

Diplomarbeit

Wissensbasiertes BIM-Schadensmanagement mittels Web Ontologien

eingereicht von:	Karoline Pohl
Matrikelnummer:	4040523
Verantwortlicher Hochschullehrer:	Prof. Dr.-Ing. Raimar Scherer
Wissenschaftlicher Betreuer:	Dipl.-Ing. Al-Hakam Hamdan
Betrieblicher Betreuer:	Dipl.-Ing. Martin Weiske
Beteiligtes Unternehmen:	EIBS Entwurfs- und Ingenieurbüro Straßenwesen GmbH
Tag der Einreichung:	08.02.2020



Aufgabenstellung für die Diplomarbeit

Name: cand. Karoline Pohl

Vertiefung: Konstruktiver Ingenieurbau

Thema: Wissensbasiertes BIM-Schadensmanagement mittels Web Ontologien
(Knowledge-based BIM damage management using web ontologies)

Zielsetzung:

Building Information Modeling (BIM) bietet neue Möglichkeiten für die Modellierung von Konstruktionen in einer digitalen und kollaborativen Umgebung. Momentan wird BIM jedoch hauptsächlich zur Unterstützung der Entwurfsphase und nur begrenzt für bestehende Bauwerke eingesetzt. Ein wichtiger Aspekt bei bestehenden Bauwerken sind hierbei auftretende Schädigungen, die i.d.R. im Rahmen von wiederkehrenden Bauwerksprüfungen erfasst werden. Hierfür existieren digitale Datenumgebungen wie SIB-Bauwerke die eine manuelle Eingabe der detektierten Schäden über eine Eingabemaske in einer Datenbank ermöglichen. Eine Verknüpfung der Schadensinformationen mit digitalen Bauwerksmodellen findet hierbei allerdings nicht statt, sondern es erfolgt lediglich eine Speicherung quantifizierter Schadensdaten. Dies erhöht die Schwierigkeit einer Schadensbeurteilung, da hierbei nicht gezielt nach geschädigten Bauteilen gefiltert werden kann, die Relevanz für die Tragwerkssicherheit, Gebrauchstauglichkeit oder Lebensdauer des Bauwerks haben. Hinzu kommt, dass Datenbanken keinerlei Inferenz von Informationen ermöglichen. Ontologien unter Verwendung gängiger Linked Data Prinzipien könnte hierbei als Alternative zu den herkömmlichen Schadensdatenbanken gesehen werden, da diese Inferenzen sowie eine Verknüpfung von Elementen aus unterschiedlichen Wissensdomänen ermöglichen. Allerdings findet hierbei nach wie vor keine Verknüpfung der Schadensinformationen mit Bauwerksmodellen, respektive BIM-Modellen statt.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll untersucht werden inwiefern die Verwendung von Ontologien, die Aufnahme und das Management von Schadensinformationen im Gegensatz zu konventionellen Datenbanken verbessert. Hierbei soll auf bestehende Entwicklungen Bezug genommen werden und anhand eines praxisnahen Test beide Ansätze nach zuvor selbst bestimmten Kriterien untersucht werden. Ferner sollen Lösungsansätze zur Verknüpfung von BIM-Modellen mit Schadensdaten konzipiert und ggf. angewendet werden.

Arbeitsumfang:

Während der Ausarbeitung sollen folgende Punkte bearbeitet werden:

1. Überblick und Bewertung des Standes der Forschung und Technik im Bereich der Schadensaufnahme und -repräsentation mit Fokus auf angewendete Datenstrukturen.
2. Anwendung einer gängigen Schadensdatenbank (bevorzugt SIB-Bauwerke) zur Aufnahme und Verwaltung von Schadensinformationen.
3. Anwendung bestehender Ontologien unter Nutzung von Semantic Web Standards zur Repräsentation von Schädigungen. Es wird hierfür die Ontologie <https://www.w3id.org/dot> empfohlen.
4. Vergleich der Funktionalität von Web Ontologien mit konventionellen Datenbanken und Bewertung dieser im Hinblick auf den Einsatz in der Schadensaufnahme und Bauwerksprüfung
5. Ergänzung bestehender Ontologien bzw. Erstellung von Erweiterungen zur Entwicklung eines wissensbasierten Datenmodells, das aktuelle deutsche Normen zur Prüfung von Bauwerken unterstützt.
6. Entwicklung eines Konzepts zur Verlinkung eines bestehenden BIM-Modells mit Daten die im Rahmen einer Schadensaufnahme und Bauwerksprüfung erstellt werden.

Wiss. Betreuer TU Dresden: Dipl.-Ing. Al-Hakam Hamdan

Betriebl. Betreuer: Dipl.-Ing. Martin Weiske

Beteiligtes Unternehmen: EIBS Entwurfs- und Ingenieurbüro Straßenwesen GmbH

ausgehändigt am: 08.10.2019

einzureichen am: 08.02.2020



Prof. Dr.-Ing. Raimar Scherer
Verantwortlicher Hochschullehrer

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und ist auch noch nicht veröffentlicht worden.

Dresden, den 08.02.2020

Karoline Pohl

Zusammenfassung

Ein großer Teil von Bauprojekten umfasst momentan den Umbau und die Instandhaltung von bestehender Bausubstanz. Ein wichtiger Schritt vor der Erstellung von Sanierungskonzepten und -planungen ist die Aufnahme von Schäden. Die digitale Erfassung und Auswertung dieser ist dabei von Vorteil, um eine Entscheidungsgrundlage im Bauwerksmanagement zu bilden. Deshalb bildet das digitale Schadensmanagement mit dem Fokus auf Brückenbauwerken den Schwerpunkt dieser Arbeit. Da für diese durch die DIN 1076 eine Prüfung in regelmäßigen Abständen vorgeschrieben ist, werden in dem Bereich viele Daten generiert. In Deutschland wird zur Zeit vor allem das Programm SIB-BAUWERKE für die Schadensaufnahme verwendet, welches auf einer relationalen Datenbank beruht. Der Einsatz von BIM-Methoden im Schadensmanagement und allgemein bei Bestandsbauwerken ist dagegen noch in der Entwicklung. Dies ist damit zu begründen, dass sich die Forschung an BIM zunächst vor allem auf den Neubau konzentriert hat. Mittlerweile steht jedoch auch die Arbeit an bestehenden Gebäuden im Fokus. Einen Ansatz für das Schadensmanagement stellt der Einsatz von Ontologien dar, welcher nicht zwingend ein Geometriemodell des Bauwerks benötigt. Stattdessen werden die Bauteile, Schäden und deren Beziehungen semantisch beschrieben.

Diese Arbeit hat zum Ziel die beiden Datenmodelle relationale Datenbanken (anhand von SIB-BAUWERKE) und Ontologien zu analysieren und im Hinblick auf die Verwendung in der Bauwerksprüfung zu vergleichen. Dafür werden ihre Funktionalitäten in einer praxisnahen Anwendung nach normativen und anwenderbezogenen Gesichtspunkten untersucht. Anhand dieser Ergebnisse werden Erweiterungen für die Ontologien erarbeitet, um mit ihnen die gesamte Bauwerksprüfung nach DIN 1076 abbilden zu können. Anschließend wird gezeigt, wie die Schadensontologie mit einem IFC-Modell verlinkt werden kann, um so die Vorteile aus beiden Modellen nutzen zu können.

Abstract

Nowadays a large part of construction projects concentrate on the processes of reconstruction and maintenance of existing buildings. In order to create suitable maintenance concepts it is fundamental to record the present damages. The digital recording and evaluation is important to form a basis for decision-making in construction management. Therefore, this thesis deals with the challenge of digital damage management. This is particularly relevant for bridge structures, as DIN 1076 requires them to be inspected on a regular basis. Currently, the program SIB-BAUWERKE, which is based on a relational database, is mainly used for damage assessment in Germany.

The usage of BIM methods in damage management and for existing structures in general is still under development. This is due to the fact that research on BIM has initially focused on new construction. Meanwhile the work on existing buildings has also become a focus. An approach to damage management is the use of ontologies, which does not necessarily require a geometric model of the building. Instead, the components, damages and their relationships are described semantically.

This thesis aims to analyze the two data models ontologies and relational databases (using SIB-BAUWERKE) to compare them with regard to their usage in building inspections. For this purpose their functionalities are examined in a practical application according to normative and user-related aspects. Based on these results, extensions for the ontologies are developed for the purpose of mapping the entire building inspection in conformity with the DIN 1076. Finally, it is shown how the damage ontology can be linked to an IFC-model in order to take advantage of both models.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Ziele	1
1.2 Aufbau der Arbeit	1
2 Stand der Forschung und Technik	3
2.1 Gegenwärtige Methoden zur Aufnahme von Schäden	3
2.2 Verarbeitung und Management von Schadensdaten	4
2.2.1 Textliche Schadensdokumentation	4
2.2.2 Schadensrepräsentation mit CAD-Systemen	4
2.2.3 Schadensrepräsentation mit Datenbanksystemen	4
2.2.4 Building Information Modelling im Schadensmanagement	5
2.2.5 Schadensrepräsentation im IFC-Standard	6
2.2.6 Schadensrepräsentation mit Semantic Web Technologien	7
2.3 Verfahren zur Bewertung von Schäden	8
2.3.1 Bewertungsalgorithmus für die Bauwerksprüfung nach DIN 1076 . .	8
2.3.2 Automatisierte Schadensbewertung	9
3 Analyse der Schadensdatenbank SIB-BAUWERKE	11
3.1 Allgemein	11
3.2 Relationale Datenbanken	11
3.2.1 Aufbau der Datenbank	12
3.2.2 Tabellen zur Schadensaufnahme	13
3.2.3 Versionierung der Schäden	14
3.2.4 Bauteilzuordnung	14
3.2.5 SQL-Abfragen	14
3.3 Anwendung des Programmes	15
3.3.1 Sortierung der Schäden	15
3.3.2 Aufnahme der Schäden am Bauwerk	15
3.3.3 Ergänzung bestehender Schäden	16
3.3.4 Eingabe eines neuen Schadens	18
3.3.5 Ortsangabe	19
3.3.6 Schadensbewertung	20

3.3.7	Fotos	20
3.3.8	Maßnahmen und Prüftext	21
3.3.9	Kennzeichnung für Einfache Prüfung	21
3.3.10	Ursachen	22
3.3.11	Auswertemodul	22
4	Analyse von Ontologien in der Bauwerksprüfung	23
4.1	Allgemein	23
4.1.1	Definition von Ontologien	23
4.1.2	Resource Description Framework (RDF)	23
4.1.3	Web Ontology Language (OWL)	26
4.1.4	Software zur Erstellung von Ontologien	27
4.2	Ontologien in der Bauwerksprüfung	27
4.2.1	Damage Topology Ontology	27
4.2.2	Weitere Schadensontologien	28
4.2.3	Brückenontologien	29
4.3	Erstellung der ABox für ein Brückenbauwerk	30
4.3.1	Erstellen von Bauteil- und Schadensinstanzen	30
4.3.2	Komponenten zur Charakterisierung der Schäden	31
4.3.3	Alternative Schadensbeschreibung über Datentyp-Eigenschaften	32
4.3.4	Prüfung	33
4.3.5	Versionierung von Schäden	33
4.3.6	Inferenz	34
4.3.7	Validierung von Ontologien	34
4.3.8	SPARQL-Abfragen	35
5	Erweiterung der Ontologie zur Prüfung von Bauwerken nach aktueller deutscher Norm	38
5.1	Allgemein	38
5.2	Rechtliche Grundlage	38
5.3	Erstellung von Ontologien	39
5.3.1	Neue Schadenstypen	39
5.3.2	Schadensbeschreibung	41
5.3.3	Zeitliche Entwicklung von Schäden	45
5.3.4	Prüfungen	45
5.3.5	Prüfgeräte und Prüfanweisungen	47
5.3.6	Bewertung	47
5.3.7	Maßnahmenempfehlung	49
5.3.8	Ursachen	49
5.3.9	Ortsangabe	49

5.3.10	SHACL-Regeln	50
5.3.11	Eingabe der Schäden vor Ort	51
6	Konzept zur Verlinkung eines BIM-Modells mit Schadensdaten	53
6.1	Allgemein	53
6.2	Überblick Multimodellkonzept	53
6.3	ICDD	54
6.3.1	Aufbau ICDD	55
6.3.2	Verlinkung der Schadensontologie mit einem IFC-Modell	58
6.3.3	Fotos und Skizzen	58
6.3.4	SIB-Datenbank	59
6.3.5	Punktwolken	59
6.3.6	Versionierung	60
7	Vergleich und Auswertung der vorgestellten Datenstrukturen	61
7.1	Vergleich	61
7.1.1	Vergleichskriterien	61
7.1.2	Erfüllung der Kriterien	62
7.1.3	Auswertung	64
7.2	Anforderungen an eine Software für die Bauwerksprüfung	65
8	Schlussbetrachtung	66
8.1	Auswertung	66
8.2	Ausblick	68
	Literaturverzeichnis	69
	Abbildungsverzeichnis	72
	Tabellenverzeichnis	74
	Quelltextverzeichnis	75

Abkürzungsverzeichnis

ASB-ING	Anweisung Straßeninformationsbank Segment Bauwerksdaten
BAS _t	Bundesanstalt für Straßenwesen
BIM	Building Information Modelling
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BOT	Building Topology Ontology
BROT	Bridge Topology Ontology
CAB	Windows Cabinet Archiv
CAD	Computer Aided Design
CDO	Concrete Damage Ontology
CODO	Coating Damage Ontology
CWA	Closed World Assumption
DASB	ASB-ING Assessment Ontology
DBF	Database File
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOT	Damage Topology Ontology
EN	Europäische Norm
EP	Einfache Prüfung
EUROTL	European Road Object-Type Library
GDO	General Damage Ontology

GUID	Globally Unique Identifier
HP	Hauptprüfung
ICDD	Information container for data drop
IFC	Industry Foundation Classes
ISO	International Organization for Standardization
OPM	Ontology for Property Management
OSA	Objektbezogene Schadensanalyse
OTL	Object-Type Library
OWA	Open World Assumption
OWL	Web Ontology Language
RI-EBW-PRÜF	Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen
RDF	Resource Description Framework
RDFS	Resource Description Framework Schema
SHACL	Shapes Constraint Language
SIB	Straßeninformationsdatenbank
SP	Sonderprüfung
SPARQL	SPARQL Protocol and RDF Query Language
SQL	Structured Query Language
STDO	Steel Damage Ontology
SWRL	Semantic Web Rule Language
Turtle	Terse RDF Triple Language
UAS	Unmanned Aircraft Systems
URI	Uniform Resource Identifier
URL	Uniform Resource Locator

Abkürzungsverzeichnis

WADO	Water Damage Ontology
WODO	Wood Damage Ontology
XML	Extensible Markup Language

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Ziele

Bauprojekte sind sehr komplexe Vorhaben mit vielen interdisziplinären Aufgaben. Daher ist es wichtig, die Informationsübergabe und Zusammenarbeit der verschiedenen Akteure sicherzustellen. Unter dem Stichwort Building Information Modelling (BIM) werden verschiedene Vorgänge verstanden, welche diese multidisziplinäre Zusammenarbeit unterstützen, meist auf Grundlage eines gemeinsamen digitalen Gebäudemodells. Allerdings wurde BIM vor allem für den Einsatz in der Entwurfsphase von Neubauten entwickelt und weniger für bestehende Gebäude. Dieser Bereich gewinnt jedoch immer mehr Bedeutung, aufgrund der großen Menge an bestehender Bausubstanz und deren Sanierungsbedürftigkeit. Ein Aspekt in diesem Prozess ist zunächst die Aufnahme von Schädigungen an Bauteilen, welcher nun immer mehr in den Fokus der Forschung getreten ist. Besonders bei Brückenbauwerken spielt dies eine große Rolle, da aufgrund der regelmäßig vorgeschriebenen Prüfungen eine große Menge an Daten generiert werden, welche verarbeitet und ausgewertet werden müssen. Im Jahr 2019 betrug allein die Anzahl von Brücken an Bundesfernstraßen 39.671 Stück, dabei ist mit über 80 % der Stahl- und Spannbetonbau die vorherrschende Bauweise (BASt 2019). Hinzu kommen weitere Bauwerke an Landes- und Kreisstraßen, welche ebenfalls in einem sechsjährigen Rhythmus einer Hauptprüfung und jeweils drei Jahre später einer Einfachen Prüfung unterzogen werden müssen. Die Art und der Umfang der Prüfungen ist in der DIN 1076 geregelt.

Ziel der Arbeit ist es, verschiedene Datenmodelle, die zur Darstellung von Schäden verwendet werden können, zu analysieren und zu vergleichen. Dabei wird der Ist-Zustand der Durchführung von Bauwerksprüfungen in der Praxis untersucht sowie die Möglichkeiten, welche die Verwendung von Ontologien für das Schadensmanagement bieten können, dargestellt.

1.2 Aufbau der Arbeit

In der Bauwerksprüfung ist momentan, vor allem auf Bundes- und Länderebene, das Programm SIB-BAUWERKE im Einsatz. Dies beruht auf einer relationalen Datenbank.

In der aktuellen Forschung werden hingegen Ontologien unter Verwendung von *Semantic Web Technologien* für die Schadensaufnahme entwickelt. In dieser Arbeit werden zunächst der Aufbau und die Funktionalitäten dieser beiden Datenstrukturen dargestellt. Anschließend folgt die Untersuchung in einem praxisnahen Test und die Analyse im Hinblick auf die Anwendung in der Bauwerksprüfung. Dazu werden die Anforderungen aus der DIN 1076 erarbeitet. Weiterhin werden Ergänzungen der Klassen und Eigenschaften für die bestehenden Ontologien erstellt, um mit ihnen eine vollständige normgerechte Bauwerksprüfung abbilden zu können. Darüber hinaus wird ein Konzept für die Verlinkung von Dateien unterschiedlicher Formate und Fachbereiche dargestellt, mit dem u. a. die Verknüpfung eines geometrischen IFC-Modells mit einer Schadensontologie möglich ist. Abschließend werden die beiden Datenmodelle im Hinblick auf die Umsetzung der Festlegungen aus der Norm sowie weiterer Anforderungen aus der praktischen Anwendung, miteinander verglichen.

2 Stand der Forschung und Technik

2.1 Gegenwärtige Methoden zur Aufnahme von Schäden

Die konventionelle Methode der Schadensaufnahme ist die händische Erfassung mit einzelnen Fotos der schadhaften Stellen und manuell aufgenommenen Messwerten für Rissbreiten o. Ä. Dies erfolgt zunächst am Bauwerk auf Papier und muss im Anschluss digitalisiert werden, was jedoch eine recht zeitintensive Variante darstellt.

Daneben gibt es weitere Ansätze zur automatisierten Erkennung und Erfassung von Schäden, die teilweise schon in der Praxis angewendet werden. Zu nennen sind dabei das Laser-Scanning, photogrammetrische Verfahren, sowie das Nutzen von Sensoren, die direkt am Bauwerk installiert sind. Die Aufnahme erfolgt dabei von stationären Punkten oder mit mobilen Geräten, wie Unmanned Aircraft Systems (UAS) oder Fahrzeugen. Zur Erfassung nicht erkennbarer innenliegender Strukturen (z. B. Bewehrungsmenge und -lage) müssen unter Umständen weitere spezielle zerstörungsfreie Prüfverfahren angewendet werden, z. B. das Ultraschall-Echo-Verfahren (BMVI 2017).

