**Automatisierte Qualitätssicherung des Fachmodells Baugrund**

M. Eng. Johannes Beck1, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Sascha Henke1

1) Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

*Das Fachmodell Baugrund ist das zentrale Modell, mit dem die Geotechnik am kollaborativen BIM-Prozess partizipiert. Eine unzureichende Modellqualität stellt dabei ein erhebliches Hindernis sowohl für die interne Nutzung als auch für die Weiterverwendung durch andere Projektbeteiligte dar. In diesem Beitrag wird untersucht, wie die Qualität von Fachmodellen effektiv geprüft und durch geeignete Arbeitsmethoden nachhaltig gesichert werden kann. Eine Analyse der verschiedenen Facetten des abstrakten Konzepts der Modellqualität zeigt, dass insbesondere die Vollständigkeit und Korrektheit sowohl geometrischer als auch nicht-geometrischer Inhalte von zentraler Bedeutung sind. Qualitätstests unterschiedlicher Art und Komplexität werden anhand eines exemplarischen Baugrundmodells durchgeführt, wobei praxisrelevante Aspekte zur Bewertung der Qualität und Wiederverwendbarkeit des geotechnischen Fachmodells entlang konkreter Beispiele herausgearbeitet werden. Es ist gängige Praxis, Fachmodelle im herstellerneutralen IFC-Format (Industry Foundation Classes) auszutauschen, welches entsprechend auch die Grundlage für die in diesem Beitrag vorgestellte Modellprüfung bildet. Diese erfolgt sowohl auf Basis des Information Delivery Specification (IDS)-Standards als auch mit einem Test-Framework. Zudem wird aufgezeigt, wie durch optimierte Arbeitsweisen die Modellierung und Anreicherung der Daten unterstützt werden können und die Einbindung in Autorensoftware erfolgen kann. Qualitätsgesicherte Modelle sind eine entscheidende Grundlage für die Automatisierung und Umsetzung zahlreicher BIM-Anwendungsfälle. Diese Arbeit leistet daher einen wichtigen Beitrag zur verstärkten und effizienteren Nutzung des Fachmodells Baugrund im Projektkontext und damit zur Generierung von Mehrwerten.*

# Einleitung

Der Methode des Building Information Modellings (BIM) kommt eine zentrale Rolle bei der Digitalisierung des Bauwesens zu. Dabei wird der Fachmodell-basierte Ansatz als Best-Practice gesehen, bei dem verschiedene Projektebeteiligte digitale, räumliche und mit Informationen angereichte Modelle mit ihren spezifischen Inhalten erstellen. Die verschiedenen Fachmodelle werden zu einem Koordinationsmodell oder einem Gesamtmodell zusammengeführt [1]. Für den Datenaustausch wird häufig das herstellerneutrale IFC-Format (Industrie Foundation Classes) genutzt [2]. Der zentrale Liefergegenstand und damit auch Planungs- und Dokumentationsmodell der Fachdisziplin Geotechnik ist dabei das Fachmodell (FM) Baugrund. Nach Mohlzahn et al. enthält es sämtliche Informationen, die den Baugrund beschreiben, wenngleich es stets in Verbindung mit dem geotechnischen Bericht und als Ergänzung dessen zu sehen ist [3].

Zhou et al. gliedern die Vorteile der BIM-Methode für die operative, strategische, organisatorische und die Management-Ebene auf [4]. Zudem arbeiten Sie heraus, welche Mehrwerte, beispielsweise Kostenreduktion oder Risikominimierung, in den verschieden Projektphasen realisierbar sind. Lidelöw et al. untersuchen mithilfe von Interviews in Finnland, Norwegen und Schweden, in wie weit sich die versprochenen Vorteile in der Praxis feststellen lassen [5]. Dabei beleuchten sie, für wen sich Mehrwerte ergeben und stellen fest, dass verschiedene erwartete Vorteile nicht realisiert werden können und die Lücke zwischen Best-Practice und gängiger Praxis zunehmend größer wird. Insbesondere die Nutzung der BIM-Methode über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks hinweg aktuell schwach ausgeprägt.

