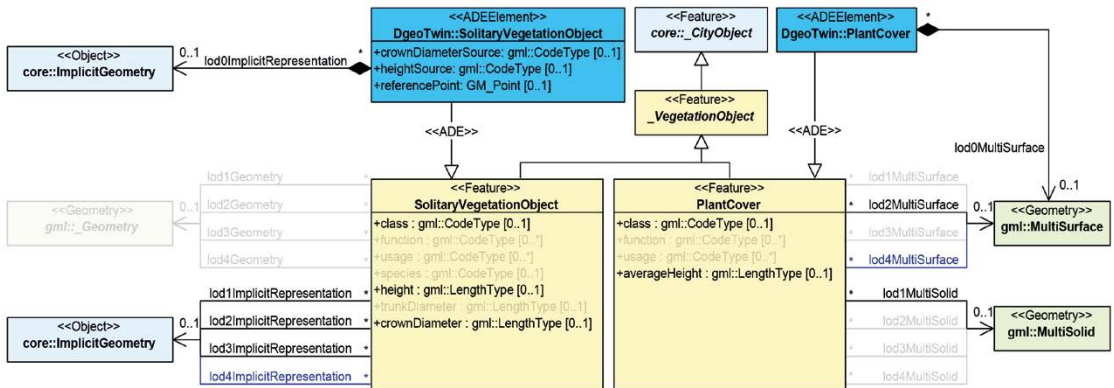


Abb. 13: DigitalgeoTwin Profil und ADE des CityGML Modul Vegetation (abgewandelt von Gröger et al. 2012)

zur Verfügung stehen soll, wurde es nicht in den einzelnen Modulen, sondern im Core-Modul definiert (siehe Kapitel 5.2.4 bzw. Abbildung 21).

Das Relief Modul, welches laut Definition im CityGML-Standard (siehe Tabelle 3) für die Geländerepräsentation herangezogen wird, ermöglicht nur die Ablage des Geländes als 2,5D-TIN, Raster, Bruchlinien und/oder Massenpunkte. Die Besonderheit der Vorgehensweise im Projekt Digitaler geoZwilling liegt darin, dass echte vertikale Wände und Begrenzungen intendiert werden. Daher wurde der Ansatz gewählt, das Gelände voll dreidimensional durch die genannten drei Module und die DigitalgeoTwin ADE abzubilden. Das CityGML-Modul Relief wird somit für das Datenmodell des Digitalen geoZwillings nicht herangezogen.

## 5.2.2 Vegetation & City Furniture

Bei den Modulen Vegetation und CityFurniture (siehe Abbildung 7) wurde sowohl mit impliziter als auch expliziter Modellierung gearbeitet. Gemein haben alle Objekte dieser beiden Klassen, dass sie aus den zugrundeliegenden Messdaten automatisiert erstellt wurden.

Das Modul **Vegetation** des Digitalen geoZwillings lässt sich in seiner Datenmodellierung in zwei Gruppen gliedern: Einzelbäume (SolitaryVegetation) und Baum- und Buschgruppen (PlantCover).

Einzelbäume (SolitaryVegetation) können laut CityGML-Standard entweder als explizite, individuell erstellte Geometrie oder implizit mittels Template-Objekten abgebildet werden (siehe Abbildung 13). Die Erfassung individueller Baumgeometrien ist somit möglich, wird in der Regel aufgrund des hohen Aufwands aber nicht durchgeführt. In den Messdaten sind Einzelbäume als

Punktobjekte mit Attributen definiert. Im Digitalen geoZwilling wurden Einzelbäume unter Nutzung dieser Informationen mittels impliziter Modellierung in unterschiedlichen LOD-Stufen umgesetzt.

CityGML class wurde genutzt, um zwischen den zwei in den Messdaten attributiv gekennzeichneten Klassen Laubbaum und Nadelbaum zu unterscheiden. Für beide Klassen wurden Templates in verschiedenen LOD-Stufen hinterlegt. Die Eigenschaften height und crownDiameter wurden genutzt, um die Skalierung des Template-Baums für den jeweiligen Einzelbaum festzulegen. Metadaten zur Herkunft der beiden Eigenschaften (crownDiameterSource|heightSource) wurden mittels DigitalgeoTwin ADE ergänzt. Zusätzlich wurde die 3D-Punktcoordinate der Baumpositionen als Attribut solitaryVegetationObjectReferencePoint mittels DigitalgeoTwin ADE im Modul Vegetation hinzugefügt. Hinsichtlich der Geometrie wurden folgende ImplicitGeometry Objekte (Template-Geometrien) für die unterschiedlichen LOD-Stufen eingesetzt (siehe Abbildung 14).

- LOD0: ebene Fläche (footprint) des Baums als MultiSurface skaliert mit dem Durchmesser des Baums (crownDiameter).
- LOD1: Ein extrudiertes Volumenobjekt als Solid skaliert mit Durchmesser und Höhe des Baums.
- LOD2: ein einfacher Visualisierungsbaum bestehend aus mehreren gekreuzten Schnittflächen durch den Template-Baum.
- LOD3: eine 3D-Volumengeometrie für einen Baum als MultiSolid bestehend aus einem vereinfachten Baumstamm und einer vereinfachten Baumkrone.



Abb. 14: LOD Definition Einzelbaumobjekte Digitaler geoZwilling am Beispiel Laubbaum

Neben den Einzelbaumobjekten enthält das Modul Vegetation auch Baum- und Buschgruppen. Wie bereits angemerkt, handelt es sich hierbei um eine Sammlung von Vegetationsobjekten, welche als Polygeometrie ausgewertet wurden und keine Einzelobjektposition vorweisen. Diese Objekte wurden im CityGML-Feature PlantCover definiert (siehe Abbildung 13). Auch in diesem Fall wurde parallel zu den Einzelbaumobjekten über die CityGML-Eigenschaft class via codelist zwischen den beiden Vegetationsgruppen unterschieden.

Die PlantCover Objekte wurden, mit Bezug auf das Multi-LOD-Konzept von CityGML, sowohl als LOD0 MultiSurface, LOD1 MultiSolid und auch LOD2 MultiSurface definiert.

- LOD0 MultiSurface wurde durch die ebene Fläche (Footprint) der Baum- oder Gebüschgruppe dargestellt.
- Im LOD1 MultiSolid wurde die geschlossene Geometrie der Vegetationsgruppen mit einer Durchschnittshöhe des normalisierten Oberflächenmodells des jeweiligen Vegetationsbereichs erstellt.
- Das LOD2 MultiSurface hingegen enthält die Geometrie des für den jeweiligen Vegetationsbereich ausgestanzten Oberflächenmodells.