Der Einsatz von UAS, die mit Foto- und Thermographiekameras ausgerüstet sind, ist besonders hilfreich an Bauteilen, die für den Menschen schwer zugänglich sind. Zunächst erfolgt die genaue Planung der Flugroute, um die benötigte Auflösung zu erhalten und die erforderliche Überlappung für die photogrammetrische Rekonstruktion einzuhalten (Debus und Benz 2019). Anschließend können mit den erhaltenen Bildern zwei wichtige Schritte durchgeführt werden: die Rekonstruktion der gesamten Bauteiloberfläche durch dichte dreidimensionale Punktwolken und die Schadenserkennung von z. B. Verfärbungen und Abplatzungen durch automatisierte Bildanalysetechniken (Morgenthal u. a. 2019, Taraben 2018).

Das Erfassen von Bauwerksoberflächen mit Laser-Scannern erfolgt meist von stationären Punkten aus. Es werden dreidimensionale dichte Punktwolken erzeugt, welche zunächst nur die untersuchte Oberfläche geometrisch abbilden und keine beschreibenden Informationen über Objekte geben (Huber u. a. 2010). Die erhaltenen Daten werden anschließend weiter verarbeitet und ein geometrisches Abbild der Brücke erstellt, sowie Anomalien und Schäden lokalisiert, z. B.: Durchbiegungen oder Risse (Tang, Akinci und Garrett 2007, Attanayake u. a. 2011). In Deutschland kann die Anwendung dieses Verfahren aktuell nur bei der Einfachen Prüfung erfolgen, da durch die geltende Norm DIN 1076 (DIN-

Normenausschuss Bauwesen 1999) bei der Hauptprüfung die handnahe Untersuchung vorgeschrieben ist. Die Detektion von Hohlstellen durch Abklopfen kann bspw. nicht durch visuelle Verfahren ersetzt werden.

Eine weitere Möglichkeit der Schadens Erfassung bzw. Früherkennung von Schäden ist der Einsatz von Sensoren. Diese werden direkt in das Bauwerk eingebaut, z. B. an der Bewehrung, um die Karbonatisierung und Chlorideindringung zu messen. Damit ist das Ziehen von Rückschlüssen auf die Korrosion der Bewehrung möglich. Dies ist jedoch für bereits bestehende Bauwerke schlecht anwendbar, da die Sensoren meist direkt in das Bauwerk an der Bewehrung eingebracht werden (Tulke u. a. 2016).

2.2 Verarbeitung und Management von Schadensdaten

Nach der Aufnahme der Schäden folgt die Aufbereitung und Verarbeitung der Daten mit anschließender Archivierung für folgende Untersuchungen.

2.2.1 Textliche Schadensdokumentation

Die einfachste Form ist die Beschreibung der Schäden in reiner Textform mit zugeordneten Fotos und Messdaten. Teilweise liegen solche Unterlagen bei den zuständigen Behörden nur in der Papierform archiviert oder als digitale Textdokumente (z. B. PDF-Dateien) vor. So ist eine effiziente Ordnung und Verarbeitung der Schadensdaten nur schwer möglich. Diese Dokumente sind außerdem nur vom Menschen auswertbar, was zu einer höheren Fehleranfälligkeit führen kann, indem Schäden übersehen oder vergessen werden. Eine maschinelle Les- und Verarbeitbarkeit würde das Sortieren, Filtern und Auswerten der Schäden stark vereinfachen und beschleunigen.

2.2.2 Schadensrepräsentation mit CAD-Systemen

Eine weitere Möglichkeit ist die Abbildung der erkannten Schäden mit Hilfe einer 2D-CAD Modellierungssoftware. Dadurch ist eine gute Darstellung der Lage, der geometrischen Form und der Ausbreitung der Schäden möglich. Allerdings sind Zeichnungen weniger detailliert als Fotos, da sie immer eine Idealisierung des Zustandes mit sich führen. Ebenso kann die graphische Repräsentation in der Regel ebenfalls nur von Menschen ausgewertet werden (Hamdan und Scherer 2018).

2.2.3 Schadensrepräsentation mit Datenbanksystemen

Daneben gibt es Datenbankmanagementsysteme mit denen Schadensdaten strukturiert aufgenommen, digital verwaltet und klassifiziert werden können. Hierbei ist es möglich, weitere Informationen mit den Schadensdaten in Beziehung zu setzen, jedoch können sie nicht direkt mit geometrischen Elementen des Gebäudes verbunden und keine modellge-

stützten Informationen verarbeitet und gespeichert werden (Singer und Borrmann 2016). In Deutschland wird das Programm SIB-BAUWERKE häufig für die Durchführung von Prüfungen an Brücken und anderen Infrastrukturbauwerken verwendet.

2.2.4 Building Information Modelling im Schadensmanagement

In der Forschung gibt es derzeit Ansätze zur Durchführung des Schadensmanagements mit Hilfe von sogenannten BIM-Methoden. Zu Beginn haben sich die Bemühungen auf diesem Gebiet auf die Planungsphasen von Neubauprojekten konzentriert. Doch mittlerweile gibt es, aufgrund des großen Bedarfes, viele Forschungsprojekte, in denen die Unterhaltung von Bestandsbauwerken im Vordergrund steht.

An dieser Stelle soll zunächst der Begriff BIM erläutert werden. Die Abkürzung kann zwei Dinge beschreiben: Zum einen steht sie für *Building Information Model*, was das digitale Abbild eines Bauwerks beschreibt und neben der detaillierten Geometrie weitere semantische Informationen über z. B. Material und Kosten der einzelnen Bauteile enthält (Borrmann u. a. 2015). Zum anderen steht BIM für *Building Information Modelling*, was im engeren Sinne den Vorgang der Erstellung, Änderung und Verwaltung eines Building Information Models beschreibt. Im erweiterten Sinne wird damit jedoch die Nutzung und Bearbeitung aller Gebäudedaten in einem Modell, während des gesamten Lebenszyklus von der Planungs- über die Nutzungs- bis zur Rückbauphase, definiert. In dem Modell können die Bauwerkselemente klassifiziert, mit zusätzlichen Informationen angereichert und zueinander in Verbindung gesetzt werden (Borrmann u. a. 2015). Meist ist ein geometrisches dreidimensionales Gebäudemodell die Grundlage für alle weiteren Informationen. Allerdings kann nach Bonduel u. a. (2018) die erweiterte Definition von BIM so aufgefasst werden, dass ein geometrisches Modell nicht zwingend notwendig ist, sondern eine semantische Beschreibung aller Elemente und ihrer Eigenschaften ebenfalls BIM-Modell genannt werden kann. Die konventionelle Methode mit einem geometrischen Modell wird von Bonduel u. a. (2018) als „geometrisches BIM“ bezeichnet.

Momentan gibt es in der Bauinformatik und analog im Bereich des digitalen Schadensmanagement zwei Forschungsrichtungen, die beide in der erweiterten Definition zu den BIM-Methoden gezählt werden können: Auf der einen Seite soll ein universelles Datenmodell entstehen, in das alle Aspekte eines Bauvorhabens einbezogen werden. Jedoch gibt es dabei Kritik für die praktische Umsetzung, da dies eine sehr starke Zentralisierung von Informationen zur Folge hätte und, dass etablierte, weit ausgereifte Softwarewerkzeuge große Anpassungen durchführen müssen oder nicht in den Arbeitsprozess einbezogen werden können. Deshalb gibt es auf der anderen Seite Ansätze, welche die vielen Einzelanwendungen über Linkmodelle miteinander verknüpfen und somit zu einer gemeinschaftlichen Informationsbasis zusammenführen. Beide Richtungen basieren auf modellgestützten

Ansätzen, die die Verknüpfung von verschiedenen Informationen, wie Schäden mit den betroffenen Bauteilen, erlauben.

2.2.5 Schadensrepräsentation im IFC-Standard

Für die Umsetzung eines universellen Datenmodells wurde der offene Standard *Industry Foundation Classes* (IFC) entwickelt. Die Nutzung dieses Datenformats kann als geometrisches BIM bezeichnet werden, da mit ihm vor allem die Erfassung der Geometriedaten möglich ist. Er soll außerdem alle Bauwerksinformation über den gesamten Lebenszyklus für möglichst alle Bereiche repräsentieren. Doch zunächst wurden in dem Standard nur Gebäude in der Neubau- und Planungsphase berücksichtigt und keine Infrastrukturbauwerke, sowie keine Informationen über Schadensaufnahme, Instandhaltung oder Sanierung (Volk, Stengel und Schultmann 2014). In der Version IFC 4.2 (befindet derzeit im Entwurfszustand, Stand: 01/2020) ist die Erweiterung *ifcBridge* in den Standard aufgenommen worden, mit der es möglich ist die Bestandteile von Brücken zu modellieren. Jedoch gibt es weiterhin keine Möglichkeit, Schäden mit dem IFC-Modell zu beschreiben (buildingSMART International 2020).

In Tanaka u. a. (2018) und Sacks u. a. (2018) werden Erweiterungen des IFC Standards für die Bauwerksprüfung vorgeschlagen. Das Konzept von Ersterem sieht die Einführung der Entitätstypen von betroffenen bzw. untersuchten Bereichen (*IfcMeasuredRegion*), instandgesetzten Bereichen (*IfcRepairedRegion*) und Verschlechterungen bzw. Schädigungen (*IfcDegradation*) vor. Um die zeitliche Entwicklung von Schäden darzustellen, wurde das *IfcDegradationElement* eingeführt. Es beschreibt den Zustand eines Schadens zu einer bestimmten Zeit und einer bestimmten Inspektion. Über *IfcRelConnectsToTimeVariations* kann der allgemeine Schaden (*IfcDegradation*) mit seinen zeitlichen Ausprägungen (*IfcDegradationElement*) verknüpft werden. Zusätzlich definiert *ifcTasks* Aufträge oder Arbeitsschritte, welche eine Inspektion, Bewertung oder Reparatur darstellen können. Bei dem von Sacks u. a. (2018) beschriebenen Ansatz werden die Schäden über ihre äußere Kontur in ein 3D-Modell aufgenommen und mit aussagekräftigen Parametern ergänzt. Dabei werden die Geometriedaten des Bauwerks und der Schäden aus Punktwolken gewonnen. Eine andere Möglichkeit der Nutzung von IFC-Entitäten zur Schadensmodellierung sind die benutzerdefinierten Proxyklassen und -attribute. Mit *IfcProxy* können Schadensobjekten eine geometrische Repräsentation und eine Position zugewiesen und mit *IfcPropertySets* den Schadensobjekten benutzerdefinierte Attribute zugeordnet werden ohne das spezifische Schadensentitäten im IFC-Standard vorhanden sein müssen (Hamdan und Scherer 2018).

Viele der vorgestellten Ansätze zum Schadensmanagement setzen die Existenz eines BIM-Modells der Bauwerksgeometrie voraus, um die erfassten Schäden mit den Bauteilen zu

verknüpfen und eine eindeutige Lokalisation dieser zu ermöglichen. Dies ist jedoch häufig nicht der Fall und eine manuelle Nachmodellierung des Bestandes ist sehr aufwendig (Singer und Borrmann 2016). Stattdessen gibt es Ansätze, analog denen der Schadensaufnahme (vgl. Abschnitt 2.1), die Gebäudegeometrie mit Verfahren wie Laser-Scanning und Photogrammetrie aufzunehmen. Das Problem besteht jedoch in der Umwandlung von den so erhaltenen Punktwolken in semantisch angereicherte Bauteilelemente. Punktwolken können in der Regel nur die Umrisse darstellen und liefern keine weiteren Informationen über die Art der Objekte und ihren Eigenschaften und Beziehungen. Auch können so keine verdeckten Bauteile oder innen liegende Bauteilgrenzen erkannt werden. Die manuelle Bauwerksmodellierung aus den Punktwolken ist ebenfalls sehr zeitaufwendig. In Ellinger (2018) wird darum ein halbautomatisches Verfahren zur Modellierung eines Bestandsbauwerkes vorgeschlagen. Dabei wird ein generisches Modell verwendet, welches die Gesamtmenge aller durch den Modellierungs-Algorithmus abbildbaren geometrischen Elemente darstellt. Diesem Modell müssen nur bestimmte Parameter, die aus den Punktwolken auslesbar sind, übergeben werden, wodurch das Modell des abzubildenden Bauwerks erstellt wird. Das Bestimmen der Parameter und die Übergabe an das generische Modell erfolgt hierbei noch manuell, während die Anpassung des Geometriemodells an das abzubildende Bauwerk automatisch ausführbar ist. So wird kein geometrisch exaktes Abbild des Bauwerks geschaffen. Stattdessen dient das Modell als graphische Oberfläche um z. B. bei der Bauwerksprüfung Schäden eindeutig einem Bauteil und einer Position zuordnen zu können.

2.2.6 Schadensrepräsentation mit Semantic Web Technologien

Ein anderer Ansatz ist der Einsatz von *Semantic Web Technologien*, bei dem die Schäden sowie die Bauwerkselemente durch Ontologien dargestellt sind. Diese Datensätze können mit einem geometrischen BIM-Modell verknüpft werden oder für sich allein stehen.

Kurz gesagt, liefert eine Ontologie den „Wortschatz“ für einen Fachbereich mit dem Objekte aus diesem Bereich detailliert in einer maschinenlesbaren Form beschrieben werden können. Eine Ontologie besteht aus Klassen (Classes) und Eigenschaften (Properties). Von den Klassen können Instanzen (Individuals) erstellt werden, welchen Eigenschaften zuordenbar sind. Diese Eigenschaften verweisen entweder auf eine andere Instanz und stellen somit die Beziehung zwischen den beiden dar oder zeigen auf einen Wert, der ein Merkmal der Instanz darstellt. Mit Ontologien ist die Modellierung von Bauwerken ohne ein geometrisches Modell möglich, jedoch kann dies im Anschluss auf Grundlage der Ontologie erstellt (Bonduel u. a. 2018) und die Elemente über ein Linkmodell miteinander verknüpft werden. Die Verlinkung von Daten unterschiedlicher Formate wird als Multimodellkonzept verstanden, welches in Fuchs (2015) beschrieben ist. Eine zentrale Bauwerksontologie, die sogenannte *Building Topology Ontology (BOT)*, wird in Rasmussen, Pauwels u. a. (2017)

vorgestellt. Sie deckt absichtlich nur grundlegende Kernkonzepte des Bauwesens ab, da eine modulare Gestaltung der Ontologien empfohlen wird. So können beliebige fachspezifische Erweiterungen erstellt und jeweils nur die Teile genutzt werden, die für das aktuelle Projekt notwendig sind. Eine Ontologie, die den gleichen Prinzipien folgt, ist die *Damage Topology Ontology (DOT)* von Hamdan, Bonduel und Scherer (2019), welche sich mit der Aufnahme von Bauwerksschäden befasst. Sie ist mit der BOT kompatibel, fungiert als Kernontologie für den Bauwerkserhaltungs- und Schadensmanagementsektor und kann, um bspw. die Beschreibung von genauen Schadensbildern für verschiedene Materialien, erweitert werden. Einige Erweiterungen sind in Hamdan, Bonduel und Scherer (2019) bereits vorgestellt. Auch eine Ontologie für die Beschreibung von Brückenelementen, z. B. die BRIDGE-Ontologie von Kozak und Hamdan (2019), wurde bereits erarbeitet, sodass Schäden auch mit den betroffenen Bauteilen in Verbindung gesetzt werden können.

Ein anderer Ansatz ist die ifcOWL-Ontologie von Pauwels und Terkaj (2016). Hier existiert das geometrische IFC-Modell zuerst und darauf aufbauend sollen *Semantic Web Technologien* angewendet werden. Genauer geht es darum, ein EXPRESS-Schema, durch welches IFC definiert wird, in eine Ontologie umzuwandeln. Die Umwandlung wird zunächst nur in diese eine Richtung betrachtet. So können konventionelle etablierte BIM-Tools weiter genutzt und die Modelle trotzdem semantisch angereichert werden.

2.3 Verfahren zur Bewertung von Schäden

Anschließend an die digitale Aufnahme folgt im Prozess der Bauwerksprüfung die Bewertung der Schäden, aus welcher der Bauwerkszustand und notwendige Maßnahmen abgeleitet werden können.

2.3.1 Bewertungsalgorithmus für die Bauwerksprüfung nach DIN 1076

In Deutschland ist die Bauwerksprüfung und -bewertung durch die DIN 1076 (DIN-Normenausschuss Bauwesen 1999) geregelt. In der dazugehörigen *Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen (RI-EBW-PRÜF)* wird auf die Bewertung genauer eingegangen (BMVI 2017). Jeder Einzelschaden soll separat hinsichtlich der Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit mit einer Note von 0 bis 4 bewertet werden. Bei einer Bewertung mit 0 hat der Schaden hinsichtlich der drei genannten Kriterien keinen Einfluss auf das Bauteil, bei 4 ist dagegen die Standsicherheit (bzw. Verkehrssicherheit oder Dauerhaftigkeit) nicht mehr gegeben. Die Bewertung erfolgt für eine bundesweit möglichst einheitliche Erfassung anhand von Schadensbeispielen, die in der Richtlinie RI-EBW-PRÜF zur Verfügung gestellt werden (BMVI 2017). Aus den drei Bewertungen eines Einzelschadens wird, mit

der in Haardt (1999) auf Seite 39 gegebenen Tabellen, zunächst eine Basiszustandszahl gebildet. Zu dieser wird abhängig vom Umfang des Schadens (klein, mittel oder groß) ein Zu- oder Abschlag ergänzt. Die Zustandsnote einer Bauteilgruppe ist die maximale Zustandszahl der dazugehörigen Einzelschäden, ergänzt um einen Zu- oder Abschlag für die Schadensanzahl. Die Anzahl entspricht der der aufgenommenen Schäden, dabei wird nicht berücksichtigt, ob Schäden möglicherweise miteinander zusammenhängen. So ist die Zustandsnote beeinflussbar, indem benachbarte Schäden zusammengefasst oder einzeln aufgeführt werden. Die Zustandsnote des Gesamtbauwerks ist schließlich die maximale Zustandsnote der Bauteilgruppen, ergänzt um einen Zu- oder Abschlag für die Anzahl der geschädigten Bauteilgruppen (Haardt 1999). Trotz der vorhandenen Schadensbeispiele ist die Vergabe der Noten für die Einzelschäden subjektiv, da durch die Beispiele nicht alle Fälle abgedeckt sind. Häufig werden jedoch die Bauwerksprüfungen jedes Mal von unterschiedlichen Personen durchgeführt, da bspw. ein anderes Unternehmen den Zuschlag für die Prüfung bekommen hat. Dies führt zu einer Homogenisierung der Ergebnisse. Der verwendete Algorithmus kann, durch die häufige Nutzung von Maximalwerten, dazu führen, dass die Veränderung einer Bewertung eines Einzelschadens eine große Auswirkung auf die Gesamtnote des Bauwerks hat, was nicht unbedingt der vorliegenden Situation entsprechen muss. Im Gegensatz dazu werden viele Verschlechterungen nicht unbedingt in der Gesamtnote abgebildet. So sind Tendenzen in der Entwicklung des Schadens anhand der Note nicht gut ablesbar.