Die Generierung von Mehrwerten innerhalb der BIM-Methode erfolgt entlang von BIM-Anwendungsfällen. Mohlzahn et al. führen eine Auswahl an möglichen Anwendungsfällen für das FM Baugrund an und differenzieren diese dahingehend, ob für die Umsetzung das FM Baugrund ausreichend ist oder ob noch weitere Fachmodelle erforderlich sind [6]. In vorgenannter Empfehlung werden die Anwendungsfälle aus Sicht des Auftraggebers geschildert. Mit der BIM-Methode können zudem auch innerhalb einer Organisation Mehrwerte erzielt werden.

Die datenzentrische Arbeitsweise bildet die Grundlage, um Arbeitsschritte und damit auch Teile der Anwendungsfallumsetzung zu automatisieren. Effiziente und automatisierte Prozesse fördern die Umsetzung von Anwendungsfällen und die zugehörige Frequenz nachhaltig. Die Qualität der Datengrundlage, hier die Modelle, ist entscheidend für die erfolgreiche Umsetzung solcher Automatisierungsroutinen. In diesem Beitrag wird dargestellt, wie die Qualität eines Baugrundmodells bewertet und sichergestellt werden kann. Die am häufigsten gewählte Methode zur Definition von Anforderungen ist über eine nicht maschineninterpretierbare Textdatei und die häufigste Prüfung ist eine manuelle Inspektion des Modells unter Zuhilfenahme eines Modellviewers [7, 8]. Diese Workflows sind nur bedingt automatisierbar und skalierbar, folglich sollen in dieser Arbeit relativ niederschwellige Methoden genutzt werden mit denen vorgenannte Ziele erreicht werden können. In Kapitel 2 wird der Begriff der Modellqualität, deren Teilaspekte und Prüfung beleuchtet. Dabei werden spezifische Kriterien für das FM Baugrund vorgestellt. Kapitel 3 behandelt die Modellprüfung. Kapitel 4 beinhaltet exemplarische Empfehlungen zu Arbeitsweisen in der Modellerstellung, mit denen eine hohe Qualität gefördert wird. Der Beitrag schließt mit einem Fazit und Ausblick in Kapitel 5.

Sämtliche Unterlagen zu diesem Beitrag sind in folgendem Repository zu finden: URL

Der Beitrag setzt ein grundlegendes Verständnis des IFC-Schemas und der Klassen, die üblicherweise in der Geotechnik verwendet werden, voraus.

# Qualität von Bauwerksinformationsmodellen

Nach DIN EN ISO 9000 wird unter Qualität der „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“ verstanden [9]. Folglich ist es zur Qualitätsbewertung von Informationen erforderlich, dass Anforderungen an dieses definiert werden. Die Merkmale lassen sich in quantitativ und qualitativ differenzieren, wobei in dieser Arbeit nur erstgenannte betrachtet werden.

## Prüfung von Bauwerksinformationsmodellen

Nachfolgend werden verschiedene Arbeiten, die sich mit dem Prüfen von Bauwerksinformationsmodellen beschäftigen mit Fokus auf Klassifizierung von Anforderungen beziehungsweise den zugehörigen Prüfungen. Dies erfolgt vor dem Hintergrund, dass mit den in Kapitel 2.2 ausgearbeiteten Qualitätskriterien für das Fachmodell Baugrund, die im Weiteren für die Fallstudie genutzt werden, ein möglichst breites Spektrum diesbezüglich abzubilden.

In Anlehnung an die Inhalte von Bauwerksinformationsmodellen untergliedern Choi et al. die Qualität in die der physischen Informationen, der logischen Informationen und der Daten [10].