Abbildung 15 zeigt die Modellierung der Geoobjekte des Vegetationsmoduls.

CityGML 2.0 sieht keine Ablage von LOD0 Geometrien für Vegetationsobjekte vor. Diese müssten also via ADE ergänzt werden. Im Zuge des PoC wurde festgestellt, dass die 3DcityDB derzeit ADE-Inhalte, welche ImplicitGeometries verwenden, nicht unterstützt. Lod0ImplicitRepresentation (siehe Abbildung 13) konnte daher nicht mittels ADE ergänzt werden. Da die LOD4 Ebene im Konzept des Digitalen geoZwilling ungenutzt ist, wurde sie als Übergangslösung für die Ablage der LOD0 Daten der ImplicitGeometries der Ein-

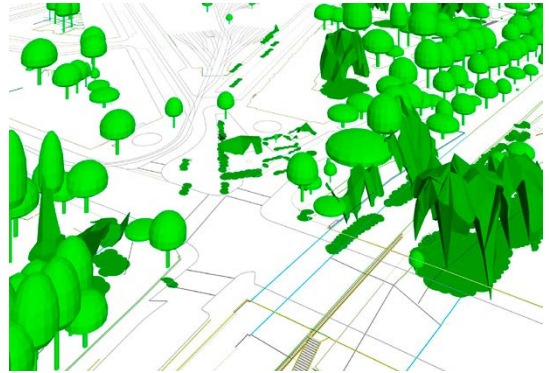


Abb. 15: Modellerte Vegetationsobjekte im Testgebiet (Einzelbaum und Baum- bzw. Gebüschgruppe)

zelbäume als auch der MultiSurface der Vegetationsflächen verwendet.

Stadtmobiliarobjekte wurden im Modul **CityFurniture** abgelegt. In den bearbeiteten Messdaten sind Stadtmobiliarobjekte durch Punkt-, Linien- oder Flächenelemente repräsentiert. Hinsichtlich der Semantik wurde sowohl das class als auch function Attribut im CityFurniture Modul verwendet.

Um implizite oder explizite 3D-Geometrien in der richtigen Dimension erstellen zu können, wurden zusätzliche Attribute height, diameter und azimuth in der **DigitalgeoTwin** ADE definiert (siehe Abbildung 16). Außerdem wird, parallel zur **DigitalgeoTwin** ADE für das Vegetations-Modul, der ursprüngliche 3D-Punkt des Straßenmobiliarobjektes als cityFurnitureReferencePoint abgelegt.

Abhängig von der Grundgeometrie wurden die Stadtmobiliarobjekte unterschiedlich weiterverarbeitet (siehe Abbildung 16):

- Für punktbasierte Objekte wurden sehr einfache Template-Geometrien wie Zylinder oder Quader (Solid) und Flächen (Surface) als lod1Implicit-Representation der unterschiedlichen Objekte definiert. Eine Erweiterung um komplexere 3D-Templates ist in Zukunft möglich. Die Templates wurden entsprechend ihrer Parameter (diameter und height) skaliert.

Die volumenhaften Templates kommen bei Objekten wie Masten, Poller, etc. zum Einsatz. Die flächenhaften Templates finden bei punktförmigen Einbauten wie Kanaldeckel Anwendung.

- Linienbasierte Objekte, bei welchen es sich in der Natur beispielsweise um Zäune oder Geländer handelt, wurden als LOD1 MultiSurface definiert. Objekte dieser Kategorie werden im

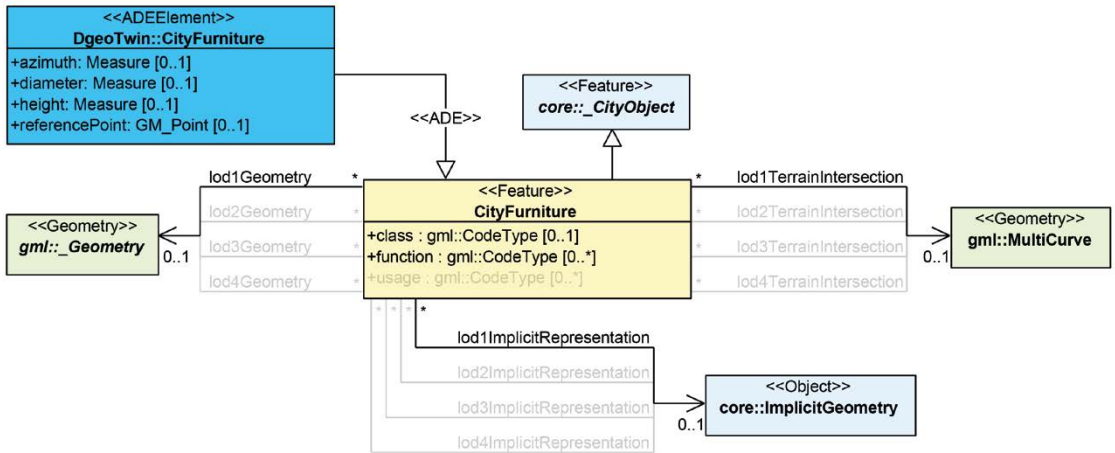


Abb. 16: DigitalgeoTwin Profil und ADE des CityGML Modul CityFurniture (abgewandelt von Gröger et al. 2012)

Fall einer terrestrischen Aufnahme unten am Gelände und im Fall einer photogrammetrischen Aufnahme oben aufgenommen. Abhängig von der Messmethode werden die linienbasierten Objekte daher mittels Default-Werten nach oben oder nach unten extrudiert.

- Im Fall von flächenbasierten Objekten wie Telefonzellen wurde die vermessene Grundlinie als lod1TerrainIntersection abgelegt. In einem zweiten Schritt wurde die Fläche auf dem niedrigsten Punkt des Polygons zu einer horizontalen Fläche verebnet. Diese Grundfläche kann – falls vorhanden – mittels height-Attribut oder alternativ mittels Default-Werten pro Objektklasse zu einem lod1MultiSolid extrudiert werden.

Abbildung 17 zeigt einen Ausschnitt der modellierten CityFurniture-Objekte aus dem Testgebiet.