2.3.2 Automatisierte Schadensbewertung

In der aktuellen Forschung gibt es Ansätze zur weiteren Vereinheitlichung und Automatisierung der Schadensbewertung. Die Bilddaten, welche mit UAS-Systemen gewonnen wurden, vgl. Abschnitt 2.1, können mit Machine-Learning-basierten Methoden analysiert werden. Die Klassifizierung der Schäden kann automatisch ablaufen und darauf aufbauend kann die Zustandsbewertung des Bauwerks erfolgen (Morgenthal u. a. 2019). Eine ähnliche Herangehensweise wird auch in G. Li u. a. (2017) beschrieben. Diese Methoden haben jedoch gemein, dass eine relativ große Menge an Trainingsdaten notwendig sind, um gute Ergebnisse zu erhalten.

Ein anderer Ansatz ist die Erstellung von Regeln bei der Verwendung von Ontologien für die Schadensverarbeitung. Regeln können für verschiedene Ziele eingesetzt werden: die Klassifizierung von erfassten Schäden, Vorschläge für passende Instandhaltungsmaßnahmen oder die Bewertung der Schäden und des gesamten Bauwerkszustandes (Ren, Ding und H. Li 2019). In Hamdan und Scherer (2019) wird außerdem beschrieben, wie mit Hilfe von Regeln die Schlussfolgerung möglicher Schäden umsetzbar ist, die von außen nicht erkennbar sind. Dazu werden sichtbare Schäden in Verbindung mit anderen Informationen, wie dem Baujahr, durch welches man auf den gültigen Standard zum Zeitpunkt der

Errichtung der Brücke schließen kann, betrachtet. Die Überprüfung der Annahmen muss erfolgen, bevor sie in das Modell übernommen werden. Für das Erstellen von Regeln sind allerdings auch viele Erfahrungswerte aus einigen durchgeführten Projekten notwendig, um die Wahrscheinlichkeit richtiger Annahmen zu erhöhen.

3 Analyse der Schadensdatenbank

SIB-BAUWERKE

3.1 Allgemein

Die in Deutschland derzeit gängige Software für die Bauwerksprüfung nach DIN 1076 ist SIB-BAUWERKE. Mit diesem Programm können die Grunddaten, Verwaltungsdaten und Informationen über den Zustand und die Ergebnisse durchgeführter Prüfungen von Infrastrukturbauwerken, wie Brücken und Tunnel, gespeichert werden (Tulke u. a. 2016). Die Anwendung des Programmsystems für die Bundesfernstraßen ist durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) festgelegt (BMVBS 2013a). Den Straßenbauverwaltungen der Länder, Kreise und Kommunen wurde die Nutzung ebenfalls empfohlen. Die zugehörigen Richtlinien zur Bauwerksprüfung nach DIN 1076 sind die Anweisung Straßeninformationsbank Segment Bauwerksdaten (ASB-ING) und RI-EBW-PRÜF. In dieser Arbeit wurde mit der derzeit aktuellen Version 1.93 von SIB-BAUWERKE (Stand: 12/2019) gearbeitet.

Zuerst werden in diesem Kapitel allgemein die Funktionen von relationalen Datenbanken aufgezeigt. Danach wird der Aufbau der Datenbank von SIB-BAUWERKE erklärt und anschließend die Durchführung der Schadenseingabe in diesem Programm beschrieben.

3.2 Relationale Datenbanken

Nach Angabe des Herstellers besteht SIB-BAUWERKE aus einer relationalen Datenbank, der Clientsoftware, der Verbindung zwischen Client und Datenbank mittels ODBC-Verbindung, dem Graphik- und Dokumentenarchiv (Bilder-, Plan-, Dokumenten-Dateien) und dem Wissensarchiv (Schlüsseldateien) (*WPM Ingenieure GmbH* 2020). Das Kernstück bildet eine relationale Datenbank bestehend aus 61 Tabellen im DBF-Format, welche über die Bauwerks- bzw. Teilbauwerksnummer miteinander verknüpft sind. In diesen sind alle textlichen und numerischen Werte enthalten, die neben den Schadensbeschreibungen und -bewertungen auch alle Grunddaten des Bauwerks, wie Konstruktionsweise, Abmessungen und Baujahr, beinhalten.

Relationale Datenbanken beruhen auf Beziehungen zwischen Objekten. Das sind auf der einen Seite die Zellen einer Zeile einer Tabelle, die in Verbindung miteinander stehen und auf der anderen Seite sind auch mehrere Tabellen einer Datenbank über Beziehungen miteinander verknüpft. Die Identität einer Zeile soll über einen Schlüssel (Primärschlüssel) eindeutig bestimmbar sein, häufig wird dafür eine ID verwendet. Die Verknüpfung unterschiedlicher Datenbanktabellen erfolgt über Fremdschlüssel, d. h. der Primärschlüssel einer Tabelle taucht in einer anderen als Fremdschlüssel wieder auf. Häufig wird für die Verknüpfung eine neue Tabelle angelegt, um Redundanzen der Datensätze zu vermeiden, wenn Elemente mehrfach verknüpft werden.

3.2.1 Aufbau der Datenbank

In den Tabellen der Datenbank sind alle Informationen, die ein Bauwerksbuch enthalten muss, aufgeführt. Die Daten über die Hauptbauteile sind auf mehrere Tabellen, u. a. „Teilbauwerk“, „Brücke“ und „statisches System“, verteilt. Die Programmoberfläche für die Angabe der allgemeinen Bauwerksdaten ist in Abb. 3.2 dargestellt. Für die Konstruktionsbauteile, wie „Kappen“ oder „Abdichtungen“ gibt es jeweils eine eigene Tabelle, in denen die allgemeinen Daten, wie Maße und Einbaujahr, verzeichnet sind. Die Baustoffe sind zentral in einer separaten Tabelle gesammelt, von der sie auf ein Bauteil referenzieren (vgl. Abb. 3.1). Alle Tabellen der Datenbank sind über die Bauwerks- bzw. Teilbauwerksnummern untereinander verknüpft. Statt der Stichworte, die in der Programmoberfläche für die Bauwerks- und Schadensbeschreibung zu sehen sind, werden in den Tabellen nur die zugehörigen 15-stelligen IDs aus den Schlüsseltabellen der ASB-ING hinterlegt (BMVBS 2013b). Zahlenwerte für Mengen- und Dimensionsangaben und Texte, die bspw. den Namen des ausführenden Unternehmen darstellen, sind als solche in den Tabellen eingetragen.

Hauptbauteile:	Konstruktionsteile:	Schäden:		
Brücke	Abdichtungen	Prüfanweisungen	akt. Schäden	alte Schäden
Teilbauwerk	Kappen	Prüfgeräte	akt. Prüf.	alte Prüf.
Felder	...		akt. Empf.	alte Empf.
Stat. System	Lager		Zuordnung Schäden-Empf.	
Nachrechnung	Vorspannungen			
Baustoffe				

Abbildung 3.1: Tabellenstruktur der Datenbank von SIB-BAUWERKE

Landesbetrieb Straßenwesen

SIB-BAUWERKE

Brücke

Bauwerksnummer **2948500** **0** Interne Bwnr. **51239002**

Querschnitt Überbau Einstegiger Überbau als Vollquerschnitt
 Querschnitt HTragwerk Mit Querschnitt des Überbaus identisch
 Bauverfahren Überbau Fertigteilmontage mit Komplettierung Hohlkörperplatte

Gesamtlänge	4,20 m	Konstruktionshöhe min.	0,40 m	BW-Winkel	86,0 gon
Breite	8,10 m	Konstruktionshöhe max.	0,43 m	Winkelrichtung	Rechts
Brückenfläche	34 m ²	Längsneigung max.	0,0 %	Lichte Weite bei Einfeld	3,61 m
Anzahl der Überbauten	1 Stk	Querneigung max.	1,0 %	Lichte Höhe	0,85 m
Abstand Überbauten	0,00 m	Überschüttungshöhe max.	0,00 m	Anzahl der Stege	1 Stk
Gesamtbreite	8,70 m	Überschüttungshöhe min.	0,00 m	Anzahl der Felder	1 Stk
Kon. Maßn. für n. Verst.		Koppelfugen	Keine Koppelfugen vorhanden		
Krümmung	Nicht gekrümmt (R > 1500 m), nicht aufgeweitet				
Bemerkungen zum Baugr.	***				
Bemerkungen	***				

Letzte Bearbeitung 20.03.2012 06:40:43
Bearbeiter WALTHERF
Zurück

Stat. System / Tragfähigkeit	Fahrbahnübergänge	Brückenseile	Gestaltung	Baustoffe
	Abdichtungen	Verfüllungen Risse	Leitungen	
Gründungen	Kappen	Betonersatzsysteme	Felder / Stützungen	
Vorspannungen	Schutzeinrichtungen	OS-System Beton		
Erd- und Felsanker	Ausstattungen	RHDB (Dünnbeläge)	Nachrechnung	

Abbildung 3.2: Programmoberfläche SIB-BAUWERKE - Allgemeine Bauwerksdaten

3.2.2 Tabellen zur Schadensaufnahme

Für die Bauwerksprüfung sind die Tabellen mit den Prüfanweisungen und -geräten sowie mehrere Tabellen für die Schadensdokumentation relevant. Diese sind unterteilt in Prüfungen, Schäden und Empfehlungen. Für diese drei Sachverhalte gibt es jeweils eine Tabelle, die die Einträge aus allen erfassten Prüfungen enthält, und jeweils eine Tabelle, die nur die aktuellen Datensätze beinhaltet (vgl. Abb. 3.1). In der Tabelle zu den Prüfungen sind allgemeine Daten erfasst, wie das Prüfdatum, der Name des Prüfers, die Prüfrichtung und die Zustandsnoten des Bauwerks. In der Tabelle der Empfehlungen sind Maßnahmen zur Bauwerksinstandsetzung und u. a. deren Dringlichkeit aufgelistet. Diese Maßnahmenempfehlungen können in einer separaten Tabelle mit den zugehörigen Schäden verknüpft werden.

In der Tabelle der Schäden sind ihre nach ASB-ING definierten Attribute, wie Hauptbauteil, Bauteilergänzung, Menge und Lage, gelistet. Bei Attributen, zu denen eine beliebige Zahl angebbar ist, wie die Menge mit Dimensionen oder Ortsangaben, wird diese in eine separate Spalte hinter die des Schlüsselwortes geschrieben. Die Anzahl der Attribute, die einem Schaden zugeordnet werden können, sind in einer relationalen Datenbank starr festgelegt, da die Spalten, welche für die Eintragung vorgesehen sind, vorher bestimmt werden müssen und nicht beliebig erweiterbar sind. In SIB-BAUWERKE ist je Schlüsseltablette aus der ASB-ING genau ein Attribut auswählbar.

Von den zugehörigen Fotos der Schäden ist der Dateiname in einer Tabellenspalte hinterlegt. Die Fotodateien werden in einem separaten Ordner üblicherweise im JPG-Format gespeichert. Die Datenbankdateien und alle Ordner mit Fotos oder anderen Dateien werden für die Datenübergabe in einem komprimierten Ordner im CAB-Format gespeichert.

3.2.3 Versionierung der Schäden

Für Schäden, die bereits seit einer vorherigen Prüfung bestehen, wird in der Tabelle der aktuellen Prüfung eine neue Zeile angelegt, welche dieselbe Schadens-ID erhält. In der neuen Zeile wird das neue Datum mit dem aktuellen Prüfer eingetragen. Weiterhin können Änderungen und Ergänzungen in der Schadensbeschreibung getätigt werden. In der Programmoberfläche wird jedoch nur die aktuellste Version des Schadens angezeigt und es ist nicht erkennbar welche Ergänzung in welcher Prüfung getätigt wurde. Somit ist momentan Die Angabe von Änderungen nur im freien Text der Schadensbeschreibung möglich.

3.2.4 Bauteilzuordnung

Die Verknüpfung von Zeilen der Tabellen Schäden und Bauteile, ist in relationalen Datenbanken über Fremdschlüssel möglich. Alle Schäden sind einem Bauwerk über die Bauwerksnummer zugeordnet. Die Hauptbau- und Konstruktionsteile sind mit weiteren Details in separaten Tabellen aufgelistet, um im Bauwerksbuch dargestellt zu werden. Die Zuordnung der Schäden zu Bauteilen erfolgt nicht durch die Verknüpfung der Tabelleneinträge über Fremdschlüssel, sondern über ein Schlüsselwort aus der ASB-ING. Mit dem Schlüsselwort wird allerdings nur eine Bauteilart definiert, wie die Flügelwand des Widerlagers, und nicht um welches Bauteil es sich konkret handelt, wenn mehrere dieser Art existieren. Dies wird über die Ortsangabe festgelegt.

3.2.5 SQL-Abfragen

Der Inhalt von Relationalen Datenbanken ist über Abfragen mit der *Structured Query Language (SQL)* analysierbar. Mit dieser Abfragesprache können die Datensätze nach bestimmten Kriterien gefiltert werden, wie bspw. der Bewertung, der Schadensart oder dem betroffenen Bauteil. Außerdem sind Zeilen löschar oder mit neuen Datensätzen erweiterbar. Die Auswertung kann tabellenübergreifend durchgeführt werden, wenn diese über Fremdschlüssel miteinander verbunden sind. So können Ergebnistabellen mit einer individuellen Auswahl von Datensätzen erstellt werden. Ebenso können in der Ergebnistabelle neue Spalten ergänzt werden, die bspw. das Ergebnis aus Berechnungen mit den Werten aus anderen Spalten darstellen (Unterstein und Matthiessen 2012).

3.3 Anwendung des Programmes

Bei der Vergabe eines Prüfauftrages an ein Ingenieurbüro werden die benötigten Bauwerksdaten von der zuständigen Stelle im CAB-Dateiformat übergeben, welche in das Programm SIB-BAUWERKE eingelesen werden können. Bei diesen Dateien handelt es sich um komprimierte Archive, welche eine Datenbank sowie einige Zusatzdokumente (z. B: Fotos und Zeichnungen) enthalten. Der Arbeitsablauf der Schadensaufnahme mit SIB-BAUWERKE ist in Abb. 3.4 dargestellt. In dieser Arbeit wird vor allem die Anwendung des Programms bei der Durchführung von Bauwerksprüfungen betrachtet. Einen weiteren Aspekt stellt die Nutzung in den zuständigen Straßenbaubehörden dar, welche meist mehr Rechte in der Bearbeitung der Daten und Einstellungen besitzen und weitere Funktionen zur Auswertung der Daten nutzen, um bspw. die Jahresstatistik über Zustandsnoten und Altersstruktur zu erstellen.

Zunächst erhält das mit der Prüfung beauftragte Ingenieurbüro eine schreibgeschützte Version der Übergabedatei, da es nicht möglich ist, mit mehreren Personen parallel an dem Bauwerk zu arbeiten. Die zuständige Behörde möchte die bearbeitbare Datei so spät wie möglich übergeben, damit sie die Möglichkeit behält, Veränderungen, wie z. B. durchgeführte Instandsetzungsmaßnahmen, einzutragen und nicht damit warten muss, bis die Prüfung durch das Ingenieurbüro abgeschlossen ist. Die schreibgeschützte Datei kann in das Programm eingelesen und der Zustandsbericht des Bauwerks, d. h. die Auflistung aller Schäden, in PDF-Form ausgegeben werden. Die Schadensbeschreibung wird durch die Auflistung aller Schlüsselworte und Ergänzungen hintereinander und durch Kommas getrennt dargestellt (vgl. Auszug in Abb. 3.3). Die Fotos zu den Schäden können, wenn vorhanden, im Bericht direkt zur Schadensbeschreibung angezeigt werden.

3.3.1 Sortierung der Schäden

Die Sortierung der Schäden erfolgt dabei nach Bauteilgruppen (z. B. Beläge, Kappen) oder der Schadens-ID. Es ist auch möglich eine eigene Sortierung anhand von Filter- und Sortierkriterien oder händisch festzulegen, jedoch ist diese Möglichkeit sehr kompliziert in der Anwendung und die gewünschten Ergebnisse konnten nicht erreicht werden. Erstrebenswert ist hier eine Sortierung in Prüfreihenfolge, d. h. dass die Schäden in der vorliegenden Reihenfolge begutachtet werden können ohne doppelte Wege absolvieren zu müssen. Dies ist bei Bauwerken mit größeren Ausmaßen oder schwer zugänglichem Terrain besonders wichtig.

3.3.2 Aufnahme der Schäden am Bauwerk

Mit dem Prüfbericht der letzten Untersuchung kann die Prüfung vorgenommen werden. Dies erfolgt zumeist zunächst auf Papier. Die Veränderungen bestehender Schäden und

7.4 Schäden [5] S=0, V=0, D=2 BSP-ID 021-06 Widerlagerwand, Beton, Eine Stelle, Aussinterung, Widerlager hinten, 1,00 m vom rechten Bauteilrand, Alter Schaden nicht behoben, Siehe letzte Hauptprüfung, Bild:2570 WL HINTEN RECHTS  2570 WL HINTEN RECHTS [10] S=0, V=0, D=3 BSP-ID 021-06 Widerlagerwand, Beton, Großflächig, Feuchte Stelle, Gesamtes Bauteil, Vorne und hinten am Bauwerk, Oben, Alter Schaden nicht behoben, Siehe letzte Hauptprüfung, Oberflächenwasser dringt in das Bauwerk ein und läuft über die Widerlagerwände ab, Bauteil zum Zeitpunkt der Prüfung trocken	Abdichtung [42] S=0, V=0, D=2 BSP-ID 257-02 Abdichtung, Teilweise, Schadhafte, Oben auf dem Bauwerk, Alter Schaden nicht behoben, Siehe letzte Hauptprüfung Kappe [41] S=0, V=0, D=2 BSP-ID 230-09 Kappe, Beton, Eine Stelle, Abgeplatzt, Am Ende des Bauwerks, Links, Oben auf dem Bauwerk, Alter Schaden nicht behoben, Siehe letzte Hauptprüfung, Bild:2567 KAPPE HINTEN LINKS  2567 KAPPE HINTEN LINKS
---	---

Abbildung 3.3: Auszug der Darstellung der Schadensbeschreibungen und Fotos im Zustandsbericht

neu entstandene werden textlich und mit Fotos festgehalten. In der Nachbereitung erfolgt die Eingabe der Schäden in das Programm und die Aufbereitung und das Anfügen der Fotos. Eine direkte Eingabe der Schäden vor Ort ist prinzipiell möglich, doch hat sich dies in der Praxis als zu umständlich und zeitaufwändig herausgestellt, da bei jeder Neueintragung ein langer Baum an Eingaben erforderlich und keine schnelle Ergänzung möglich ist.