Hjelseth und Nisbet untergliedern die modellbasierte Prüfung in Abhängigkeit von der Intention in vier Gruppen [11, 12]. Am verbreitetsten ist das Übereinstimmen mit vordefinierten Kriterien, beispielsweise muss jede Spundwand mindestens 1 m lang sein. In diese Gruppe fallen auch Geometrie-basierte Test (Kollisionskontrolle). Als zweites Konzept führen Sie Systeme an, die basierend auf hinterlegtem Wissen den Nutzer Vorschläge für technische Lösungen machen. Als drittes Konzept wird die adaptive Modellprüfung angeführt, bei der intelligente Objekte sich basierend auf Verhaltensregeln automatisch der Umgebung anpassen. Ein Beispiel ist, dass Bohrpfähle mindestens 2,5 m in den tragfähigen Baugrund einbinden müssen und sich das Pfahlobjekt basierend auf vordefinierten Regeln die tragfähige Schicht sucht und seine Länge entsprechend anpasst, sofern das Kriterium nicht erfüllt ist. Neben der vorgestellten Objektebene ist diese Methodik auf Systemebene anwendbar. Als vierte Art wird die Prüfung hinsichtlich des Vorhandenseins von Modellinhalten angeführt.

Das regelbasierte Prüfen, beispielswiese der Normkonformität, stellt einen zentralen Teil der Forschung zur Qualitätsprüfung dar. Derartige automatisierte Prüfungen finden sich beispielsweise in digitalen Genehmigungsprozessen wieder. Literaturstudien hierzu finden sich in [13, 14]. Solihin und Eastman unterteilen Modellprüfregeln in vier Klassen anhand ihrer Komplexität und den Anforderungen an die Prüfumgebung und zeigen entsprechende Beispiele [15].

Valinejadshoubi et al. zeigen eine Checkliste mit 26 Kriterien, mit denen Sie die Qualität von Fachmodellen verschiedener Disziplinen bewerten [8]. Dies erfolgt unter Zuhilfenahme einer Visuellen Programmierumgebung innerhalb eines BIM-Autorenprogramms automatisiert. Sie unterscheiden in die vier „Scopes“ Übereinstimmung mit der Namenskonvention, Koordination, Massenermittlung und Modellierungsgenauigkeit. Als Metrik zur Bewertung ziehen Sie das Verhältnis der Anzahl an Elementen, die die Tests bestehen zur Anzahl getesteter Elemente heran.

Tomczak et al. stellen verschiedene Methoden zur Spezifikation von Informationsanforderungen zusammen, führen aus, was mit welcher Methode spezifiziert werden kann und geben Empfehlung zu passenden Anwendungsszenarien [7]. Beleuchtet werden Text- und Tabellenbasierte, sowie weitere Individuallösungen, Data Dictionaries, Information Delivery Manual (IDM), IFC Property templates, Information Delivery Specification (IDS), Level of Information Need (LOIN), Model View Definition (MDV), Product Data Templates (PDT) und ein Linked Data Ansatz. In der Regel können die spezifizierten Anforderungen zur Prüfung, ob diese innerhalb eines Modells erfüllt werden, genutzt werden, siehe beispielsweise [16]. Auf dem Markt existieren verschiedene Softwarelösungen zur Qualitätsprüfung von BIM Modellen, wobei Solibri am verbreitetsten ist, siehe [17]. Mit diesen können proprietäre Prüfregeln genutzt werden und auch teilweise oben gelistete Standards.

## Qualitätskriterien für das Fachmodell Baugrund

Nachfolgend werden exemplarische Kriterien vorgestellt, anhand derer die Qualität des Fachmodells Baugrund bewertet werden kann. Dabei wird sowohl darauf geachtet, dass die in Kapitel 2.1 identifizierten Kategorien und Komplexitäten abgebildet werden, sowie fachspezifische Anforderungen und Herausforderungen berücksichtig werden. Der Fokus liegt dabei auf den in Kapitel 3.1 beschriebenen Subfachmodellen Baugrundschichten und Bohraufschlüsse.