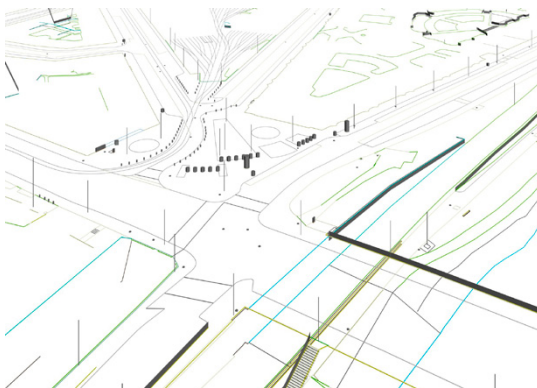


Abb. 17: Modellierte CityFurniture-Objekte im Testgebiet

### 5.2.3 Building, Bridge & Tunnel

Die letzte behandelte Gruppe an Objektklassen betrifft die explizit modellierten Volumenobjekte der Klassen Building, Bridge und Tunnel (siehe Abbildung 7).

Eine ausführliche Studie der Gebäude-LODs und der horizontalen und vertikalen geometrischen Referenzen für den Digitalen geoZwilling wurde bereits veröffentlicht (Lehner und Dorfner, 2020). Die Studie baut auf den Arbeiten von Biljecki et al. 2016 auf. Zur Abbildung von überbauten Gebäudevolumen, das heißt Luftvolumen, die in das Gebäude hineinragen (z.B. überbauter Eingangsbereich, Durchfahrt, Arkadengang, etc.) oder Gebäudevolumen, die aus der Fassade herausragen (z.B. Erker) wurden die verbesserten LOD-Spezifikationen für Gebäude um die Ebene x.4 erweitert. Die horizontalen und vertikalen geometrischen Referenzen nach Biljecki et al. 2016b beschreiben auf welche Höhenpunkte oder Grundrisse die Modelle beziehen. Den einzelnen Referenzen wurden Kennwerte H(0-6) für die Höhenwerte und F(0,d,1) für die Grundrisse zugewiesen. Ein LOD1 Blockmodell kann z.B. bis zur Höhe der Dachkante (H0), der Traufe (H1) oder des Dachfirsts (H5) beziehen. Der Grundriss eines Gebäudemodells kann sich auf die bebaute Fläche (F0), die projizierte Dachfläche (F1) oder eine um einen Offset reduzierte projizierte Dachfläche (Fd) beziehen. Biljecki et al. 2016b argumentiert, dass diese Metadaten zu Gebäudemodellen oftmals fehlen, für die Anwendung von Gebäudemodellen in Analysen und Simulationen aber wichtig sind, da sie z.B. das Volumen eines Gebäudemodells

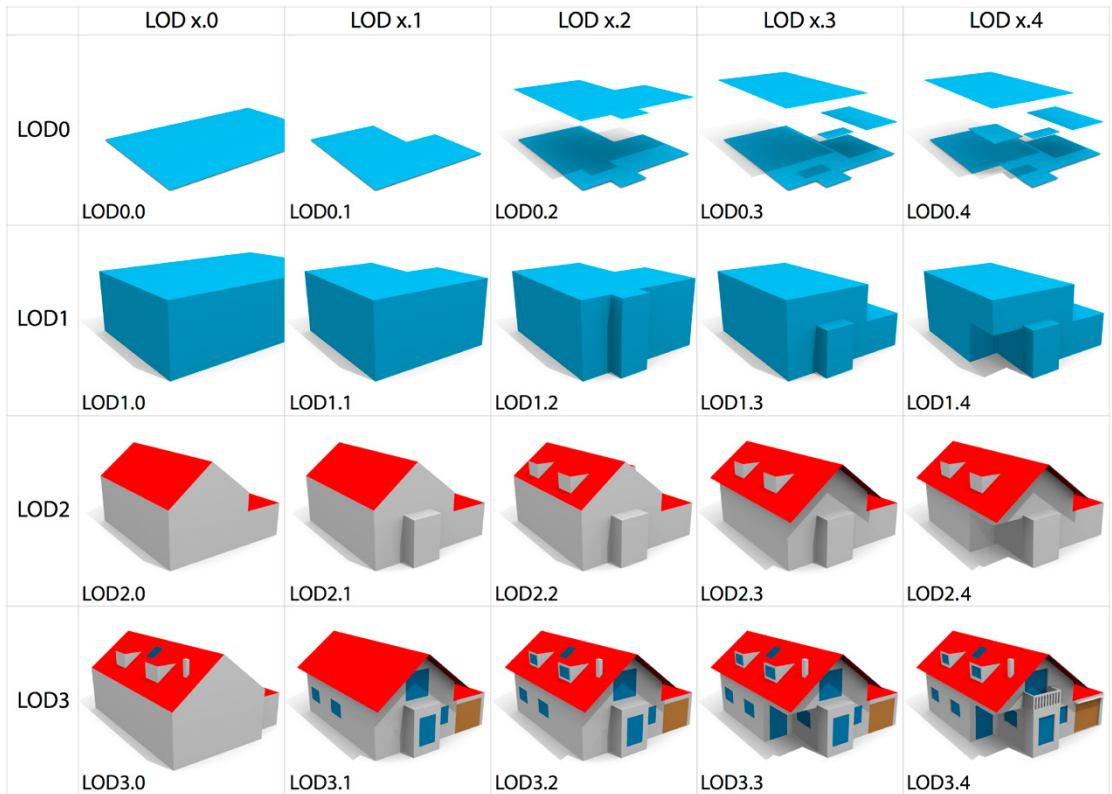


Abb. 18: Untergliedertes Building LOD-Konzept (siehe Lehner und Dorffner, 2020 Weiterentwicklung von Biljecki et al. 2016)

wesentlich verändern und daher angegeben werden sollten.

Als Ziel für den Digitalen geoZwilling wurde LOD2.4 mit horizontaler geometrischer Referenz F0, das entspricht der tatsächlich bebauten Fläche, definiert (siehe Abbildung 18).