3.3.3 Ergänzung bestehender Schäden

Nach erfolgter Untersuchung des realen Objektes kann die veränderbare Datei angefordert und die Schäden eingetragen werden. Bei bereits erfassten Schäden werden die Veränderungen dokumentiert und die Fotos durch aktuelle ersetzt. Dafür können Stichworte vgl. Abb. 3.5 verwendet oder die Angabe der Menge bzw. Ausbreitung aktualisiert werden. Allerdings ist dies oft nicht nutzbar, da bei Verwendung der Stichworte das Programm nicht anzeigt in welcher Prüfung diese Änderungen festgestellt wurden. So ist es nur möglich Ergänzungen zu einem bestehendem Schaden, unter Angabe des Prüfungsjahres, im Freitext zu tätigen.

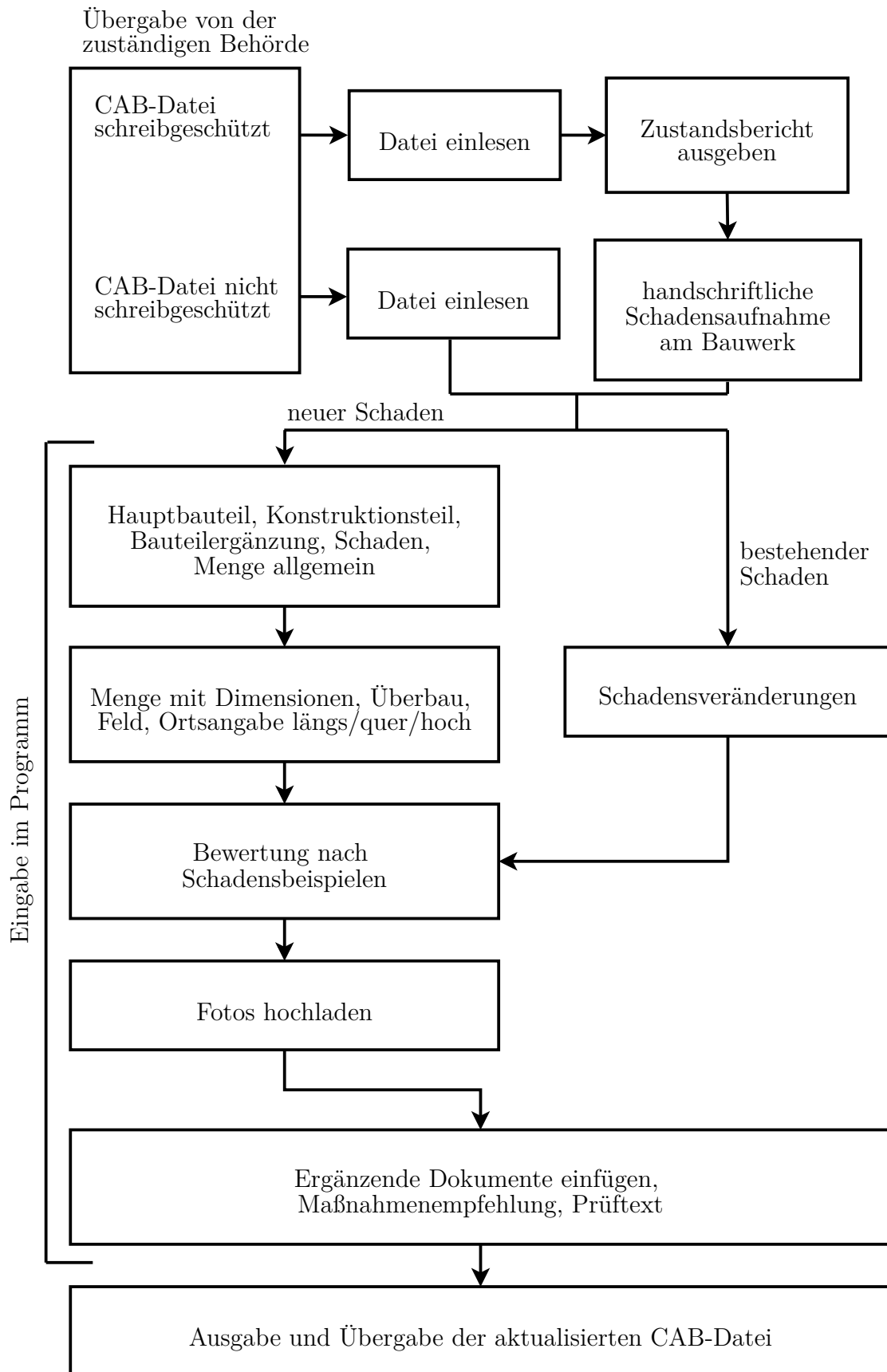


Abbildung 3.4: Workflow der Schadensaufnahme mit SIB-BAUWERKE

Abbildung 3.5: Programmoberfläche SIB-BAUWERKE - Maske zur Auswahl eines Schlüsselwortes zur Beschreibung der Schadensveränderung

3.3.4 Eingabe eines neuen Schadens

Eine Schadensbeschreibung besteht aus mehreren Stichworten, die in den Schlüsseltabellen der ASB-ING vorgegeben sind (BMVBS 2013b) und in dem Programm ausgewählt werden können. Diese Stichworte sind in mehrere Kategorien unterteilt (z. B.: Hauptbauteil, Menge allgemein, Schaden), aus welcher jeweils nur eines angewählt werden kann. Beliebige Erweiterungen sind jedoch im Freitext möglich. Bei neu aufgetretenen Schäden muss zunächst das Hauptbau- bzw. Konstruktionsteil gewählt werden, an dem sich die betroffene Stelle befindet. Für das Hauptbauteil stehen nur die Begriffe zur Auswahl, die aufgrund der Auswahl der Bauwerksart in den allgemeinen Bauwerksdaten in Frage kommen. Bei der Auswahl der Konstruktionsteile sind die farbig markiert, welche in den Bauwerksdaten bzw. dem Bauwerksbuch erfasst sind. Optional kann unter dem Stichwort „Bauteilergänzung“ ein Material ausgewählt werden. Wenn dies bereits in den Bauwerksdaten zu dem Bauteil hinterlegt ist, wird für Hauptbauteile das entsprechende Schlüsselwort durch das Programm automatisch ausgewählt. Allerdings hat diese automatische Übernahme bei der Anwendung des Programms nicht zuverlässig funktioniert. Danach wird ein Schadenstyp aus dem gegebenen Katalog gewählt (vgl. Abb. 3.6). Man muss sich für einen Schadenstyp entscheiden, obwohl diese häufig aus mehreren Teilschäden bestehen (bspw. eine Betonabplatzung mit gleichzeitiger Durchfeuchtung). Wenige Schadenskombinationen sind im Auswahlkatalog vorhanden. Ansonsten muss sich für einen

Hauptschaden entschieden werden, zu dem eine detailliertere Beschreibung im Freitext möglich ist. Dies ist jedoch für die einheitliche und maschinelle Auswertung der Daten von Nachteil.

Als Pflichtfeld muss ebenfalls eine „Menge allgemein“ aus den drei Grundkategorien „kleine“, „mittlere“ oder „große“ Ausbreitung angegeben werden, bspw. „Flächendeckend“, „Punktuell“ oder „Größtenteils“. Weiterhin können optionale Angaben u. a. zur genauen „Menge mit Dimension“ und Ortsangaben in verschiedene Richtungen gemacht werden. In den Einstellungen des Programms ist es möglich, weitere Eingabefelder als Pflichtfelder zu deklarieren. Bei numerischen Angaben, wie bei der „Menge mit Dimension“, ist die Eingabe meist auf Zahlen mit sechs vor und zwei Stellen nach dem Komma beschränkt.

Abbildung 3.6: Programmoberfläche SIB-BAUWERKE - Maske zur Auswahl eines Schlüsselwortes zur Beschreibung der Schadensart

3.3.5 Ortsangabe

Die genaue Ortsangabe ist wichtig, um dem Ausführenden der nächsten Prüfung die Lokalisierung der vorhandenen Schäden zu vereinfachen. Es gibt selten Pläne o. Ä. in denen die Lage vermerkt werden kann. Es können jedoch Skizzen erstellt und dem Prüfbericht angehängt werden. Von einigen Behörden stehen Formblätter für diesen Zweck zur Verfügung. Diese Dokumente können in der Schadensbeschreibung über einen textlichen Verweis den Schäden zugeordnet und in der Zeichnung kann die jeweilige Schadens-IDs vermerkt werden. Meist ist die Position jedoch über die drei Schlüsselbegriffe „Ortsanga-

be längs“, „hoch“ und „quer“ hinterlegt. Es ist auch eine genaue Werteangabe möglich, z. B. „2,5m vor Bauwerksende“. Die Prüfrichtung des Bauwerkes, d. h. die Festlegung von „vorn“ und „hinten“, wird zu Beginn jeder Prüfung festgelegt. Die linke und rechte Seite ergibt sich aus der Definition der Bauwerksrichtung.

3.3.6 Schadensbewertung

Für die Bewertung der Schäden muss ein Schadensbeispiel aus dem Katalog im Anhang der RI-EBW-PRÜF gewählt werden. Von dem Programm werden die Beispiele vorgeschlagen, die aufgrund der vorher gewählten Schlagworte (u. a. Bauteil, Schadenstyp) infrage kommen (vgl. Abb. 3.7). Schadensbeispiele, die das Programm nicht vorschlägt, können nicht angewählt werden. Wichtig ist dabei meist, dass auch ein Material des betroffenen Bauteils angegeben wird. Sonst kann es dazu kommen, dass das Programm gar kein passendes Schadensbeispiel findet. Welche Schadensbeispiele bei bestimmten Kombinationen von Schlüsselwörtern vorgeschlagen werden sollen, ist in der Auflistung der Schadensbeispiele in der RI-EBW-PRÜF angegeben. Diese Unterteilung basiert größtenteils auf dem Material. Jedoch ist das Material, welches sich unter dem Stichwort „Bauteilergänzung“ verbirgt, kein Pflichtfeld. Dies sind nur das Hauptbau- oder Konstruktionsteil, der Schaden, die Menge allgemein und die Schadensbewertung mit dem Schadensbeispiel, da diese Angaben für den Berechnungsalgorithmus der Gesamtzustandsnote, wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, notwendig sind. In der RI-EBW-PRÜF sind die Pflichtfelder jedoch festgelegt worden. Diese sieht vor, dass auch die Bauteilergänzung anstatt des Hauptbau- oder Konstruktionsteiles als Pflichtangabe gewählt werden kann. Eine andere Möglichkeit ist die Nutzung der sogenannten 99er Schadensbeispiele, deren ID auf 99 endet. Diese können verwendet werden, wenn kein anderes Beispiel zu dem vorliegenden Fall passt und die Bewertung selbst festgelegt werden. Dies ist jedoch von den meisten Behörden nicht erwünscht. Außerdem kann die Sammlung der Schadensbeispiele erweitert bzw. geändert werden. Dafür muss ein Antrag (vgl. BMVI (2017)), an die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) gestellt werden.

Aus den vergebenen Bewertungen errechnet das Programm anschließend die Zustandsnoten. Die Darstellung erfolgt für die Bauteilgruppen und das gesamte Teilbauwerk. Die Substanzkennzahl wird ebenfalls aufgeführt, was der Zustandsnote ohne Berücksichtigung der Verkehrssicherheit entspricht.

3.3.7 Fotos

Zu jedem Schaden kann maximal ein Foto direkt ausgewählt werden. Weitere können dem gesamten Prüfbericht angehängt und über einen textlichen Verweis im Schadensbericht zugeordnet werden.

Landesbetrieb Straßenwesen **SIB-BAUWERKE** Schadensbewertung

Bauwerksnummer **3250528** 0 Interne Bwnr. 6B16700405

	S	V	D	Bereich
002-00 BRÜCKEN, ÜBERBAU / * / BETON außer Betondeckung / *				
001-07 durchgebogen (Bewertung abhängig vom Grad der Durchbiegung)				
002-01 Grobkornstellen/Hohlstelle/Fremdkörpereinschluss im Beton (lediglich kleine Flächen, ohne t	0	0	1	
002-02 Abplatzungen im oberflächennahen Bereich mit oder ohne freil. Bewehrung	0	0		D=1-2
002-03 Abplatzungen wie vor, aber über Verkehrsraum	0			V=1-3, D=1-2
002-04 freiliegende Tragbewehrung mit korrodierter Bewehrung (keine nennenswerte Querschnittsm	1	0	2	
002-05 Tragbewehrung liegt im karbonatisierten Bereich und ist korrodiert (nicht Spannbewehrung)	1	0	3	
002-06 freiliegende Tragbewehrung mit korrodierter Bewehrung (einsetzende Querschnittsminderun	2	0	3	
002-07 stark korrodierte Tragbewehrung (fortgeschrittene Querschnittsminderung)	3	0	3	
002-08 stark korrodierte Tragbewehrung (teilweiser Ausfall von Tragbewehrung)	4	0	4	
002-09 stellenweise Durchfeuchtung/Ausblühungen/Aussinterung	0	0		D=1-2
002-10 großflächige Durchfeuchtungen/Ausblühungen/Aussinterung	0	0		D=2-3
002-11 Hartschaum-/ Bretteinlagen nicht entfernt (bei Bewegungsfugen)	1	0	2	
002-12 Ausblühung eisenhaltiger Zuschlagstoffe / Rostfahne	0	0	1	
002-13 Walzträger im Beton, Füllbeton schadhaf	0			V=0-3, D=1-2
002-14 Abweichung der Hauptbauteile von der vorgesehenen Gebrauchslage/Festigkeiten		0		S=1-4, D=1-4
002-99 kein passendes Schadensbeispiel vorhanden !!!				

	S	V	D	
0	0	0	0	Zurück
1	1	1	1	Speichern
2	2	2	2	Bei Einfacher Prüfung zu kontrollieren
3	3	3	3	JA
4	4	4	4	NEIN

[01] Platte · [03] Beton · [04] Abgeplatzt · [05] Eine Stelle · [06] Durchmesser: 8,0 cm · [09] Mitte längs am Bauwerk · [10] Mitte quer · [11] Unterseite · [12] S=0, V=0, D=1 - BSP: 002-02
ABPLATZUNGEN IM OBERFLÄCHENNAHEN BEREICH MIT ODER OHNE FREIL. BEWEHRUNG
 · T= 1cm; Alter Schaden nicht behoben, HP 2019; 3,50m von Bauwerksanfang; 7m von linkem Ende des Überbaus · Bild: HP19-30.JPG

Abbildung 3.7: Programmoberfläche SIB-BAUWERKE - Maske zur Bestimmung der Schadensbewertung aus vorgeschlagenen Schadensbeispielen

3.3.8 Maßnahmen und Prüftext

Am Ende können Maßnahmen zur Behebung der Mängel vorgeschlagen werden, welche den Schäden zuordenbar sind. Dabei kann eine Maßnahme mehrere Schäden abdecken. Außerdem ist ein Prüftext nach den Vorgaben der jeweiligen Behörde zu erstellen, dabei werden die Ergebnisse der Prüfung kurz zusammengefasst (z. B.: Anzahl neuer Schäden, Witterung bei Durchführung der Prüfung).

3.3.9 Kennzeichnung für Einfache Prüfung

Mit dem Programm ist die Erfassung von Haupt-, Sonder- und Einfachen Prüfungen möglich. Hauptprüfungen sind im Abstand von sechs Jahren gefordert und Sonderprüfungen nach Bedarf. Einfache Prüfungen werden drei Jahre nach einer Hauptprüfung und, soweit vertretbar, ohne Besichtigungsgeräte durchgeführt. Deshalb können in der Hauptprüfung Schäden markiert werden, welche in der Einfachen Prüfung zuzüglich zu deren üblichen Prüfungsumfang untersucht werden müssen. Dies sollte jedoch nur bei Schäden erfolgen, die in absehbarer Zeit größere Auswirkungen auf das Bauwerk haben können (BMVI 2017). Diese Markierung muss im Programm bei der Angabe der Schadensbewertung mit den Buttons in der rechten unteren Ecke gesetzt werden (vgl. Abb. 3.7).

3.3.10 Ursachen

Die Ursachen von Schäden können über Schlüsselworte in den Bemerkungen 1 bis 6 angegeben werden. Nach der RI-EBW-PRÜF sollen dem Prüfer die Ursachen bekannt sein, um die Schäden bewerten zu können, jedoch ist die Angabe der Ursachen nicht notwendig. Sollte die Ursache nicht ohne Weiteres erkennbar sein, sollte eine Objektbezogene Schadensanalyse (OSA) durchgeführt werden (BMVI 2017).

3.3.11 Auswertemodul

In SIB-BAUWERKE gibt es die Funktion der Auswertung der Datensätze mit SQL-Befehlen. Zu allgemeinen Themen, wie der „Altersstruktur“ und dem „Bauwerkszustand“, sind bereits fest programmierte Abfragen hinterlegt, da diese vom BMVBS gefordert werden. Weiterhin ist auch die Erstellung individueller Abfragen über eine Programmoberfläche möglich, wodurch der Nutzer nicht direkt mit der Abfragesprache in Berührung kommt und so keine vertiefte Datenbankkenntnisse benötigt. Dieses Auswertemodul stellt jedoch eine Erweiterung von SIB-BAUWERKE dar und muss gegen eine zusätzliche Lizenzgebühr erworben werden (*WPM Ingenieure GmbH* 2020). Es wird vor allem von Verwaltungen genutzt, um damit die geforderten jährlichen Statistiken ihres Bauwerksbestandes zu erstellen, und in dieser Arbeit nicht näher untersucht.

4 Analyse von Ontologien in der Bauwerksprüfung

4.1 Allgemein

In diesem Kapitel wird zuerst der Aufbau und die Funktionen von Ontologien erklärt. Anschließend werden bereits existierende Modelle zur Darstellung von Schäden und Brücken vorgestellt. Darauf aufbauend werden Schäden von einem Beispielobjekt in einer Ontologie dargestellt.

4.1.1 Definition von Ontologien

Eine Ontologie ist eine eindeutige formale Beschreibung eines gemeinschaftlich genutzten Modells in maschinenlesbarer Form. Diese Beschreibung erfolgt mit dem *Resource Description Framework (RDF)* und der *Web Ontology Language (OWL)*. Allgemein gesprochen besteht eine Ontologie aus mehreren Konzepten und den Beziehungen zwischen ihnen. Konzepte können auch als Klassen bezeichnet werden, welche eine hierarchische Struktur aufweisen. Superklassen beschreiben allgemeinere Konzepte und können mehrere Unterklassen haben, die feinere Teilkonzepte darstellen. Diese Klassen können verschiedene Eigenschaften (Properties) besitzen. Diese stellen entweder Merkmale oder Beziehungen dar. Vereinfacht gesagt, besteht eine Ontologie aus dem Wortschatz für einen Fachbereich mit dem man Objekte detailliert in einer maschinenlesbaren Form beschreiben kann (Yu 2014).