IFC-Dateien, respektive das ihnen zugrunde liegende Datenmodell, werden als Modellgrundlage angenommen, da diese aktuell eine zentrale Rolle in den gängigen Austauschszenarien und damit den Liefergegenständen bilden. Geotechnische Klassen wurden mit dem IFC-Standard 4x3 eingeführt, jedoch sind diese aus praktischer Erfahrung heraus aktuell nicht vollumfänglich ausreichend, um das Fachmodell Baugrund einheitlich zu strukturieren und in seiner Gesamtheit abzubilden. Entsprechend werden regelmäßig projektspezifische Festlegungen zur Struktur getroffen und der Erweiterungsmechanismus über benutzerdefinierte IfcProperySets zur Abbildung und Gruppierung von geotechnischen Eigenschafften extensiv genutzt.

Für die Aufschlussbohrungen werden folgende Anforderungen definiert:

1. Jedes Objekt der Klasse IfcBorehole verfügt über das PropertySet IfcBoreholeCommon.
2. Jedes IfcBorehole ist einer IfcSite zugeordnet.
3. Sämtliche Objekte der Klasse IfcGeotechnicalStratum mit dem benutzerdefinierten ObjectType „ANSPRACHEBEREICH” sind Teil eines IfcBoreholes. Das Verhältnis Ganzes-Teil wird über IfcRelAggregates beschrieben.
4. Die Tags der IfcBoreholes entsprechen folgender Namenskonvention: Die ersten drei stellen sind „bh\_“ gefolgt von drei Ziffern.
5. Die Tags der IfcBoreholes sind einzigartig.
6. Die Tags der Ansprachebereiche entsprechen dem der zugehörigen IfcBoreholes, folgt von einem Unterstrich und drei Ziffern.
7. Die Abstände der Bohrungen entsprechen den Empfehlungen aus Eurocode 7.
8. Jeder Ansprachebereich wird als zylindrische Geometrie mit einem Durchmesser von einem Meter geometrisch repräsentiert.
9. Abweichung DGM

An das Subfachmodell Baugrundschichten werden folgende Anforderungen gestellt:

1. Werte für die CohesionBehaviour im Propertyset Pset\_SolidStratumCapacity liegen im Intervall zwischen 0 und 1000 kN/m².
2. Wird ein Reibungswinkel für ein Element mit dem Material „Sand“ angegeben, so liegt er zwischen 27,5° und 37,5°.
3. Die Farben der Materialien, die für die Baugrundschichten genutzt werden, entsprechen den Vorgaben aus DIN 4023.
4. IRGENDWAS MIT DEN EINHEITEN
5. Massen in QTO entsprechen der Geometrie (Netze geschlossen)

Folgende übergreifenden Anforderungen werden gestellt:

1. Die Nominalwerte sämtlicher Eigenschaften mit Grenzwerten müssen innerhalb dieser Grenzen liegen.
2. Die Dateigröße darf 10 MB nicht überschreiten.

# Prüfung der Qualität des Fachmodells Baugrund

## Verwendetes Fachmodell Baugrund

Aufbau und Inhalte des Baugrundmodells, das nachfolgend als Grundlage für die Qualitätsprüfung verwendet wird, sollen möglichst präzise und detailliert festgelegt werden können. Das Fachmodell besteht aus den beiden Subfachmodellen Baugrundaufschlüsse und Baugrundschichten. Abbildung 1 zeigt die Baugrundschichtengeometrie des verwendeten Beispielprojekts. Das Baugrundschichtenmodell basiert auf fünf Bohraufschlüssen, besteht aus drei Schichten und weist eine geringe geologische Komplexität auf.