Für die Entstehung der 3D-Gebäudemodelle werden die ausgewerteten und kodierten Linien der terrestrischen und photogrammetrischen Vermessung durch Messungen aus Befahrungsdaten ergänzt. Wie eingangs erwähnt, werden in bestimmten Bereichen Punktwolken zur Unterstützung verwendet. Dies spielt zum Beispiel bei der Erkennung der Verschnittlinie von Gebäude und Gelände in Innenhöfen eine Rolle. Im ersten Schritt erhält man ein detailliertes, semantisches Liniengerüst, welches nach einer topologischen Bearbeitung regelbasiert und großteils automatisiert zu thematischen Gebäudeflächen (RoofSurface, WallSurface, OuterFloorSurface, GroundSurface, etc.) übersetzt wird. Diese thematischen Gebäudeflächen umschließen zusammen das Gebäudevolumen.

Die grundsätzliche Überlegung ist, durch das Weglassen von Details und Generalisierung der Geometrie, niedrigere LODs automatisiert abzuleiten. Lässt man beispielsweise die Dachdetails und den Dachüberhang bei einem LOD2.4 Gebäude weg, erhält man ein LOD2.1 Gebäude. Bildet man aus einem Gebäudeteil mit einer bestimmten Dachform eine planare Fläche auf der Höhe der Traufe, der mittleren Dachhöhe oder der Firsthöhe, ergibt sich ein LOD1.4 Gebäude mit unterschiedlicher vertikaler geometrischer Referenz (siehe Lehner und Dorffner, 2020, Biljecki et al. 2016). Stellt man von diesem Modell nur die horizontalen Flächen und kein Volumen mehr dar, reduziert es sich zu einem LOD0.4 Modell. Berechnet man für diese Flächen ein umschließendes ebenes Rechteck entsteht ein LOD0.1 Grundriss. Abhängig von der konkreten Anforderung kann man also eine Vielzahl einfacherer Gebäudemodelle ableiten. Dennoch ist die LOD2.4 Stufe auch ein gutes Grundlagemodell für eine weitere Detaillierung. Durch Integration von Fenstern und Türen und weiterer Dachdetails entsteht ein LOD3.3 oder



LOD3.4 Modell. Das Building Modul von CityGML sieht pro LOD-Stufe nur ein Modell vor. Es können daher nicht beliebig viele LOD-Stufen im Building Modul abgelegt werden. Eine Vorprozessierung einfacherer LOD-Stufen und Ablage im Building Modul macht dennoch Sinn, da diese dann ohne weitere Prozessierung jederzeit zur Verfügung stehen. Welche einfacheren und generalisierten LOD-Stufen neben dem LOD2.4 Modell im Building Modul abgelegt werden sollen, wurde im Rahmen des PoC noch nicht festgelegt und ist für den Digitalen geoZwilling noch zu spezifizieren.

An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die TerrainIntersection der Gebäudemodelle kongruent zur Begrenzungslinie der jeweiligen LandUseClosureSurface sein muss und damit die topologische Verbindung zwischen dem LandUse und dem Building Modul darstellt.

Dem Tunnel Modul wurde im PoC weniger Beachtung geschenkt, zumal kein Tunnel im Testgebiet vorhanden ist. Jedoch gab es diesbezüglich theoretische Überlegungen, vor allem hinsichtlich der virtuellen Schließflächen der Tunnelleingänge. Wie in Kapitel 5.1.3 erwähnt, ist im Tunnel Modul eine TunnelClosureSurface vorgesehen, um ein geschlossenes, wasserdichtes Tunnel-Volumen erstellen zu können. Diese Fläche ist ident zur LandUseClosureSurface des Tunnels und kann daher mittels xLink auf die TunnelClosureSurface referenziert werden.

Die im Testgebiet liegende Stadionbrücke wurde im Bridge Modul abgelegt. Hier gilt analog zum Building Modul, dass die TerrainIntersection der

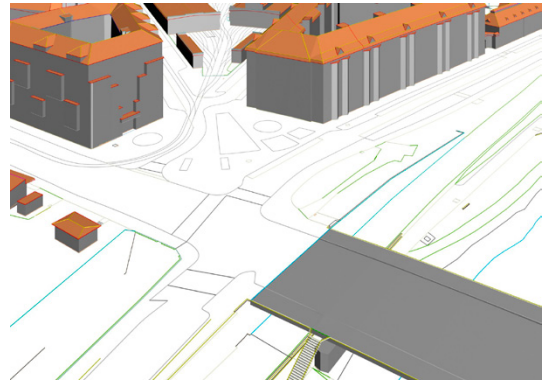


Abb. 19: Modellerte Building- und Bridge-Objekte im Testgebiet

Brücke die Begrenzung der LandUseClosureSurface an der jeweiligen Stelle darstellt.

Abbildung 19 zeigt einen Ausschnitt der modellierten LOD2.4 Gebäudemodelle und der Stadionbrücke aus dem Testgebiet.

### 5.2.4 Core

Das CityGML Core-Modul umfasst die Basis-komponenten des CityGML Datenmodells (siehe Tabelle 3 bzw. Abbildung 20).

Das Core-Modul enthält auch einige über alle Module hinweg definierte Attributfelder, wie z.B. RelativeToTerrainType oder RelativeToWaterType, welche (optional) genutzt werden können, um die vertikale Beziehung eines Objekts zu Gelände und Wasserfläche abzulegen. In diesem Zusammenhang wäre eine Erweiterung um das Attribut +is-Terrain wünschenswert um Objekten in LandUse,

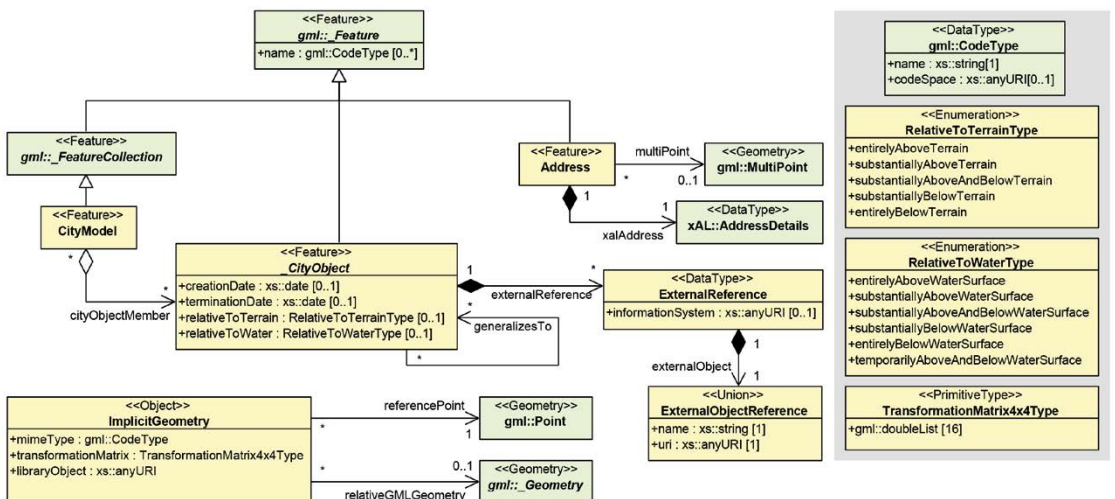


Abb. 20: UML-Diagramm des Core-Moduls in CityGML 2.0 (siehe Gröger et al. 2012)