4.1.2 Resource Description Framework (RDF)

Mit dem RDF¹ wird eine Menge an Bedingungen definiert, mit denen Sachverhalte aus einem bestimmten Fachbereich beschrieben werden können. Eine Bedingung, auch RDF-Tripel genannt, besteht immer aus drei Teilen: Subjekt, Prädikat und Objekt (vgl. Abb. 4.1). Subjekte sind immer Instanzen einer Klasse, das Prädikat ist eine Eigenschaft und das Objekt kann ebenfalls die Instanz einer Klasse sein. So wird durch das Tripel die Beziehung zwischen den beiden Instanzen beschrieben, wobei das Prädikat eine Objekt-Eigenschaft (*owl:ObjectProperty*) darstellt. Das Objekt kann jedoch auch ein Zahlenwert oder Text

¹<https://www.w3.org/TR/rdf11-concepts/>

sein, wodurch ein bestimmtes Merkmal des Subjektes angegeben wird. Das Prädikat wird dabei als eine Datentyp-Eigenschaft (*owl:DatatypeProperty*) bezeichnet. Mehrere Tripel ergeben RDF-Graphen, aus denen wiederum weit verzweigte Netze entstehen. Mit RDF können folglich die Beziehungen zwischen Instanzen beschrieben werden (Yu 2014).

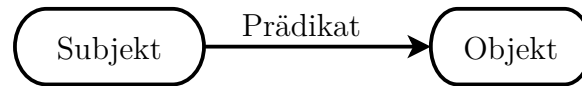


Abbildung 4.1: Graphstruktur eines Tripels

Die Elemente einer Ontologie werden über *Uniform Resource Identifier (URI)* identifiziert. Mit ihnen können Klassen, Instanzen und Eigenschaften global eindeutig benannt werden, da jede URI einzigartig ist. Ihr Aufbau gleicht dem eines *Uniform Resource Locators (URL)*, welcher Adressen von Webseiten beschreibt. Folgendes Beispiel stellt die URI der Klasse der Datentyp-Eigenschaften dar:

`http://www.w3.org/2002/07/owl#DatatypeProperty`

URLs stellen eine Untergruppe der URIs dar, doch müssen URIs nicht auf eine Webseite führen. Sie dienen meist nur zur Identifizierung einer Ressource (Yu 2014).

In einem Dokument haben mehrere Ressourcen meist den gleichen Stamm der URI und unterscheiden sich nur in der Kennung am Ende. Durch die Verwendung von Vorsilben, auch Prefixe genannt, ist die Länge des Quelltextes stark verringerbar. Nach der Definition der Prefixe können diese im gesamten Dokument an Stelle der URIs verwendet werden. Die in dieser Arbeit verwendeten Prefixe sind in Quellcode 4.1 aufgelistet. Die Stämme der URIs haben noch einen anderen Nutzen, sie werden auch als Namensräume bzw. Namespaces bezeichnet. Namensräume umfassen eine Menge von Bezeichnungen, welche eine abgegrenztes Themenfeld beschreiben. So ist es möglich, dass verschiedene URIs die gleiche Bezeichnung am Ende besitzen, aber durch die unterschiedlichen Namensräume sind die Ressourcen klar unterscheidbar und zu verschiedenen Bereichen zuordenbar. Damit kann bspw. ein Element „Riss“ in mehreren Namensräumen vorkommen, welche verschiedene Schadensarten definieren. So kann ein Betonriss von einem Stahlriss unterschieden werden.

```

@prefix rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>.
@prefix rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>.
@prefix owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>.
@prefix xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>.
@prefix foaf: <http://xmlns.com/foaf/0.1/>.

@prefix sh: <http://www.w3.org/ns/shacl#>.
@prefix ct: <http://www.iso-icdd.org/part1/2019/Container#>
@prefix ls: <http://www.iso-icdd.org/part1/2019/Linkset#>
@prefix opm: <https://w3id.org/opm#>.

@prefix dot: <https://w3id.org/dot#>.
@prefix dasb: <https://w3id.org/damagemodels/d-asb-ing#>.
@prefix cdo: <https://wisib.de/ontologie/damage/cdo#>.

@prefix brot: <https://wisib.de/ontologie/brot#>.
@prefix bridge: <https://wisib.de/ontologie/bridge#>.
@prefix brcomp: <https://wisib.de/ontologie/brcomp#>.
@prefix bmat: <https://wisib.de/ontologie/bmat#>.

@prefix codo: <https://w3id.org/brin/codo#>.
@prefix gdo: <https://w3id.org/brin/gdo#>.
@prefix ineq: <https://w3id.org/brin/ineq#>.
@prefix inin: <https://w3id.org/brin/inin#>.
@prefix mro: <https://w3id.org/brin/mro#>.
@prefix pruef: <https://w3id.org/brin/pruef#>.
@prefix stdo: <https://w3id.org/brin/stdo#>.
@prefix wado: <https://w3id.org/brin/wado#>.
@prefix wodo: <https://w3id.org/brin/wodo#>.

```

Quelltext 4.1: Auflistung der in dieser Arbeit auftretenden Prefixe

Die genannten Datenmodelle bzw. Sprachen (RDF und OWL) sind genau genommen keine Programmiersprachen, sondern abstrakte Konzepte, um Informationen in maschinenlesbarer Form zu beschreiben. Sie können verschiedene Serialisierungen erhalten, d. h. sie werden durch unterschiedliche Syntax repräsentiert. Beispiele dafür sind RDF/XML, Notation-3, N-Triples und Turtle. Ein Ausschnitt einer Ontologie in RDF/XML-Syntax ist in Quellcodebeispiel 4.2 und in Turtle-Syntax Beispiel 4.3 dargestellt. Es zeigt die Instanz des „Schaden 1“, welche vom Typ „dot:DamageArea“ ist und der die „Bewertung 1“ zugeordnet wird.

```
<?xml version=""=1.0?>
<rdf:RDF xmlns="http://www.semanticweb.org/karoline-pohl/brueckeABox#"
xmlns:dot="https://w3id.org/dot#"
xmlns:owl="http://www.w3.org/2002/07/owl#"
xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
xmlns:dasb="https://w3id.org/damagemodels/d-asb-ing#">

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/karoline-pohl/brueckeABox#schaden-1">
  <rdf:type rdf:resource="https://w3id.org/dot#"DamageArea/>
  <dasb:hasAssessment
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/karoline-pohl/brueckeABox#
bewertung"-1/>
</owl:NamedIndividual>

</rdf:RDF>
```

Quelltext 4.2: Ausschnitt der Schadensontologie in XML-Syntax

```
@prefix : <http://www.semanticweb.org/karoline-pohl/brueckeABox#> .
@prefix dot: <https://w3id.org/dot#> .
@prefix owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#> .
@prefix rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#> .
@prefix dasb: <https://w3id.org/damagemodels/d-asb-ing#> .

:schaden-1 rdf:type owl:NamedIndividual .
:schaden-1 rdf:type dot:DamageArea .
:schaden-1 dasb:hasAssessment :bewertung-1 .
```

Quelltext 4.3: Ausschnitt der Schadensontologie in Turtle-Syntax

4.1.3 Web Ontology Language (OWL)

Um Klassen zu beschreiben, kann das Vokabular des Datenmodells *Resource Description Framework Schema (RDFS)*² genutzt werden. Damit wird die Hierarchie festgelegt, d. h. welche Über- und Unterklassen eine Klasse besitzt, und die Prädikate, welche mit den Klassen genutzt werden dürfen. *OWL*³ verfolgt das gleiche Ziel, umfasst aber einen größeren Funktionsumfang als RDFS und ist deren Erweiterung. Genauer gesagt, sind dies Ontologien, welche Klassen und Eigenschaften zur Beschreibung von anderen Klassen und

²<https://www.w3.org/TR/rdf-schema/>

³<https://www.w3.org/TR/owl2-rdf-based-semantics/>

Eigenschaften bereitstellen (Yu 2014).

OWL folgt dabei der *Open World Assumption (OWA)*, d.h. was nicht definiert ist in der Ontologie, ist nicht zwingend falsch, sondern unbekannt. Währenddessen bei konventionellen BIM-Methoden die *Closed World Assumption (CWA)* angewendet wird, was bedeutet, dass alles was nicht definiert ist, als falsch angesehen wird (Gayo u. a. 2017).

In einer Ontologie wird weiterhin zwischen der ABox und TBox unterschieden. Die TBox bildet die terminologische Komponente, welche den vordefinierten Wortschatz von Klassen und Eigenschaften, zur Beschreibung von Sachverhalten, enthält. Jedoch sind in ihr noch keine konkreten Instanzen enthalten. Die ABox wird dagegen als Daten- bzw. Aussagenkomponente bezeichnet. Sie besteht aus den Tripeln zur Beschreibung der Instanzen, d. h. sie umfasst die Beziehungen und Eigenschaften zwischen Instanzen realer Sachverhalte (Baader 2010). Eine TBox wäre bspw. die Definition verschiedener Schadenstypen als einzelne Klassen. Die ABox enthält dagegen eine Schadensinstanz, der ein oder mehrere dieser vorher definierten Typen zugeordnet werden.

4.1.4 Software zur Erstellung von Ontologien

Zur Erstellung und Bearbeitung von Ontologien wird im Rahmen dieser Arbeit das Open-Source Programm *Protégé*⁴ verwendet. Mit diesem sind Klassen und Eigenschaften erstellbar. Weiterhin können aus den Klassen Instanzen erstellt und miteinander verknüpft werden. Dieses Programm stellt eine Hilfe zur Untersuchung der Datenstruktur und ihrer Eignung für die Bauwerksprüfung dar. Für die praktische Anwendung von Ontologien in Bereich des Schadensmanagement ist jedoch die Erstellung einer neuen fachspezifischen Anwendung notwendig, um eine benutzerfreundliche Eingabe für den Endanwender zu ermöglichen. In dieser Arbeit werden deshalb nur die funktionellen Möglichkeiten von Ontologien untersucht und einige Anforderungen für ein solches Programm definiert.

4.2 Ontologien in der Bauwerksprüfung

Für die Beschreibung von Schäden an Bauwerken sowie für die Darstellung der Bauteile von Brücken existieren bereits einige Ontologien.

4.2.1 Damage Topology Ontology

In Hamdan, Bonduel und Scherer (2019) wird die DOT⁵, eine Kernontologie zur Beschreibung von Schädigungen an Bauwerken, vorgestellt. In dieser werden Schäden in drei De-

⁴<https://protege.stanford.edu>

⁵<https://w3id.org/dot>

taillierungsebenen unterschieden. Ein Schadenselement (*dot:DamageElement*) entspricht einem einzelnen abgrenzbarem Schaden mit exakten bekannten Ausmaßen, bspw. ein Riss im Beton mit erfasster Breite, Länge, Tiefe und Verlauf. Mehrere benachbarte gleichartige Elemente können zu einem Schadensmuster (*dot:DamagePattern*) zusammengefasst werden. Diese können wiederum in einem Schadensbereich (*dot:DamageArea*) liegen. Auf die detaillierte Beschreibung von Elementen und Mustern kann auch verzichtet und stattdessen können direkt Bereiche mit bestimmten Schäden in geringerem Detaillierungsgrad definiert werden (z. B.: ein Bereich mit mehreren Rissen mit Rissbreiten kleiner 0,2 mm oder ein Bereich mit Durchfeuchtungen des Mauerwerks). Bei der Brückenprüfung nach DIN 1076 reicht im Prüfbericht meist der Detaillierungsgrad des Schadensbereiches mit Angabe grober Maße oder Spannweiten, in denen sich die Schäden bewegen, aus.

Weiterhin können mit dem Vokabular der DOT den Schäden eine Beschreibung, eine Ursache, andere Dokumente und ein Prüfungstermin zugeordnet werden.

Bei der Erstellung der ABox der Schadensontologie wurde die Unterscheidung zwischen die Standsicherheit beeinträchtigende Schäden (*dot:StructuralDamage*) und Mängeln, die die Standsicherheit nicht beeinflussen (*dot:Defect*), wie es in der DOT vorgesehen ist, nicht berücksichtigt. Der Einfluss eines Schadens auf die Standsicherheit ist über die Bewertung definiert.

Zu der Kernontologie existieren bereits Erweiterungen⁶ (vgl. Tab. 4.1). Zum einen gibt es eine Ontologie für die Beschreibung von Betonschäden *Concrete Damage Ontology (CDO)*, bestehend aus Klassen für verschiedene Schadensarten und Datentyp-Eigenschaften für die Angabe genauer Zahlenwerte zur Ausprägung von Schädigungen. Desweiteren liefert die Erweiterung *ASB-ING Assessment Ontology (DASB)* ein Vokabular für die Bewertung von Schäden, Bauteilgruppen und des Gesamtbauwerkes (Hamdan, Bonduel und Scherer 2019).

4.2.2 Weitere Schadensontologien

Weitere Ontologien sind in einem Projekt des INTERLINK Konsortiums entstanden, welches die Erstellung einer *European Road Object-Type Library (EUROTL)* zum Ziel hat (CEDR-INTERLINK 2020). Diese *Object-Type Library (OTL)* soll die Grundlage für ein europaweites Informationsmanagementsystem im Infrastrukturbereich geben, welches den gesamten Lebenszyklus von Bauwerken abdeckt. Dabei wurden testweise Ontologien erstellt. Für Deutschland ist das die ASB-ING-Condition für die Schadensbewertung und die ASB-ING-Klassifikation⁷, die alle Hauptbau- und Konstruktionsteile nach den Schlüsselstabellen der ASB-ING enthält (vgl. Tab. 4.1). Diese Ontologien sind für die Durchführung der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 geeignet, da sie die Schlüsselworte der ASB-ING ab-

⁶<https://github.com/Alhakam/dot/tree/master/Extension>

⁷<https://roadotl.eu/static/eurotl-ontologies/testontologies/index.html>

Name	prefix	Inhalt
Damage Topology Ontology	dot	allgemeine Beschreibung von Schäden
Concrete Damage Ontology	cdo	Schäden in bewehrtem Beton
ASB-ING Assessment Ontology	dasb	Schadensbewertung nach RI-EBW-PRÜF
asb-ing-klassification	-	Schlüsselbegriffe für Haupt- und Konstruktionsbauteile nach ASB-ING
asb-ing-condition	-	Schadensbewertung nach RI-EBW-PRÜF
Monument Damage Ontology	-	Erfassung der Daten und Schäden von Denkmälern

Tabelle 4.1: Vorhandene Ontologien zur Schadensaufnahme

bilden. Für die Anwendung müsste jedoch eine Ausweitung auf den vollen Umfang der ASB-ING erfolgen. Da sie jedoch noch keine Schäden beinhalten, sind sie in der vorliegenden Arbeit nicht anwendbar. Allerdings bestehen die Ontologien nur aus Klassen, sodass sie gut als Ergänzung zur Klassifizierung der vorhandenen Bauteile nutzbar sind.

In Cacciotti, Blaško und Valach (2015) wird die *Monument Damage Ontology*⁸ vorgestellt, die für Schäden an historischen Gebäuden und Denkmälern, mit dem Fokus auf den Ursachen von Schäden, spezialisiert ist. Mit ihr können ebenso Schäden klassifiziert, bewertet und mit Konstruktionselementen verknüpft werden. Die fehlende Modularität erschwert jedoch die Kompatibilität zu den anderen Bauwerksontologien.

Von Ren, Ding und H. Li (2019) wurde eine Ontologie zur Instandhaltung von Brücken entwickelt. Sie ist unterteilt in Elemente zur Beschreibung der Brückenstruktur und Elemente für das Erhaltungsmanagement. Die Aufnahme von Schäden ist in diesem Konzept auch berücksichtigt, doch liegt der Fokus mehr auf der Organisation von Instandhaltungsmaßnahmen, wie der Koordination von verschiedenen Materiallieferanten. Die erstellte Ontologie ist außerdem nicht öffentlich zugänglich, sodass die Klassen und Eigenschaften nicht in dieser Arbeit genutzt werden können.

4.2.3 Brückenontologien

Um die Schäden mit konkreten Bauteilen verknüpfen zu können, müssen diese zunächst ebenso in der Ontologie modelliert werden. Das benötigte Vokabular kann der *Bridge Topology Ontology (BROT)*⁹ entnommen werden (Kozak und Hamdan 2019). Unter Ver-

⁸<https://kbss.felk.cvut.cz/ontologies/2011/monument-damage-core.owl>

⁹<https://wisib.de/ontologie/brot/>

wendung der Ergänzungen zu Material¹⁰, allgemeinen Angaben¹¹ und Komponenten¹², vgl. Tab. 4.2, können die Bestandteile genauer klassifiziert werden.

Name	prefix	Inhalt
Bridge Topology Ontology	brot	Brückenstruktur
Bridge	bridge	Allgemeine Angaben zu Brücken
Building Material	bmat	Definition von Baumaterialien
Bridge Components	brcomp	Brückenkomponenten

Tabelle 4.2: Vorhandene Ontologien zur Beschreibung von Brücken

4.3 Erstellung der ABox für ein Brückenbauwerk

Nach der Analyse der bestehenden Ontologien kann die ABox zur Beschreibung eines Bauwerks und dessen Schäden erstellt werden. Dafür stand in dieser Arbeit ein Beispielobjekt zur Verfügung. Die Instanz eines Schadens ist in Abb. 4.2 in vereinfachter Form mit seinen möglichen Verknüpfungen dargestellt. Rote Punkte stellen Klassen, blaue Instanzen und graue Werte, wie Zahlen oder Zeichenketten, dar. Die Darstellung wurde mit dem SPARQL-Visualizer¹³ erstellt.

4.3.1 Erstellen von Bauteil- und Schadensinstanzen

Eine Instanz zu erstellen heißt, eine URI für ein Element zu bestimmen und mit *rdf:type* ihre Klasse anzugeben, von der sie instanziiert wird.

Zunächst wird die Instanz der Brücke als Gesamtbauwerk erstellt. Ihr können allgemeine Angaben angefügt werden, wie das Baujahr, das zuständige Amt oder die Brückenbreite und -länge. Danach folgt die Darstellung der Bauteile der Brücke. Dies soll möglichst detailliert erfolgen, damit die Schäden genau zu dem betroffenen Bauteil zugeordenbar sind, d. h. ein Widerlager sollte nicht nur als ein Bauteil dargestellt werden, sondern mindestens aus zwei Flügelwänden und einer Auflagerbank bestehen, wobei je nach Ausführungsart weitere Teile dazu kommen. Wenn Bauteile mehrmals am Bauwerk vorkommen, sollten auch mehrere Instanzen erstellt werden um bspw. genau beschreiben zu können, ob ein Schaden am Geländer auf der linken oder der rechten Brückenseite auftritt. Zu den Bauteilen können über verschiedene Datentyp-Eigenschaften weitere Merkmale, wie die Höhe oder Betondeckung, ergänzt werden. Mit der Eigenschaft *bmat:hasBuildingMaterial* wird dem Bauteil ein Baustoff, welcher ebenfalls detaillierte Eigenschaften erhält, zugeordnet.