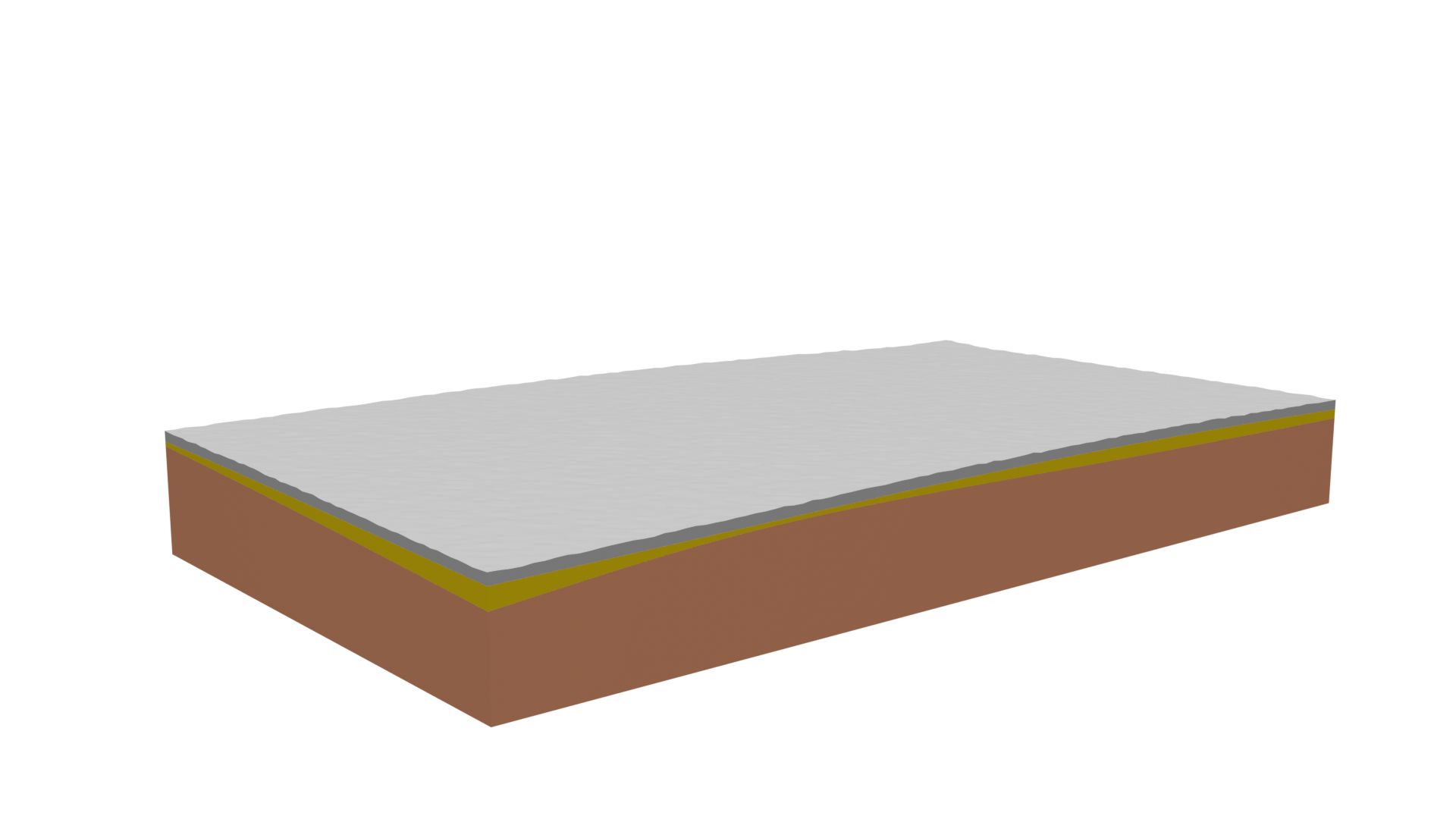


Abbildung 1 Subfachmodell Baugrundschichten

Die Modellerstellung erfolgt ausgehend von den Bohrdaten skriptbasiert und nativ im IFC-Format. Hierfür wird die Python-Bibliothek ifcopenshell (Version 0.8.0) genutzt. Beim gewählten „Gestapelte-Flächen-Ansatz“ wird ein geschlossenes Netz mit Schichtgrenzen-Flächen in mehrere, geschlossene Netze (Baugrundschichten) zerteilt. Für die Interpolation zwischen den Punkten, welche Schichtgrenzen definieren, wird eine RBF-Interpolation (Radiale-Basis-Funktion) verwendet. Für die geometrischen Operationen werden im Skript Funktionen von Blender (Version 4.2) genutzt.

Als IFC-Schema wird IFC4X3\_ADD2 verwendet. Mit diesem können grundlegende geotechnische Klassen und zugehörige Eigenschaften abgebildet werden. Bei der Modellierung der Objekteigenschaften werden IfcPropertySetTemplates verwendet, die für sich genommen zur Anforderungsdefinition und zur Qualitätssicherung genutzt werden können. Diese werden jedoch um den Beitrag kompakt zu halten nicht weiter beleuchtet. Die alphanumerischen Informationen im Modell orientieren sich zwecks Übersichtlichkeit an den in Kapitel 2.2 angeführten Inhalten.

## Information Delivery Specification (IDS)

Information Delivery Specification (IDS) ist ein offenes Beschreibungsformat, dass wie IFC von buildingSMART veröffentlicht wird. IDS zielt auf die Abbildung von Anforderungen an den alphanumerischen Informationsgehalt von Modellen ab. IDS-Dateien basieren auf dem XML-Schema, ihr Aufbau und Syntax sind durch eine XML Schema Definition (XSD) standardisiert.

Eine Spezifikation (Specification) besteht aus drei Teilen, beginnend mit einer Beschreibung (Description), die sie für Meschen verständlich macht und den Grund der Anforderung dokumentiert. Der zweite Teil ist der Anwendungsbereich (Applicability), in dem festgelegt wird, für welchen Teil des Modells die Anforderung gelten soll. Diese Anforderungen (Requirements) stellen den letzten Teil der Spezifikation dar. Jede Spezifikation ist in sich geschlossen, sodass sie in anderen Projekten und anderen IDS-Dateien weiterverwendet werden kann.