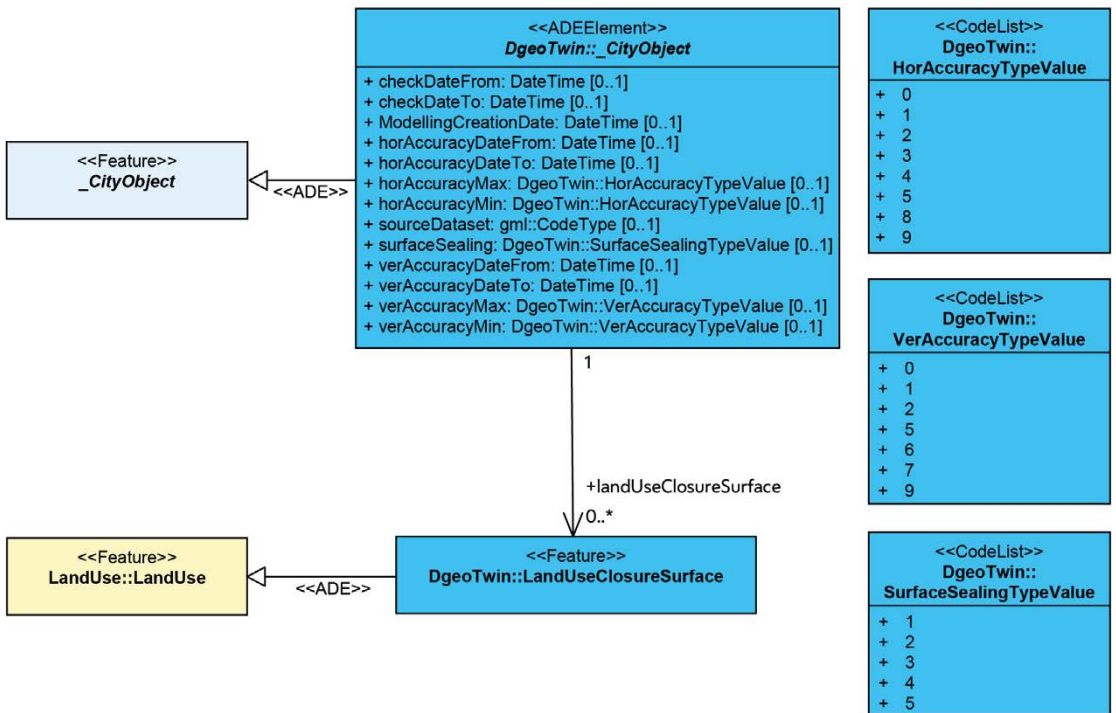


Abb. 21: DigitalgeoTwin ADE des CityGML Core Modul

Transportation und WaterBody, die das Gelände darstellen, entsprechend attributieren zu können. Da es sich bei dem Attribut RelativeToTerrainType allerdings um eine Enumeration handelt (siehe Kapitel 5.1.3), kann die Liste an Werten nicht geändert werden zumal der Wert +isTerrain in der Liste auch semantisch nicht ganz korrekt wäre. Bei einer Weiterentwicklung der *DigitalgeoTwin* ADE könnte +isTerrain als Zusatzattribut der CityObject Klasse hinzugefügt werden. Alternativ kann die Erweiterung der aktuellen Version des Standards um ein Zusatzattribut +isTerrain im Zuge eines ChangeRequest bei der CityGML StandardWorkingGroup bei OGC eingebracht werden.

Um den Informationsgrad (Level of Information, LOI) der Objekte hinsichtlich zeitlicher und geometrischer Qualitätsangaben erweitern zu können, wurden im Zuge der *DigitalgeoTwin* ADE Attribute im Core Modul ergänzt (siehe Abbildung 21), welche relevante Metadaten-Informationen aus den Ursprungsdaten (Messpunkten und -linien) zu Vermessungsart, Herkunft und Genauigkeit für jedes 3D-Geoobjekten separat aggregiert. Teile dieser Attribute werden über definierte Codelists befüllt. Hinter den Integerwerten der Codelists (siehe Abbildung 21) stehen über Lookup-Tabellen (LUT) konkrete Werte oder Bezeichnungen.

Die zeitlichen Qualitätsangaben betreffen den Zeitraum der Vermessung getrennt nach Höhe (verAccuracyDateFrom, verAccuracyDateTo) und Lage (horAccuracyDateFrom, horAccuracyDateTo). In der Regel werden Höhe und Lage gleichzeitig aufgenommen. Dennoch kann es auch vorkommen, dass Höhe und Lage durch unterschiedliche Messverfahren getrennt aufgenommen werden und daher auch zeitlich getrennt gemessen werden. Weitere zeitliche Qualitätsangaben betreffen den Zeitraum der letzten Überprüfung der Messdaten (CheckDateFrom, CheckDateTo) und schließlich den Zeitpunkt der Modellierung der 3D-Geoobjekte (ModellingCreationDate).

Die geometrischen Qualitätsangaben betreffen den Level of Accuracy (LOA). Auch hier wurden Genauigkeitsbereiche angegeben, da ein Objekt aus Messdaten, die durch mehrere Messverfahren aufgenommen wurden, erstellt werden kann. Die Angaben sind ebenfalls in Höhe (verAccuracyMin, verAccuracyMax) und Lage (horAccuracyMin, horAccuracyMax) getrennt. Die unterschiedliche Höhen- und Lagemessgenauigkeit der eingesetzten Messverfahren ist dabei berücksichtigt.

Das Attribut SurfaceSealing wurde für die Module LandUse, Transportation und WaterBody definiert (siehe Kapitel 5.2.4).