¹⁰<https://wisib.de/ontologie/bmat/>

¹¹<https://wisib.de/ontologie/bridge/>

¹²<https://wisib.de/ontologie/brcomp/>

¹³<https://madsholten.github.io/sparql-visualizer/>

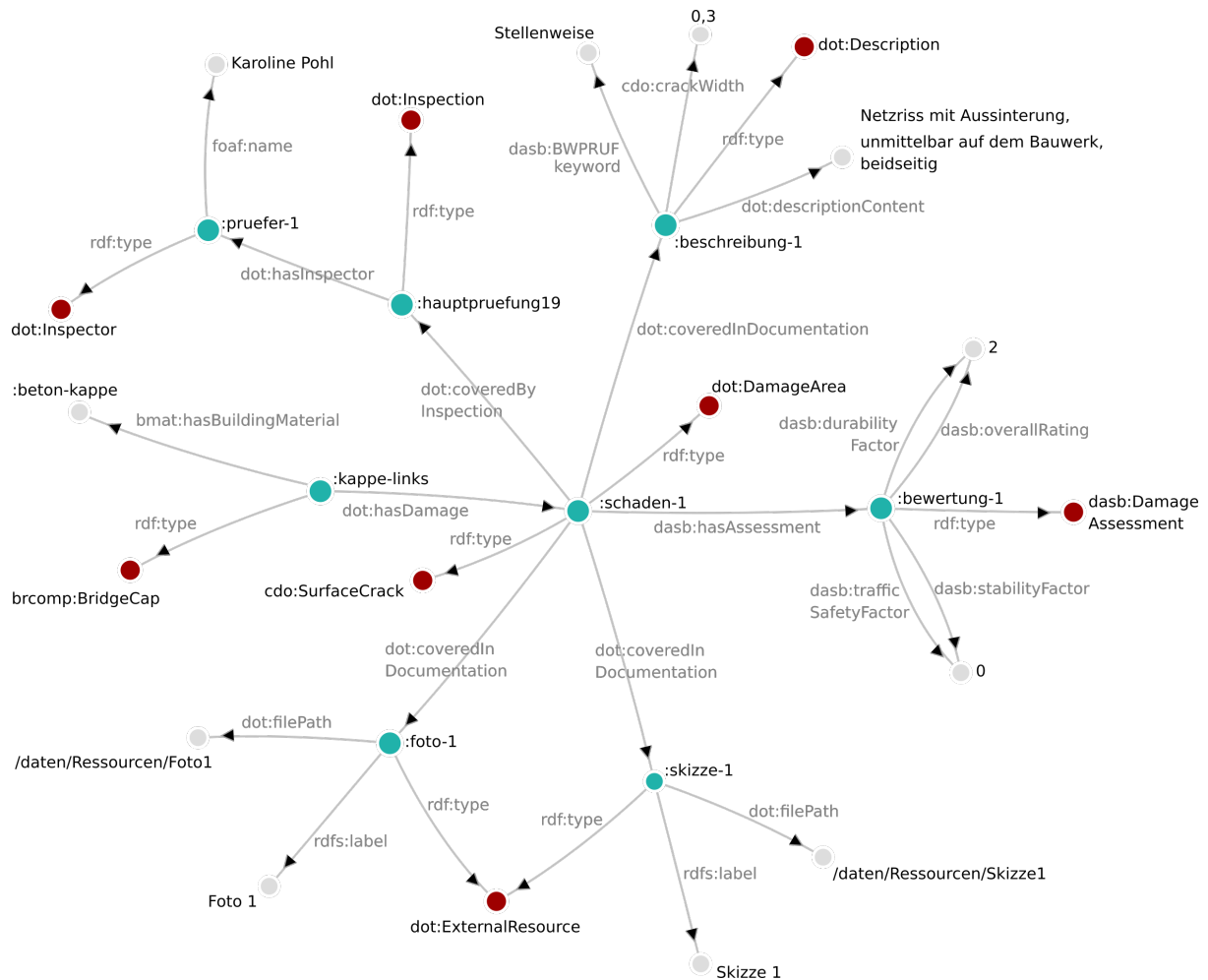


Abbildung 4.2: Darstellung einer Schadensinstanz und deren Eigenschaften aus der ABox des Beispielobjektes

Im nächsten Schritt erfolgt die Instanziierung der einzelnen Schäden. Eine Schadensinstanz wird als Schadenselement oder -bereich und ebenfalls als der entsprechende Schadenstyp klassifiziert. Die Schadenstypen gibt es momentan nur für Betonschäden, bspw. kann ein Abplatzungsschaden mit der Klasse `cdo:Spalling` klassifiziert werden. Den Schäden werden Eigenschaften nicht direkt über Datentyp-Eigenschaften zugeordnet, sondern über die Hilfsinstanzen: Bewertung, Beschreibung und externe Ressourcen. Die betroffenen Bauteilen werden mit den vorhandenen Schäden über die Objekt-Eigenschaft `dot:hasDamage` verknüpft.

4.3.2 Komponenten zur Charakterisierung der Schäden

Die Beschreibung eines Schadens ist mit Instanzen der Klasse `dot:Description` darstellbar. Die genauen Merkmale können jedoch nur in einem Text mit der Eigenschaft `dot:descriptionContent` beschrieben werden. Alternativ ist die Angabe der Schlüsselwörter aus der ASB-ING mit dem `dasb:BWPRUFkeyword` möglich. Allerdings ist so keine

Differenzierung von Schlüsselwörtern zu unterschiedlichen Merkmalen möglich.

Bilder und andere Dokumente in beliebigem Format können in der Ontologie als Instanz der Klasse *dot:ExternalResource* erfasst werden. Über Datentyp-Objekte ist der Name und der Dateipfad, wo sich die Ressource befindet, angebbbar. Die Zuordnung zu Schäden kann über das Prädikat *dot:coveredInDocumentation* erfolgen. So können beliebig viele Dateien zugeordnet werden.

Mit der Eigenschaft *dasb:hasAssessment* kann einem Schaden eine Bewertung zugeordnet werden. Diese Instanz der Klasse *dasb:DamageAssessment* erhält die Bewertungsfaktoren für die Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit. Analog kann so nicht nur einem Schaden, sondern auch den Bauteilgruppen und dem gesamten Bauwerk eine Zustandsbewertung (*dasb:ComponentAssessment* bzw. *dasb:StructureAssessment*) gegeben werden.

Ursachen können zu einem Schaden mit *dot:hasCausation* angegeben werden. Diese Eigenschaft zeigt auf Instanzen der Klasse *dot:Causation*, von der es jedoch noch keine Subklassen für die genauere Spezifizierung von Ursachen gibt.

4.3.3 Alternative Schadensbeschreibung über Datentyp-Eigenschaften

Anstatt der Beschreibung der Schadenstypen über Klassen oder der Schadenszuordnung zu einer Bauteilinstanz, gibt es eine alternative Methode, vgl. Abb. 4.3. Das ist die Verwendung von Datentyp-Eigenschaften, die dem Schaden eine Zeichenkette mit dem vorliegenden Schadenstyp zuweist. Mit der *dasb:BWPRUFkeyword*-Eigenschaft können Schadensarten oder andere Merkmale, die in der ASB-ING aufgelistet sind, angegeben werden. Bei ersterer Variante müssen die Klassen vorher definiert sein, damit sie dem Schaden zugeordnet werden können, während bei der alternativen beliebige Zeichenketten angebbbar sind. Der Vorteil an den Klassen ist, dass damit ein einheitliches Vokabular vorgegeben ist, jedoch erfordert die Erstellung der Klassen einen hohen Aufwand damit alle möglichen Schadenstypen abgedeckt sind. Bei der Zeichenketten-Variante kann über die Erstellung von Regeln trotzdem festgelegt werden, dass nur bestimmte Zeichenketten (z. B. Schadenstypen) mit der Eigenschaft verwendbar sind. So ist diese Variante flexibler als die Verwendung von Klassen, wenn bspw. Änderungen der Normen eine Anpassung erfordern. Dadurch muss nur die Regel geändert werden, welche Zeichenketten zugelassen sind und nicht die Ontologie an sich. Analog zur Festlegung des Schadenstyps sind auch weitere Eigenschaften, wie Mengen oder Lagebezeichnungen, mit diesen beiden Varianten umsetzbar. Für die Schadenstypen wird in dieser Arbeit die Variante der Klassendefinition

verwendet. Für weitere Angaben der Schadensbeschreibung werden stattdessen Zeichenketten eingesetzt, damit diese variabler sind und die Angabe von Zahlenwerten möglich ist.

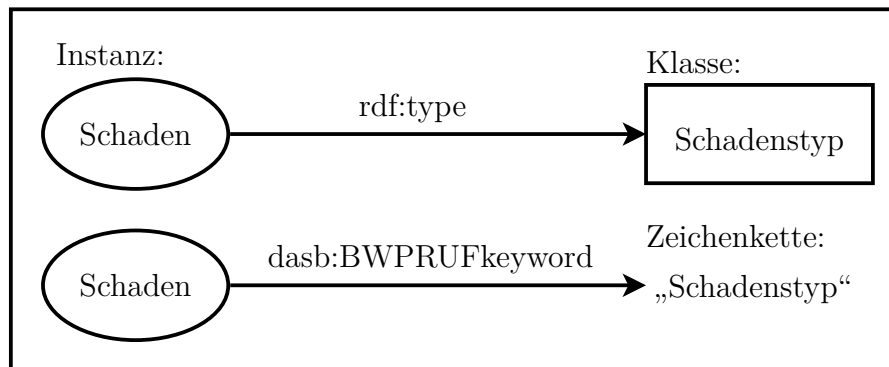


Abbildung 4.3: Visualisierung des Unterschiedes zwischen der Verwendung von Klasseninstanzen oder Zeichenketten zur Beschreibung von Eigenschaften

4.3.4 Prüfung

Mit *dot:coveredByInspection* können Schäden zu einer Prüfung (*dot:Inspection*) und damit auch zu einem Datum zugeordnet werden. Jede *dot:Inspection* erhält einen Prüfer (*dot:Inspector*) und weitere Informationen, wie das Datum der Prüfung. So können alle Schäden dem Zeitpunkt ihrer Aufnahme zugeordnet und der Zustand des Bauwerks zu verschiedenen Zeiten dargestellt werden. Die Entwicklung von einzelnen Schäden über die Zeit ist jedoch nur begrenzt darstellbar, da Schäden aus verschiedenen Prüfungen, welche den gleichen Sachverhalt zeigen, nicht miteinander verknüpft werden können.

4.3.5 Versionierung von Schäden

Für die Darstellung von verschiedenen Stadien eines Elementes gibt es bereits Ansätze. In Rasmussen, Lefrançois u. a. (2018) wird die *Ontology for Property Management (OPM)* vorgestellt, mit der der zeitliche Verlauf von Eigenschaften beschreibbar ist. Diese sieht vor, Elemente zu versionieren, indem sie mit verschiedenen Stadien verknüpft werden. Jedem Stadium wird ein Datum und die aktuellen Werte der Eigenschaften zugeordnet. Die Stadien können mit Markern in Form von Klassen versehen werden, um zu zeigen, welches das aktuellste ist (*opm:CurrentPropertyState*). Alle nicht mehr aktuellen Stadien erhalten den Typ *opm:OutdatedPropertyState*. Auch die Darstellung von gelöschten Elementen ist so möglich. Mit *opm:Deleted* kann ein Stadium als gelöscht markiert werden, ohne dass der Datensatz gelöscht werden muss. Anstatt die einzelnen Eigenschaften eines Schadens zu versionieren, ist der gesamte Schaden in verschiedenen Versionen darstellbar, um so jeder Bauwerksprüfung eine Schadensversion zuordnen zu können. Diese Funktionalität muss jedoch noch in einer Erweiterung der bestehenden Ontologien eingearbeitet werden.

4.3.6 Inferenz

Nachdem die Ontologie erstellt wurde, kann mit Hilfe von Reasonern der Informationsgehalt der Daten erweitert werden. In dieser Arbeit wurde der Reasoner *Pellet*¹⁴ verwendet, welcher in dem Programm *Protégé* bereits integriert ist. Über die Definitionen der Klassen und Eigenschaften können weitere Zusammenhänge geschlussfolgert werden. Diesen Vorgang nennt man Inferenz. Die Definitionen müssen in der TBox der Ontologie festgelegt werden. OWL und RDFS bieten dafür Vokabular. Mit *rdfs:subClassOf* kann bspw. eine Hierarchie zwischen den Klassen aufgebaut werden. Die Instanz einer Klasse ist gleichzeitig vom Typ ihrer Superklasse. Somit gehen auch deren Eigenschaften auf die Subklasse über. Eine Instanz vom Typ *dot:DamageArea* wäre also gleichzeitig vom Typ *dot:Damage*, da *dot:DamageArea* eine Subklasse von *dot:Damage* ist. Analog ist das Vorgehen bei Eigenschaften mit *rdfs:subPropertyOf* möglich. Weitere besondere Merkmale können durch OWL-Axiome¹⁵ definiert werden. Mit *owl:SymmetricProperty* wird bspw. angegeben, dass eine Beziehung zwischen zwei Ressourcen auch umgekehrt besteht. Ein Beispiel hierfür ist die Objekt-Eigenschaft *dot:adjacentDamageElement*. Das bedeutet, wenn ein Schadenselement A neben einem Schadenselement B liegt, wird geschlussfolgert, dass Schadenselement B auch neben Schadenselement A liegt.

Neben diesen vergleichsweise einfachen Schlussfolgerungen sind auch Regeln für komplexere Zusammenhänge erstellbar. Dafür werden jedoch Modelle benötigt, die einen größeren Funktionsumfang als OWL und RDFS besitzen, wie die *Shapes Constraint Language (SHACL)* oder die *Semantic Web Rule Language (SWRL)*. Eine Regel könnte bspw. bei der Auswahl der Schadensart „Riss“ und der Angabe des Risswinkels die Schadensinstanz automatisch der passenden Klasse von Längs-, Quer- oder Schrägrissen zuordnen.

4.3.7 Validierung von Ontologien

Die Möglichkeit der unbegrenzten Anzahl von Eigenschaften, die einer Instanz zugeordnet werden können, ist positiv, jedoch sind in der realen Anwendung Beschränkungen erwünscht. Dies kann in der Klassendefinition, durch die Angabe von Kardinalitäten, erfolgen. Diese beschreiben die Anzahl der Tripel mit dem selben Subjekt und Prädikat, die existieren dürfen. Um Klassen jedoch allgemeiner zu belassen und eine breitere Nutzung zu ermöglichen, können die Kardinalitäten stattdessen durch separate Formvorgaben festgelegt werden. Für die Erstellung dieser Vorgaben gibt es verschiedene Sprachen, z. B. SHACL¹⁶. Der Aufbau entspricht dem von RDF-Tripeln, sodass die gleichen Serialisierungen verwendet werden können. In dieser Arbeit wurde Turtle verwendet. Das empfohlene Prefix für SHACL ist *sh*. Mit SHACL kann die Form einer Instanz (*sh:NodeShape*)

¹⁴<https://github.com/stardog-union/pellet>

¹⁵<https://www.w3.org/TR/owl2-rdf-based-semantics/>

¹⁶<https://www.w3.org/TR/shacl/>

u. a. durch die Angabe der Klasse, aus der die Instanz stammt, und deren Eigenschaften definiert werden. Die Definition der Eigenschaften erfolgen mit *sh:PropertyShapes*, in denen bspw. die Kardinalität oder der Datentyp des Objektes festgelegt werden kann. Diese Shapes können anschließend mit den erstellten Instanzen der Ontologie über einen SHACL-Prozessor verglichen werden, der bei Unstimmigkeiten die entsprechenden Fehler anzeigt. SHACL folgt bei der Validierung dem CWA-Prinzip, d. h. in dem Fall werden Informationen, die nicht vorhanden sind, nicht als unbekannt, sondern als falsch angesehen (Gayo u. a. 2017). Für die Validierung der Schadensontologie wurde ein Plugin¹⁷ für die *Protégé*-Software genutzt. Dafür wurden *sh:NodeShapes* u. a. für Elemente der Klassen *dot:Damage*, *dot:Inspection* und *dasb:Assessment* erstellt. Für die Schäden wurde festgelegt, dass sie mindestens einen Schadenstyp und jeweils genau eine Beschreibung, Bewertung und Prüfung haben müssen. Ein Ausschnitt aus dem *sh:NodeShape* für die Bewertung ist in Quellcode 4.4 dargestellt. Eine Bewertung hat u. a. die Eigenschaft *dasb:trafficSafetyFactor*. Diese wird durch ein *sh:PropertyShape* definiert. Darin ist festgelegt, dass jede Bewertung genau eine Note für die Verkehrssicherheit aufweisen muss, welche Werte zwischen 0 und 4 annehmen kann und vom Datentyp Integer, d. h. eine ganze Zahl, sein muss.

```
:DamageAssessmentShape a sh:NodeShape;
    sh:targetClass dasb:DamageAssessment;

    sh:property [
        sh:path dasb:trafficSafetyFactor ;
        sh:minCount 1;
        sh:maxCount 1;
        sh:minInclusive 0 ;
        sh:maxInclusive 4 ;
        sh:datatype xsd:int ;
    ].
```

Quelltext 4.4: Auszug eines NodeShapes für die Schadensbewertung

4.3.8 SPARQL-Abfragen

Die *SPARQL Protocol and RDF Query Language (SPARQL)* bietet für RDF-Datensätze ähnliche Möglichkeiten, wie die *SQL* für relationale Datenbanken. Mit SPARQL ist es möglich, Datensätze nach bestimmten Kriterien zu filtern. Der Grundaufbau der beiden Abfragesprachen ist ebenfalls ähnlich. Mit dem SELECT-Befehl sind die Datensätze auswählbar, die in der Ergebnistabelle angezeigt werden. Es folgt die optionale Angabe FROM, mit der spezifiziert wird, gegen welche Tabelle bzw. welchen RDF-Graphen die

¹⁷<https://github.com/fekaputra/shacl-plugin>

Abfrage ausgeführt werden soll. Mit WHERE wird die eigentliche Bedingung eingeleitet, in der die Auswahl der Daten spezifiziert wird. In SPARQL sind diese Bedingungen wie Tripel aufgebaut. Allerdings können alle drei Bestandteile auch Variablen sein, welche mit einem Fragezeichen gekennzeichnet sind. Danach sind optional noch weitere Kriterien zur Filterung oder Sortierung angebbbar. Bei den SPARQL-Abfragen gibt es noch die Besonderheit, dass der Abfrage die Definition der Prefixe, die für die Tripel der Bedingungen benötigt werden, vorangestellt sind (DuCharme 2013). In Quellcode 4.5 ist ein Beispiel für eine SPARQL-Abfrage gezeigt. Sie gibt alle Schäden aus, die nach den Kriterien der Standsicherheit, Verkehrssicherheit oder Dauerhaftigkeit mit der Note 3 oder 4 bewertet wurden. Ausgegeben werden die Schadensbezeichnungen, die Note und für welches Kriterium die Bewertung gilt. Anschließend erfolgt die Sortierung der Daten nach den Kriterien. In Abb. 4.4 ist das Ergebnis der Abfrage gegen den Beispieldatensatz dargestellt.