Facets beschreiben die Informationen, die einer Entität in einem Modell zugeordnet sind, und werden genutzt, um den Anwendungsbereich und die Anforderungen zu konkretisieren. Im IDS-Standard sind die sechs Facet-Typen Entity, Attribute, Classification, Property, Material und Part Of (Entität, Attribut, Klassifikation, Eigenschaft, Material, Teil von) vorgesehen. Diese Facets können beliebig für den Anwendungsbereich und die Anforderungen kombiniert werden, um so eine Informationsanforderung abzubilden. Überdies können Kardinalitäten (erforderlich, optional und unzulässig) für Entitäten und Eigenschaften abgebildet werden.

Als Beispiel fungiere die Anforderung zur Modellstrukturierung, dass jede Instanz der Klasse IfcGeotechnicalStratum mit dem (benutzerdefinierten) ObjectType *Ansprachebereich* einem IfcBorehole über IfcRelAggregates zugewiesen ist. Die zugehörige Spezifikation ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Dreiteilung in Description, Applicability und Requirements spieglelt ist in dem XML-Auszug gut zu erkennen. Im Abschnitt Applicability werden zwei Facets, je eins vom Typ Entity und Attribut, zur Filterung der Modellinhalte verwendet. Im Tag Applicability wird die Kardinatlität über minOccurs und maxOccurs festgelegt. Die Kombination, die im Beispiel abgebildet ist, ist als „Das Modell kann (optional) Elemente enthalten, die die Filter passieren“. Die genannte Anforderung an den Modellaufbau ist im Abschnitt Requirements mit einem Facet des Typs Part Of definiert. Die Kardinalität für Requirements wird auf der Facet-Ebene festgelegt, was bei der Kombination von mehreren Facets die Flexibilität in der Anforderungsdefinition erhöht.