## 6. Zusammenfassung und Ergebnis

Eine Großstadt zu managen und für die Zukunft weiterzuentwickeln ist eine große Herausforderung. Deshalb beschäftigen sich aktuell viele Stadtverwaltungen mit dem Thema eines Digitalen Zwillinges der Stadt, um diese Herausforderung in Zukunft besser meistern zu können. Die Herangehensweisen sind dabei durchaus sehr unterschiedlich und abhängig davon, welche Anwendungsfälle beim Aufbau einer Infrastruktur für einen Digitalen Stadtzwilling im Fokus stehen. Geodaten spielen als Grundlage jedoch immer eine Rolle.

Genau mit dem Aspekt zukünftiger Geodaten beschäftigt sich das Projekt Digitaler geoZwilling der Stadtvermessung Wien. Ziel ist ein semantisches, vektorbasiertes Modell der ganzen Stadt und aller Objekte darin, welches durch Semantik bereits über eine gewisse "Intelligenz" verfügt und als geometrische Grundlage für den Aufbau eines Digitalen Zwillinges der Stadt Wien dienen soll. Ein Teilaspekt des Projekts war die Auseinandersetzung mit verfügbaren Datenmodellen und der Frage, ob CityGML als offener, unabhängiger OGC Standard geeignet ist den Digitalen geoZwilling abzubilden.

CityGML bietet viele Möglichkeiten und ermöglicht auch die Nutzung historisch gewachsener, konventionell (=getrennt) erstellter Datensätze. Nach intensiver Auseinandersetzung mit CityGML kann die eingangs gestellte Frage mit "ja" beantwortet werden. Alle Objekte des Digitalen geoZwillinges können in CityGML verwaltet und vorgehalten werden. Unterschiedliche Modellierungsstrategien sowohl von explizit modellierten Flächen (BREP) und Volumen (Spaces), als auch implizit mittels skaliertes Templates, werden unterstützt. Ein Profil für den Digitalen geoZwilling wurde definiert, um den Standard auf die genutzten Module und Attribute einzuschränken (siehe Abbildung 22). Mittels der eigens entwickelten *DigitalgeoTwin* ADE (siehe Abbildung 22) wurden zusätzliche Attribute definiert und eine zusätzliche Objektklasse *LandUseClosureSurface* eingeführt, welche das bestehende Konzept der *ClosureSurfaces* verwendet und vor allem dafür relevant ist, später aus dem Digitalen geoZwilling andere Geodaten wie ein Geländemodell oder eine Stadtkarte automatisiert ableiten zu können.

Das Relief Modul wird im DigitalgeoTwin Profil aktuell nicht verwendet, da das Gelände durch einzelne Geländeteilobjekte der Module *LandUse*, *Transportation* und *WaterBody* und die in der

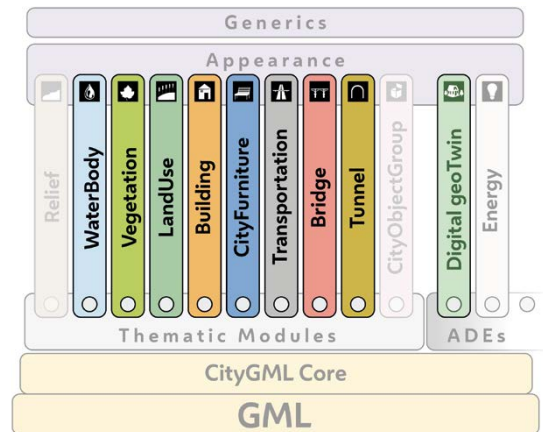


Abb. 22: DigitalgeoTwin Profil und ADE basierend auf CityGML 2.0

ADE definierte *LandUseClosureSurface* komplett abgedeckt wird. Ein wesentlicher Vorteil dieser Vorgangsweise ist auch, dass die Geländedarstellung nicht mehr auf 2,5D – welche durch herkömmliche Geländemodell-Formate vorgegeben ist – begrenzt ist. Es sind sowohl vertikale Wände, als auch Überhänge in der Geländedarstellung des Digitalen geoZwillinges abbildbar.

Das Thema der *CityObjectGroup*, welche eine Gruppierung von mehreren Objekten zu einer Gruppe ermöglicht, wurde im PoC nicht behandelt, da hier keine neuen Objekte abgelegt werden, sondern eben nur bestehende gruppiert werden können.

Abbildung 23 zeigt die Ergebnisse des PoC des Digitalen geoZwilling der Stadt Wien in dem Testgebiet.

## 7. Ausblick

In Kapitel 3 wurde auch auf die externen Projektziele, welche die Schnittstellen des Digitalen geoZwillinges zum Digitalen Zwilling der Stadt Wien behandeln, eingegangen.

Das Thema der Fachdatenverknüpfung ist dabei eines der zentralen Schnittstellen-Themen. CityGML bietet mit dem Attribut der *ExternalReference* bereits ein Attributfeld, welches die Ablage einer ID aus einer anderen Datenbank ermöglicht. Verknüpfungen zwischen unterschiedlichen Systemen und Verwaltungsprozessen auf Objektebene zu bilden sind aber in der Regel durchaus komplexer und benötigen umfangreichere Möglichkeiten. Analysen und PoCs zu diesem Thema wurden bereits gestartet, sind aber noch in Arbeit.