Anstatt des SELECT-Befehls kann eine SPARQL Abfrage auch mit dem CONSTRUCT-Befehl beginnen. Dann werden die Abfrageergebnisse nicht in einer Tabelle, sondern als neue Tripel ausgegeben.

```

prefix dot: <https://w3id.org/dot#>
prefix rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
prefix dasb: <https://w3id.org/damagemodels/d-asb-ing#>

SELECT ?schaden ?kriterium ?note
  WHERE {
    ?schaden rdf:type dot:Damage.
    ?schaden dasb:hasAssessment ?bewertung.

    ?bewertung ?kriterium ?note.

    FILTER (?note IN(3,4)).
  }
  ORDER BY ?kriterium

```

Quelltext 4.5: Beispiel für eine SPARQL-Abfrage nach allen Einzelbewertungen mit der Note 3 oder 4

schaden	kriterium	note
Schaden 1	durability factor	"3"^^<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int>
Schaden 13	durability factor	"3"^^<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int>
Schaden 1	stability factor	"3"^^<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int>

Abbildung 4.4: Ergebnis der SPARQL-Abfrage: Ausgabe aller Einzelbewertungen mit der Note 3 oder 4

5 Erweiterung der Ontologie zur Prüfung von Bauwerken nach aktueller deutscher Norm

5.1 Allgemein

In Kapitel 4 wurden die Schadensdaten einer Brücke mit Hilfe von Ontologien aufgenommen. Dabei wurde analysiert, welche Module, d. h. welche Klassen und Eigenschaften, für eine vollständige Abbildung der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 ergänzt werden müssen. In diesem Kapitel werden die erarbeiteten Erweiterungen vorgestellt.

5.2 Rechtliche Grundlage

Die Prüfung von Bauwerken ist in der Bundesrepublik Deutschland durch die DIN 1076 (DIN-Normenausschuss Bauwesen 1999) geregelt. Diese gilt für Brücken, Tunnel und weitere Ingenieurbauwerke, wie Lärmschutzwände und Stützbauwerke. In dieser Arbeit wird der Fokus auf die Brücken gelegt, jedoch kann das vorgestellte Modell auf die anderen Bauwerksarten übertragen werden. Die weiterführenden Richtlinien sind die RI-EBW-PRÜF (BMVI 2017) und ASB-ING (BMVBS 2013b). Erstere beschreibt genauer, welche Angaben in einem Prüfbericht enthalten sein müssen und wie die Bewertung erfolgen soll. Dazu enthält sie einen Katalog von Schadensbeispielen, anhand dessen die Bewertung eines Schadens nach Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit bestimmbar ist. Die ASB-ING bildet die Grundlage einer einheitlichen und digitalen Aufnahme der Bauwerksdaten, indem in ihr detailliert spezifiziert wird, welche Angaben zur Beschreibung des Bauwerks und seines Zustandes benötigt werden. In dieser Aufzählung von Stichworten wird entweder ein Datentyp mit einer maximalen Anzahl von Stellen festgelegt oder eine Auswahl an Schlüsselworten definiert, mit denen die Eigenschaften des Bauwerkes beschrieben werden können. Zusätzlich zu diesen Richtlinien kann jedes Bundesland bzw. jede zuständige Behörde weitere Anforderungen und Regeln an die Durchführung und Erstellung des Prüfberichtes festlegen.

5.3 Erstellung von Ontologien

Vor der Erstellung von neuen Ontologien sollte erst die Analyse der bestehenden Daten erfolgen, um im besten Fall Klassen und Eigenschaften wieder zu verwenden. Dieser Schritt wurde in Kapitel 4 bearbeitet. Die bereits vorhandenen Ontologien beinhalten Vokabulare zur allgemeinen Beschreibung und Bewertung von Schäden, zur Beschreibung von Brückenbauwerken und zur Charakterisierung von Betonschäden. Ergänzt werden müssen Ontologien zu weiteren Schadenstypen, zur Darstellung der zeitlichen Veränderung von Schäden und weiteren Angaben aus der ASB-ING, wie Maßnahmenempfehlungen oder Prüfgeräte. In Ren, Ding und H. Li (2019) ist der Ablauf zur Erstellung von Ontologien dargestellt. Die ersten Schritte dessen wurden hier bereits absolviert. Es folgt nun die Erstellung von Klassen und Eigenschaften sowie die Definition der Beziehungen zwischen ihnen.

5.3.1 Neue Schadenstypen

Das Grundgerüst für die Aufnahme von Schäden ist mit den bestehenden Ontologien bereits vorhanden. Ein großer Punkt der Erweiterung umfasst das Ergänzen weiterer Schadenstypen in Form von Klassen. In der CDO-Ontologie sind bereits Betonschäden abgebildet. Es werden weiterhin die Schadensarten von den Baustoffen Stahl und Holz benötigt, sowie Schäden, die an Belägen oder durch das Einwirken von Gewässern, die die Brücke überspannt, auftreten. Außerdem sind eine Vielzahl von materialunspezifischen Schadensarten erforderlich. Eine Möglichkeit wäre, die in den Schlüsseltabellen der ASB-ING definierten Schadensarten komplett in die Ontologie zu übertragen. Allerdings erfolgt da die Sortierung der Schäden nicht primär nach dem Material, sondern nach allgemeineren Kriterien, wie Oberflächenschäden oder Lageänderungen. Außerdem stellen einige Schlüsselworte nur grobe Beschreibungen eines Problems dar und keine konkrete Schadensart, wie „Fehlt“ oder „Nicht fachgerecht“. Als Alternative wird eine kombinierte Lösung aus Schadensarten in Form von Klassen und weiterführende Beschreibungen über Stichworte in Form von Datentyp-Eigenschaften vorgeschlagen, d. h. dass für die materialunspezifischen Schadensarten allgemeine Begriffe gewählt werden, wie „Formänderung“ oder „Verschmutzung“. Diese sollen in der Schadensbeschreibung durch Schlüsselworte und den freien Text näher beschrieben werden. Außerdem sind in den Schadenstypen der ASB-ING Größenangaben integriert, wie Rissbreiten oder Setzungstiefen. Diese werden in der Ontologie in die Schadensbeschreibung verlegt.

In dieser Arbeit wurden folgende Erweiterungen für Schadensarten erstellt: die *Steel Damage Ontology (STDO)* für Stahlschäden, die *Wood Damage Ontology (WODO)* für Holzschäden, die *Coating Damage Ontology (CODO)* für Schäden des Belages, die *Water Damage Ontology (WADO)* für Schäden durch Gewässer und die *General Damage Ontology*

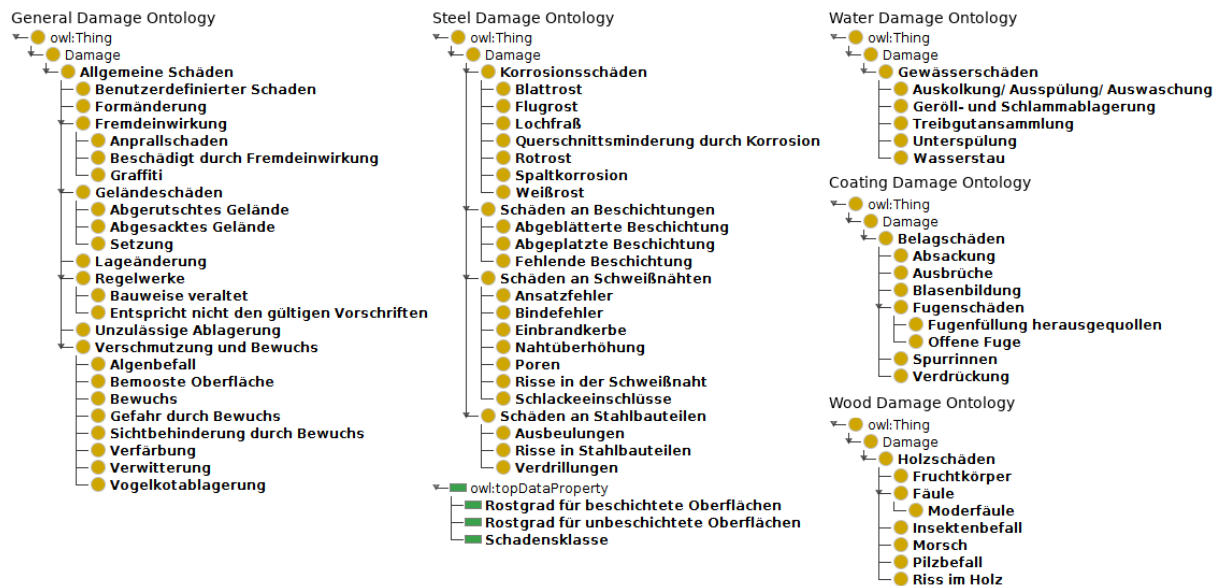


Abbildung 5.1: Erstellte Klassen und Datentyp-Eigenschaften zur Beschreibung der Schadenstypen

gy (*GDO*) für allgemeine und nicht materialspezifische Schäden (vgl. Abb. 5.1). Alternativ ist die Verwendung einer benutzerdefinierte Schadensklasse *gdo:customDamage* für nicht vorhandene Schadensarten möglich. Diesen können mit *rdfs:label* bezeichnet werden. Die Schadenstypen sind nicht auf Brücken beschränkt, sondern sind auch auf andere Bauwerke anwendbar. Für die Stahlschäden wurden außerdem Datentyp-Eigenschaften für den Rostgrad und die Schadensklasse erstellt, da diese Angaben in den Schadenstypen der ASB-ING vorgesehen sind. Für die URI der neuen Elemente wurden dabei englische Bezeichnungen gewählt. Auch wenn das Ziel die Darstellung der Bauwerksprüfung nach deutscher Norm ist, sollte eine Ontologie möglichst auch international wiederverwendbar gestaltet werden. Die Klassen können, mit der Erstellung von verschiedenen Anmerkungen (*rdfs:label*), trotzdem in mehreren Sprachen bezeichnet werden. Mit der Angabe eines *rdfs:comment* ist die Beschreibung der Klassen und deren Einsatzgebiet genauer möglich. Durch die offene Struktur von Ontologien sind einem Schaden mehrere Typen zuordenbar. So müssen keine Klassen für Schadenskombinationen erstellt werden, sondern die Schäden sind beliebig kombinierbar. Mit *owl:disjointWith* kann jedoch in einer Klassendefinition eine andere Klasse bestimmt werden, mit der sie nicht kombinierbar ist, d. h. eine Instanz kann nicht gleichzeitig vom Typ dieser beiden Klassen sein.

Für die Erstellung der Schadenstypen wurden ausschließlich die Schlüsseltabellen der ASB-ING verwendet und die dort vorhandenen Stichworte neu sortiert und zusammengefasst. Eine inhaltliche Prüfung der Vollständigkeit der Klassen war nicht Teil der Arbeit, jedoch ist die nachträgliche Ergänzung von Schadenstypen aufgrund der offenen Struktur von Ontologien unproblematisch.

5.3.2 Schadensbeschreibung

Zur feineren Beschreibung von Schäden wurden in der Ontologieerweiterung PRUEF Untereigenschaften von *dasb:BWPRUFkeyword* erstellt (vgl. Abb. 5.3). Dadurch können die Menge, Ortsangabe und Schadensveränderung in separaten Eigenschaften angegeben werden, was die Auswertung der Daten erleichtert. So können beliebige Zeichenketten als Eigenschaften angegeben werden.

In Abb. 5.4 ist ein Schaden unter Verwendung der neuen Eigenschaften dargestellt.

Um dennoch die Eingabemöglichkeiten der Datentyp-Eigenschaften zu beschränken, können mit SHACL Validierungs-Shapes erstellt werden, vgl. Abschnitt 4.3.7. In Quellcode 5.1 ist die Beschränkung für die Mengen-Eigenschaft *pruef:quantity* auf die Stichworte für die „Menge allgemein“ aus der ASB-ING dargestellt. Außerdem wird festgelegt, dass diese Angabe je Beschreibung genau einmal vorhanden sein muss, weil sie für den Bewertungsalgorithmus der Zustandsnote notwendig ist.

```
:DescriptionShape a sh:NodeShape;
    sh:targetClass dot:Description;

    sh:property [
        sh:path pruef:quantity ;
        sh:minCount 1;
        sh:maxCount 1;
        sh:datatype xsd:string ;
        sh:in ("An allen Bauteilen" "Gesamtes Bauteil" "Flächendeckend" "Alle"
            "Durchgehend" "Vollständig" "Ausgeprägt" "Großflächig" "Größtenteils"
            "Häufig" "Zahlreich" "Bereichsweise" "Mehrfach" "Teilweise"
            "Stellenweise" "An einigen Bauteilen" "Gering" "Vereinzelte" "Punktuell"
            "Beginnend" "Eine Stelle" "Ein Stück")
    ].
```

Quelltext 5.1: Beispiel für NodeShape für die Einschränkungen der Mengenangaben in der Schadensbeschreibung

Neben der Schadensbeschreibung mit Worten sollen auch Werte angegeben werden können. Dafür wurden weitere Untereigenschaften der Menge (*pruef:quantity*) und Ortsangabe (*pruef:location*) erstellt, um bspw. die Tiefe (*pruef:depth*) oder Länge (*pruef:length*) eines Schadens anzugeben (vgl. Abb. 5.3). In der CDO-Erweiterung sind spezielle Datentyp-Eigenschaften, u. a. für die Rissbreite (*cdo:crackWidth*) oder die Fläche einer Abplatzung (*cdo:spallingArea*), enthalten. In den, in dieser Arbeit erstellten, Erweiterungen wurden keine eigenen schadensspezifischen Eigenschaften, für bspw. die Angabe der Tiefe von

Setzungen, vorgesehen, sondern eine allgemeine Eigenschaft, mit der die Tiefe von Setzungen, Spurrinnen und weiteren Schäden angegeben werden kann. Über die Festlegung des Schadenstyps und weiterer Beschreibungen wird deutlich, welche Größe die Angabe am jeweiligen Schaden definiert.

Für die Angabe der Einheit, die der Wert einer Eigenschaft besitzt, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Zunächst kann der Datentyp (*rdfs:Datatype*) der Werte festgelegt werden, wie bspw. als ganze Zahl (*xsd:integer*), Gleitkommazahl (*xsd:double*, *xsd:float*) oder Zeichenkette (*xsd:string*). Da es möglich ist, eigene Datentypen anzulegen, könnten mit dieser Funktion Einheiten erstellt werden, welche den Werten zugeordnet werden können. Das Problem dabei ist jedoch, dass einige Funktionen für numerische Werte von SPARQL, wie SUM() oder AVG(), nur mit Werten funktionieren, die einen der Standard-Datentypen, wie *xsd:double* oder *xsd:float*, besitzen. Da jedoch jedem Wert nur ein Datentyp zuordenbar ist und die Bildung von Unterklassen für Datentypen nicht möglich ist, können diese SPARQL-Funktionen bei Werten mit selbstdefinierten Datentypen nicht angewendet werden.

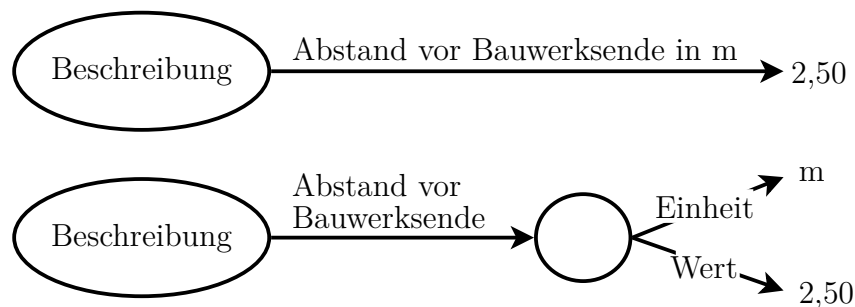


Abbildung 5.2: Möglichkeiten der Angabe von Einheiten in Ontologien

Um dies zu umgehen und die Auswertung der Daten mit SPARQL zu ermöglichen, gibt es andere Varianten um Einheiten in der Ontologien festzulegen. Die einfachste Variante ist die Einheit in der Beschreibung der Eigenschaft festzulegen und einen Standard-Datentyp an den Wert anzuhängen (vgl. Abb. 5.2). Allerdings kann die Einheit so nicht variiert werden. Die andere Möglichkeit wäre eine Zwischeninstanz zu nutzen, von welcher zwei Eigenschaften abzweigen. Die eine zeigt auf den Wert und die andere auf eine Zeichenkette, der die Einheit enthält, wodurch die Einheiten frei bestimmbar wären. Die Verwendung einer Zwischeninstanz ist jedoch umständlicher, sowohl für die Modellierung als auch die Nutzung, z. B. von Regeln oder Abfragen, sodass in dieser Arbeit die Variante der festgelegten Einheit in der Eigenschaftsbeschreibung verwendet wird.