Abbildung 2 Beispielhafte Spezifikation aus einer IDS-Datei

Das Prüfen des Fachmodells an der IFC-Datei erfolgt mit dem Python-Modul IFC-Tester (Version 0.8.0). Die Testergebnisse können in verschiedenen Formaten ausgegeben werden, darunter BCF (BIM Collaboration Format), JSON und HTML. Der Bericht beginnt mit einer Kurzzusammenfassung unter anderem über die geprüfte Spezifikation, die Anzahl an getesteten Objekten und die Anzahl an durchgeführten Tests, jeweils mit Anzahl der erfolgreichen und nicht erfolgreichen Überprüfungen. Es folgt eine Aufstellung für jeden durchgeführten Test, welches Objekt getestet wurde und ob er erfolgreich war. Falls der Test nicht erfolgreich war, wird zudem ein Grund angeführt.

Mithilfe von IDS können viele Informationen aus IFC-Modellen geprüft werden, da mithilfe der sechs Facet-Typen wesentliche Teile der gängigen alphanumerischen Modelinhalte abgebildet werden können. Allerdings können Tests, die geometrische Daten verwenden, die berechnete beziehungsweise dynamische Werte nutzen oder auf externe Datenquellen referenzieren nicht mit IDS durchgeführt werden.

## Nicht standardisierter Ansatz mit Unit-Tests

Individuell programmierte Lösungen zur Prüfung der Modellqualität haben den Vorteil, dass sie sehr flexibel ausgestaltbar sind. Allerdings sind sie nicht standardisiert und erfordern entsprechende Expertise zur Definition, Programmierung und Unterhalt.

Die Nachteile der selbst programmierten Lösung: (siehe Tomczak und Eastman)

# Förderung der Modellqualität im Modellierungsprozess

# Fazit und Ausblick

# Literatur

Automatic compliance checking of BIM models against quality standards based on ontology technology

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580524003923

Gade, P. N., Lauritzen, D. H., Andersen, M. & Hjelseth, E. (2022). How Practice Is Represented in BIM-Based Model Checking Research – A Literature Review and Reflections. Conference: European Conference on Product and Process Modeling.

Gade, P. N. & Svidt, K. (2021). Exploration of practitioner experiences of flexibility and transparency to improve BIM-based model checking systems. Journal of Information Technology in Construction, 26, 1041–1060. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.055>

1. Deutsches Institut für Normung e.V.: Organisation und Digitalisierung von Informationen zu Bauwerken und Ingenieurleistungen, einschließlich Bauwerksinformationsmodellierung (BIM) –Informationsmanagement mit BIM –Teil 1: Begriffe und Grundsätze (ISO 19650-1:2018);Deutsche Fassung EN ISO 19650-1:2018. Beuth Verlag GmbH, Berlin **ICS 35.240.67; 91.010.01**(DIN EN ISO 19650-1:2019-08) (2019)

2. Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 16739-1:2024-09, Industry Foundation Classes (IFC) für den Datenaustausch in der Bauwirtschaft und im Anlagenmanagement - Teil 1: Datenschema (ISO\_16739-1:2024); Englische Fassung EN ISO 16739-1:2024. DIN Media GmbH, Berlin **25.040.40, 35.240.67**(DIN EN ISO 16739-1) (2024)

3. Molzahn, M., Bauer, J., Henke, S., Tilger, K.: Das Fachmodell Baugrund. Empfehlungen des Arbeitskreises 2.14 der DGGT „Digitalisierung in der Geotechnik“. geotechnik **44**(1), 41–51 (2021). doi: 10.1002/gete.202000040