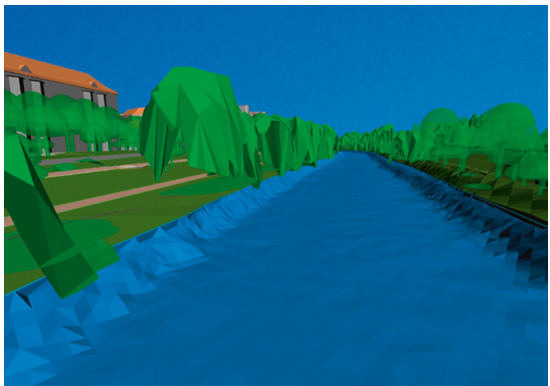
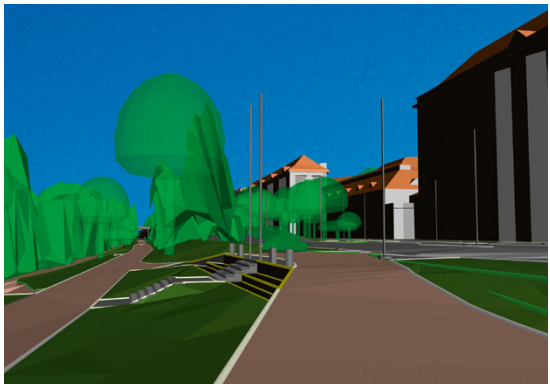
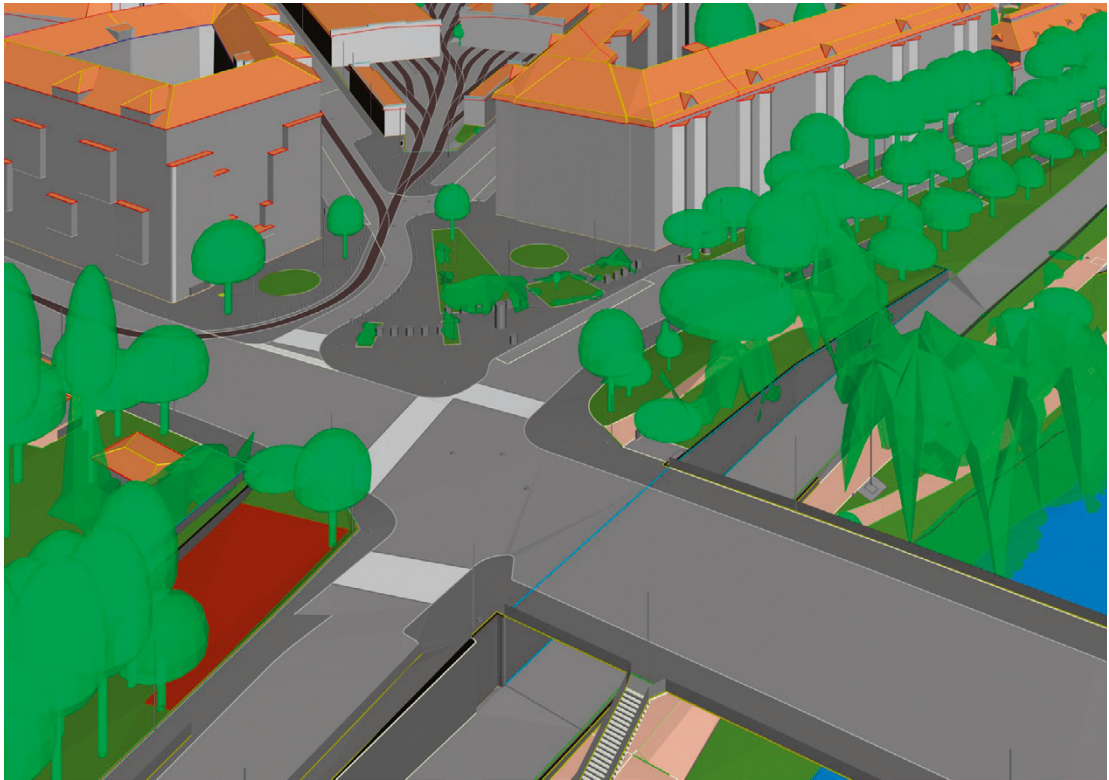




Abb. 23: Modellerte 3D-Geoobjekte im Testgebiet

Der Planungs-UseCase zielt auf das virtuelle Bild der Zukunft der Stadt ab, welches sich im Entwicklungsprozess der Planung durch verschiedene Planungsstadien sehr oft ändert, in Varianten verbreitert und schlussendlich in sehr detaillierten Ausführungsplänen in den Bestand übergeht. In diesem Bereich werden sehr unterschiedliche Planungswerkzeuge und sowohl attributive (LOI) und geometrische (LOD) Detaillierungsstufen verwendet. Beim Umgang mit diesem Anwendungsfall benötigt es also andere Datenmodelle und Herangehensweisen als bei der Modellierung von Bestandsdaten.

Im PoC des Digitalen geoZwillings wurden ein *DigitalgeoTwin* Profil und eine ADE basierend auf CityGML 2.0 erstellt. Die aktuell nur als Conceptual Model veröffentlichte Version CityGML 3.0 bringt einige interessante Neuerungen mit sich. Das LOD-Konzept wurde hier vereinfacht, wodurch der in CityGML 2.0 erforderliche Hilfsgriff LOD0 Modelle der Vegetation auf LOD4 abzulegen nicht mehr notwendig ist. Eine Überführung des DigitalgeoTwin-Profiles und ADE ist daher im Rahmen der Implementierung und Produktivsetzung angedacht.

Das vorgestellte Space Konzept bringt neue Möglichkeiten außerhalb der Modellierung des Naturstands mit sich. Dieser Aspekt betrifft somit nicht den Digitalen geoZwilling an sich, ist aber

dennoch für das Thema eines Digitalen Zwillings der Stadt Wien relevant und gilt daher untersucht zu werden.

In Kapitel 5.1.4 wurde auf die Möglichkeit eingegangen, mittels Versioning Modul in CityGML 3.0 die zeitliche Veränderung der Stadt abzubilden. Für das Verstehen einer Stadt ist oftmals auch ein Blick in die Vergangenheit notwendig, damit wird auch dieses Thema an Bedeutung gewinnen und bei der Implementierung des Digitalen geoZwillings Berücksichtigung finden.

Als Klammer darüber liegt das Thema der urbanen Simulation. Je nach Fragestellung benötigt man sehr unterschiedliche Daten eines Digitalen Stadtzwillings. Je mehr Daten bereits auf Objektebene verknüpft sind und ohne Vorbearbeitung zur Verfügung stehen, desto mehr Simulationsanwendungen werden in Zukunft als Unterstützung für schnelle und agile Entscheidungsprozesse zur Verfügung stehen.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass CityGML ein komplexes und umfangreiches Datenmodell ist. Es ermöglicht die Konfiguration und Erweiterung auf eigene Bedürfnisse, benötigt dazu aber eine intensive Auseinandersetzung. Aus der Sicht von Geodatenproduzenten ist CityGML in der Entwicklung eines spezifischen 3D-Datenmodells wie für den Digitalen geoZwilling ein sehr gutes Fundament, benötigt aber Expertenwissen

in der Erstellung. Aus der Sicht von Datennutzern kann jedoch bemängelt werden, dass CityGML in kommerzieller Software teilweise noch nicht ausreichend unterstützt wird. So wird bei manchen Softwareprodukten – aufgrund der aktuellen Praxis in der Nutzung von CityGML – oft nur das Gebäudemodul unterstützt, während die anderen thematischen Module und damit viele Objektklassen nicht unterstützt werden. Aus diesem Grund ist das Konzept der LOD-Stufen auch nur für Gebäude gut erforscht und durch viel Literatur beschrieben. Zu anderen thematischen Modulen gibt es weit weniger bis gar keine Beschreibung zum LOD-Konzept. Positiv hervorzuheben ist die kürzliche Entwicklung eines Plugins für QGIS, welches das direkte Laden von in einer 3DCityDB abgelegten Objekten aller CityGML Module in der open source GIS-Software QGIS unterstützt.<sup>21</sup>

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim ganzen Projektteam des Digitalen geoZwillings, besonders bei Blanca Sala Herrera, Franz Eisenmagen, Peter Ilias und Gerhard Sonnberger, den Kolleg\*innen, die sich bereits im Rahmen des Arbeitspakets der Modellierung auf den Paradigmenwechsel in der Geodatenbearbeitung eingelassen und damit tatkräftig an der Realisierung des PoC mitgearbeitet haben. Danke auch an Peter Ilias für die Erstellung der 3D-Visualisierungen der Ergebnisse des Testgebiets und Lorenz Glatz für die Unterstützung bei einleitenden Abbildungen.

### Referenzen

- Belada, P. (1994). Die Mehrzweckstadtkarte, geometrische Grundlage für das Wiener GIS – Stand des Projektes, VGI - Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 82, 162–171
- Biljecki, F., Ledoux, H. & Stoter, J. (2016). An improved LOD specification for 3D building models. Computers Environment and Urban Systems. 59. 25-37. 10.1016/j.compenvurbysys.2016.04.005.
- Biljecki, F.; Ledoux, H.; Stoter, J. & Vosselman, G., (2016b), The variants of an LOD of a 3D building model and their influence on spatial analyses, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 116, 42-54
- Dorffner, L. & Zöchling, A. (2004). Das 3D-Stadtmodell von Wien – Grundlage für Planungsaufgaben und Visualisierungen, AGIT, Salzburg, Austria, Wichmann.
- Gröger, G., Kolbe, T. H., Nagel, K. & Häfele, K.-H. (2012). OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard
- Hagler, M. (2018). Digitalisierung Magistratsbereich - IKT-Teilstrategie, Magistratsdirektion der Stadt Wien, Geschäftsbereich Organisation und Sicherheit, Prozessmanagement und IKT-Strategie
- Kolbe, T. H., Kutzner, T., Smyth C. S., Nagel, C., Roensdorf, C. & Heazel, C. (2022): OGC City Geography Markup Language (CityGML) Part 1: Conceptual Model Standard

21) <https://github.com/tudelft3d/3DCityDB-QGIS-Loader>

Kutzner T., Kolbe T.H. (2018) CityGML 3.0: sneak preview, PFGK18-Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformatik-Kartographie, 37. Jahrestagung in München 2018, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., 27:835–839

Lehner H. & Dorffner L. (2020): Digital geoTwin Vienna: Towards a Digital Twin City as Geodata Hub. In: Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) 88:63–75. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00101-4>

Lehner, H. & Kordasch, S. L. (2021): Digitaler geoZwilling - Was macht geo mit dem Zwilling?, TOGI Symposium – Zepelin Universität, <https://www.zu.de/institute/togi/assets/pdf/symposium-2021/SG04-Lehner-Kordasch-210613-Digitaler-GeoZwilling-V1.pdf>

Löwner, M.-O., Benner, J., Gröger, G., U., Gruber, K.-H., Häfele & Schlüter, S. (2012). CityGML 2.0 - ein internationaler Standard für 3D-Stadtmodelle, Teil 1: Datenmodell. ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement. 2012. 340 - 349.

Löwner, M.-O.; Casper, E.; Becker, T.; Benner, J.; Gröger, G.; Gruber, U.; Häfele, K.-H. & Schlüter, S., (2013) CityGML 2.0 - Ein internationaler Standard für 3D-Stadtmodelle, Teil 2: CityGML in der Praxis Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 2, 131-143

Lutz, B. (2019): Data Excellence - IKT-Teilstrategie, Magistratsdirektion der Stadt Wien, Geschäftsbereich Organisation und Sicherheit. Prozessmanagement und IKT-Strategie, <https://digitales.wien.gv.at/wp-content/uploads/sites/47/2019/03/Data-Excellence.pdf>

Noardo, F.; Harrie, L.; Ohori, K. A.; Biljecki, F.; Ellul, C.; Krijnen, T.; Eriksson, H.; Guler, D.; Hintz, D.; Jadidi, M. A.; Pla, M.; Sanchez, S.; Soini, V.-P.; Stouffs, R.; Tekavec, J. & Stoter, J. (2020). Tools for BIM-GIS Integration (IFC Georeferencing and Conversions): Results from the GeoBIM Benchmark 2019, ISPRS International Journal of Geo-Information, Special Issue „Integration of BIM and GIS for Built Environment Applications“ 9

Stadler, A. & Kolbe, T. H. (2007). Spatio-semantic coherence in the integration of 3D city models, Proceedings of the 5th International ISPRS Symposium on Spatial Data Quality ISSDQ

### Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Hubert Lehner, Stadt Wien, Stadtvermessung, Fachbereichsleiter 3D-Modellierung und 3D-Services, Muthgasse 62, A-1190 Wien, Österreich.  
E-Mail: [hubert.lehner@wien.gv.at](mailto:hubert.lehner@wien.gv.at)

Sara Lena Kordasch, BSc MSc, Stadt Wien, Stadtvermessung, Stabstelle Innovation und IKT, Muthgasse 62, A-1190 Wien, Österreich.  
E-Mail: [sara.kordasch@wien.gv.at](mailto:sara.kordasch@wien.gv.at)

Charlotte Glatz, MSc, Stadt Wien, Stadtvermessung, Fachbereich 3D-Modellierung und 3D-Services, Muthgasse 62, A-1190 Wien, Österreich.  
E-Mail: [charlotte.glatz@wien.gv.at](mailto:charlotte.glatz@wien.gv.at)

Dr. Giorgio Agugiaro, 3D Geoinformation group, Delft University of Technology, Faculty of Architecture and the Built Environment, Department of Urbanism, Julianalaan 134, 2628BL Delft – The Netherlands.  
E-Mail: [g.agugiaro@tudelft.nl](mailto:g.agugiaro@tudelft.nl)