4. Zhou, Y., Ding, L., Rao, Y., Luo, H., Medjdoub, B., Zhong, H.: Formulating project-level building information modeling evaluation framework from the perspectives of organizations: A review. Automation in Construction **81**, 44–55 (2017). doi: 10.1016/j.autcon.2017.05.004

5. Lidelöw, S., Engström, S., Samuelson, O.: The promise of BIM? Searching for realized benefits in the Nordic architecture, engineering, construction, and operation industries. Journal of Building Engineering **76**, 107067 (2023). doi: 10.1016/j.jobe.2023.107067

6. Molzahn, M., Bauer, J., Henke, S., Tilger, K.: Anwendungsfälle des Fachmodells Baugrund. Empfehlung Nr. 3 des Arbeitskreises 2.14 der DGGT „Digitalisierung in der Geotechnik“. geotechnik (2021). doi: 10.1002/gete.202100026

7. Tomczak, A., Berlo, L.v., Krijnen, T., Borrmann, A., Bolpagni, M.: A review of methods to specify information requirements in digital construction projects. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. **1101**(9), 92024 (2022). doi: 10.1088/1755-1315/1101/9/092024

8. Valinejadshoubi, M., Moselhi, O., Iordanova, I., Valdivieso, F., Shakibabarough, A., Bagchi, A.: The Development of an Automated System for a Quality Evaluation of Engineering BIM Models: A Case Study. Applied Sciences **14**(8), 3244 (2024). doi: 10.3390/app14083244

9. Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 9000:2015-11, Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9000:2015. DIN Media GmbH, Berlin **01.040.03, 03.100.70, 03.120.10**(DIN EN ISO 9000) (2015)

10. Choi, J., Lee, S., Kim, I.: Development of Quality Control Requirements for Improving the Quality of Architectural Design Based on BIM. Applied Sciences **10**(20), 7074 (2020). doi: 10.3390/app10207074

11. Hjelseth, E., Nisbet, N.: Overview of concepts for model checking. In: International Council for Research and Innovation in Building and Construction (ed.) 27th W78 Conference "Applications of IT in the AEC Industry", Kario (Ägypten), 16.11. - 19.11.2010 (2010)

12. Hjelseth, E.: Classification of BIM-based model checking concepts. Special issue: CIB W78 2015 Special track on Compliance Checking. ITcon(23), 354–369 (2016)

13. Aydın, M.: A Review of BIM-Based Automated Code Compliance Checking: A Meta-Analysis Research. In: P. Dadios, E. (ed.) Automation and Control - Theories and Applications. IntechOpen (2022)

14. Eastman, C., Lee, J., Jeong, Y., Lee, J.: Automatic rule-based checking of building designs. Automation in Construction **18**(8), 1011–1033 (2009). doi: 10.1016/j.autcon.2009.07.002

15. Solihin, W., Eastman, C.: Classification of rules for automated BIM rule checking development. Automation in Construction **53**, 69–82 (2015). doi: 10.1016/j.autcon.2015.03.003

16. Weise, M., Liebich, T., Nisbet, N., Benghi, C.: IFC model checking based on mvdXML 1.1. In: Christodoulou, S.E., Scherer, R.J. (eds.) eWork and ebusiness in architecture, engineering and construction. Proceedings of the 11th European Conference on Product and Process Modelling (ECPPM 2016). European Conference on Product and Process Modelling (ECPPM 2016), Limassol (Zypern), 07.09.-09.09.2016. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton (2016)

17. Dene, W.: Parametric modelling in construction: Investigating the quality of rule-based checking. In: Wilde, W.P. de, Mahdjoubi, L., Garrigós, A.G. (eds.) Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations III. BIM 2019, Seville, Spain, 09.10.2019 - 11.10.2019, pp. 57–68. WIT PressSouthampton UK (2019). doi: 10.2495/BIM190061