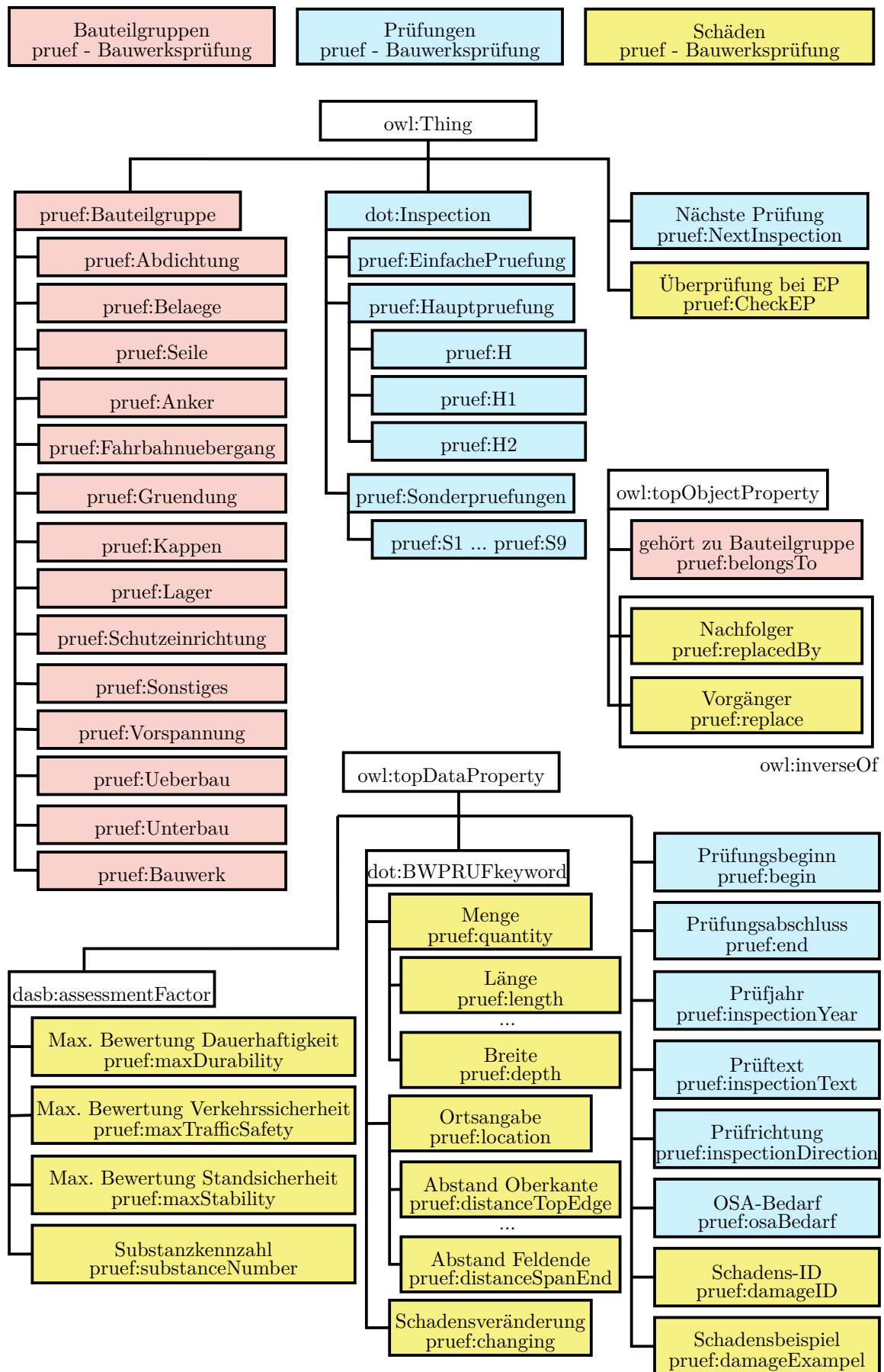


Abbildung 5.3: Ontologierweiterung zur Abbildung von Schäden, Prüfungen und Bauteilgruppen

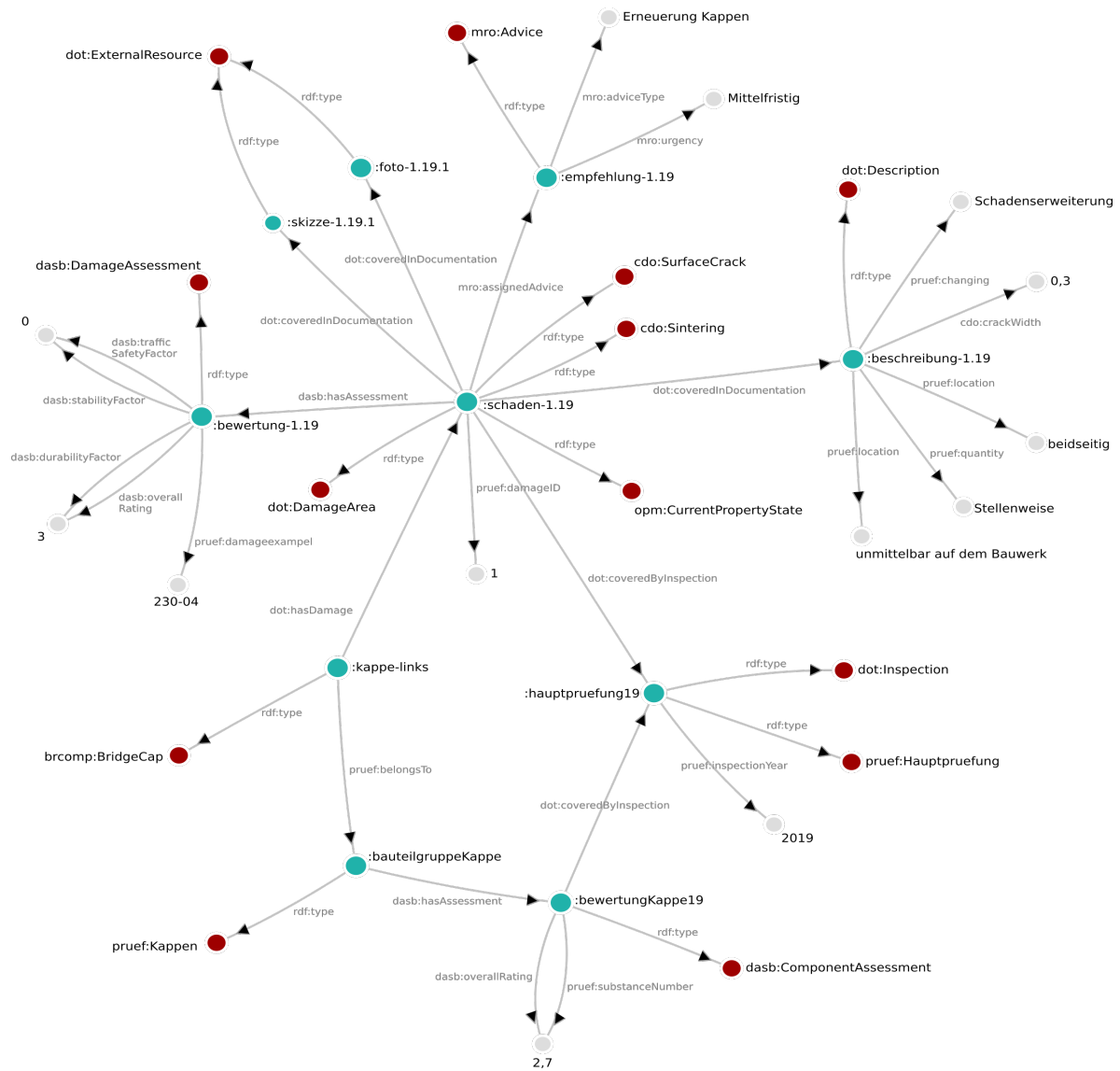


Abbildung 5.4: Visualisierung der ABox der Schadensontologie unter Verwendung der Ontologierweiterungen

5.3.3 Zeitliche Entwicklung von Schäden

Besonders wichtig bei der Bauwerksprüfung ist die Darstellung der Veränderung von Schäden über die Zeit, damit Tendenzen der Verbesserung oder Verschlechterung beurteilt werden können. Um den Zustand eines alten Schadens in der neuen Prüfung darzustellen, wird eine neue Schadensinstanz erstellt, welche mit der vorhergehenden durch die Eigenschaft *pruef:replace* verknüpft werden kann. Alternativ kann die inverse Beziehung *pruef:replacedBy* verwendet werden (vgl. Abb. 5.3). Beide Instanzen erhalten die gleiche *pruef:damageID*, was der im Prüfbericht angezeigten Schadensnummer entspricht. Jede Schadensinstanz wird jedoch mit *dot:coveredByInspection* einer anderen Prüfungsinstanz zugeordnet. Jede neue Instanz erhält, wie die bestehenden, eine eigene Beschreibung, Bewertung und bei Bedarf Fotos oder Skizzen (vgl. Abb. 5.5). Wenn sich an der Beschreibung und Bewertung eines Schadens jedoch nichts ändert, kann von der neuen Schadensinstanz auf die alten Beschreibungs- und Bewertungsinstanzen verwiesen werden. Durch die Zuordnung von Fotos oder Beschreibungen zu einem Schaden sind diese auch zu einem Datum zugeordnet, da der Schaden mit einer Prüfung verknüpft ist. Zusätzlich könnten diese Instanzen ebenfalls über *dot:coveredByInspection* mit einer Prüfungsinstanz verbunden werden.

In Rasmussen, Lefrançois u. a. (2018) wurde mit der OPM¹⁸ ein Modell entwickelt, mit dem die Veränderung von Eigenschaften über die Zeit dargestellt werden kann. Aus dieser Ontologie wurden Klassen für die ABox der Schadensontologie wiederverwendet, mit denen der Zustand einer Instanz markiert werden kann. *opm:CurrentPropertyState* zeigt auf die aktuellste Version eines Schadens und mit *opm:OutdatedPropertyState* können alle Schäden vergangener Prüfungen markiert werden. Diese Markierungen sind nicht zwingend notwendig, da die aktuellste Instanz auch über die Datumsangabe abgefragt werden könnte. Diese Suche ist nach Rasmussen, Lefrançois u. a. (2018) jedoch sehr komplex und aufwendig, sodass diese Klassen für ein effizienteres Datenmanagement erstellt wurden. Außerdem können Schäden mit *opm:Deleted* als gelöscht angegeben werden, ohne den Datensatz tatsächlich zu Löschen. So können bei einem erneuten Auftreten des gleichen Schadens diese Informationen wieder aktiviert werden, indem eine neue Schadensinstanz als Nachfolger der gelöschten erstellt wird.

5.3.4 Prüfungen

Für die Darstellung von Prüfungen ist die Angabe der Art notwendig. Hierfür wurden Unterklassen von *dot:Inspection* für die Bezeichnung der Einfachen, Haupt- und Sonderprüfungen erstellt (vgl. Abb. 5.3). Weiterhin soll in einem Prüfbericht das Datum der Fälligkeit der Nächsten Haupt- und Einfachen Prüfung angegeben werden. In der Ontologie kann dies umgesetzt werden, indem neue Prüfungsinstanzen angelegt werden, unter

¹⁸<https://w3c-lbd-cg.github.io/opm/>



Abbildung 5.5: Visualisierung von verschiedenen Stadien eines Schadens in ABox der Schadensontologie

Angabe der Prüffart und dem Prüfdatum bzw. -jahr. Diese Instanzen werden mit der Klasse *pruef:NextInspection* (vgl. Abb. 5.3) markiert. Bei der nächsten Prüfung wird diese Klasse an die darauf folgende Prüfung weiter gereicht.

Die Kennzeichnung eines Schadens für die Untersuchung bei der nächsten Einfachen Prüfung erfolgt mit der Klasse *pruef:CheckEP* (vgl. Abb. 5.3). Die betroffene Schadensinstanz ist dann neben seiner Schadensart auch vom Typ dieser Klasse.

5.3.5 Prüfgeräte und Prüfanweisungen

Im Bauwerksbuch sollen Angaben zu den benötigten Prüfgeräten und Anweisungen zur Durchführung der Prüfungen hinterlegt werden. Dafür wurden die in Abb. 5.6 mit rot bzw. blau hinterlegten Datentyp-Eigenschaften nach den Vorgaben der ASB-ING erstellt. Diese können als Eigenschaften der Brückeninstanz angegeben werden, da sich die Angaben nicht ändern bzw. der zeitliche Verlauf von Änderungen nicht relevant ist. Alternativ könnten die Eigenschaften für jede Prüfung separat angegeben werden.

5.3.6 Bewertung

Die wichtigsten Bestandteile für die Bewertung der Schäden waren mit der DASB-Ontologie bereits vorhanden. Die Erweiterung umfasst u. a. eine Datentyp-Eigenschaft für die Nummer des Schadensbeispiels (*pruef:damageExampel*) aus dem Katalog der RI-EBW-PRÜF. Ebenso wurde die Substanzkennzahl (*pruef:substanceNumber*) ergänzt, welche im Gegensatz zur Gesamtbewertung nur die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit der Bauteile berücksichtigt (vgl. Abb. 5.3). Zu jeder Prüfung eines Bauwerks soll jeweils die maximale Schadensbewertung in den drei Kategorien Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit angegeben werden können. Dies könnte bei jedem Abrufen der Informationen abgefragt werden. Bei großen Datensätzen erfordert dies jedoch einen höheren Rechenaufwand, sodass für die drei Maximalwerte eigene Datentyp-Eigenschaften (*pruef:maxDurability* usw.) angelegt wurden, für welche die Werte nur einmal ausgerechnet und dann eingetragen werden. Sie wurden als Untereigenschaften von *dasb:assessmentFactor* erstellt, da sie der Beschreibung der Bewertung von Schäden, Bauteilgruppen und Teilbauwerken dienen (vgl. Abb. 5.3).

Aus den Schadensbewertungen sollen die Bewertungen der Bauteilgruppen und daraus die Zustandsnote des Teilbauwerks berechnet werden. Um die Bewertungen der Bauteilgruppen in der Ontologie darstellen zu können, wurden Klassen der Bauteilgruppen erstellt (vgl. Abb. 5.3). Die Bauteile eines Bauwerks werden mit der Eigenschaft *pruef:belongsTo* zu einer Bauteilgruppe zugeordnet. Da diese Zuordnung nicht variabel ist, können die Beziehungen über Regeln vordefiniert werden. Jeder Bauteilgruppen-Instanz kann eine Bewertungsinstanz der Klasse *dasb:ComponentAssessment* zugeordnet werden

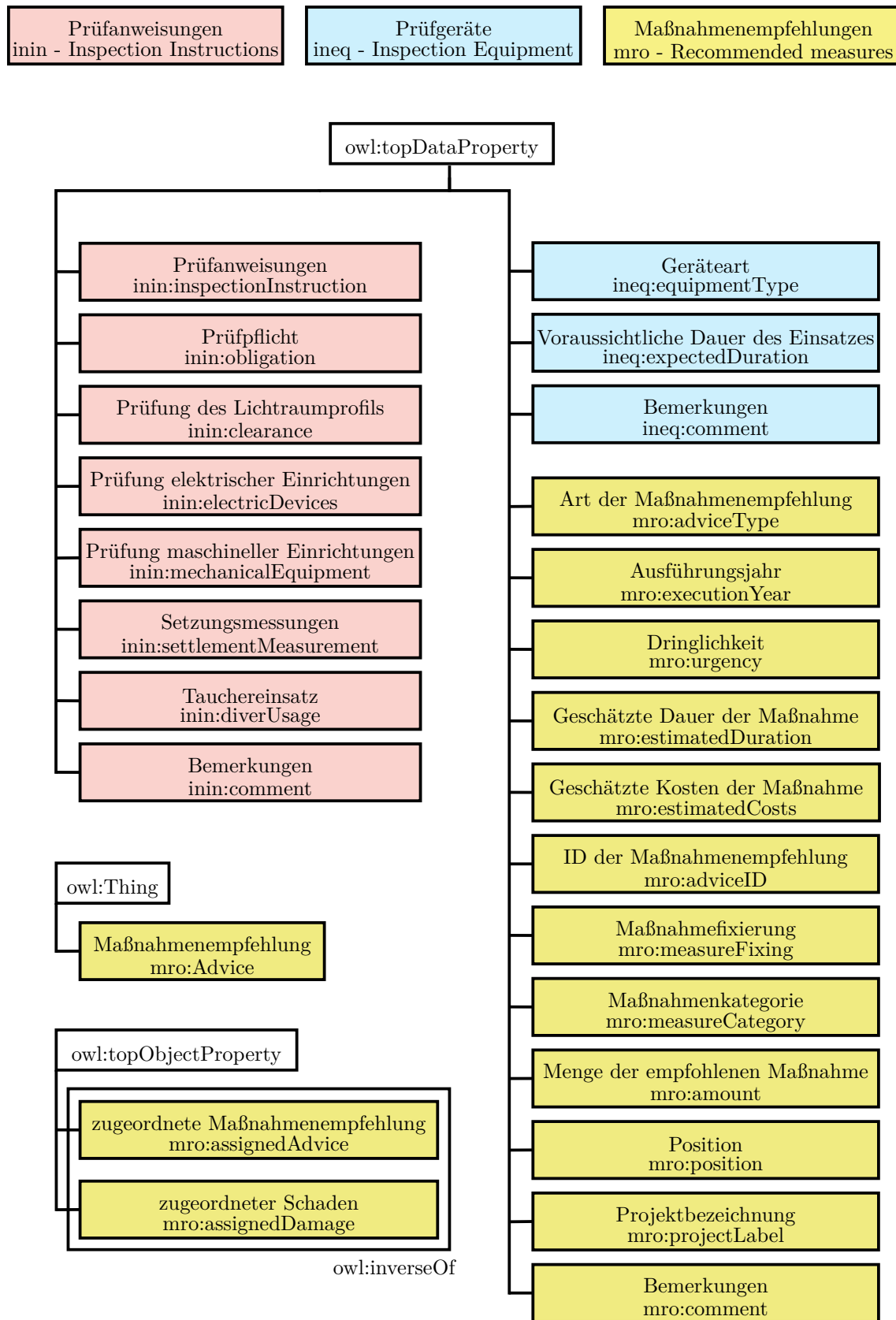


Abbildung 5.6: Ontologierweiterung für Prüfanweisungen, Prüfgeräte und Maßnahmenempfehlungen

(vgl. Abb. 5.5), welche Informationen zur Zustandsnote und Substanzkennzahl der Bauteilgruppe enthalten.

5.3.7 Maßnahmenempfehlung

Zu einer Prüfung gehören neben der Aufnahme von Schäden auch die Erstellung von Maßnahmenempfehlungen zur Beseitigung dieser. Diese können durch Instanzen der Klasse *mro:Advice* dargestellt werden. Für weitere Details stehen in der Ontologiederweiterung verschiedene Datentyp-Eigenschaften aus der ASB-ING zur Verfügung. Dazu gehören die ID der Maßnahmenempfehlung, die geschätzten Kosten und die Dringlichkeit (vgl. Abb. 5.6). Verknüpft werden diese Empfehlungen mit den Schäden über die Objekt-Eigenschaft *mro:assignedDamage*. Alternativ kann auch die inverse Eigenschaft *mro:assignedAdvice* verwendet werden, welche von einem Schaden auf eine Empfehlung zeigt.

5.3.8 Ursachen

Da bei der Aufnahme von Schäden die Angabe der Ursachen nach ASB-ING nicht gefordert ist, wurde das Thema in dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Die Möglichkeit der Eingabe von Ursachen in die Schadensontologie wurde in Abschnitt 4.3.2 bereits kurz dargestellt. Ergänzt werden sollten diese Elemente um Klassen zur Beschreibung von verschiedenen Schadensursachen. Obwohl in den Regelwerken die Angabe von Ursachen nicht gefordert ist, wird ihnen in der RI-EBW-PRÜF eine hohe Wichtigkeit beigemessen, da die Kenntnis über die Schadensursache für die Bewertung eines Schadens vorausgesetzt wird.

5.3.9 Ortsangabe

Die genaue Ortsangabe eines Schadens ist nicht verpflichtend, jedoch sehr wichtig, damit einerseits der Prüfer die Schäden aus den vergangenen Prüfungen schnell finden und eindeutig identifizieren kann, um Verwechslungen zu vermeiden. Andererseits kann damit eine Sortierung der Schäden in Prüfreihenfolge ermöglicht werden. Eine erste grobe Lokalisierung wird schon durch die Zuordnung eines Schadens zu einem Bauteil erreicht. Dabei ist eine möglichst kleinteilige Beschreibung der Bauteile eines Bauwerks von Vorteil. Die Ortsangabe in der Schadensbeschreibung sollte sich somit nur noch auf die Lage des Schadens innerhalb dieses Bauteiles beziehen. Die Beschreibung erfolgt mit der Eigenschaft *pruef:location*, mit welcher die Schlüsselworte der ASB-ING angegeben werden können. Analog zur Mengenangabe wurden weitere Untereigenschaften zur Lagebeschreibung mit konkreten Zahlenwerten erstellt (vgl. Abb. 5.3).

Über Abfragen mit SPARQL können die Schäden in die gewünschte Reihenfolge gebracht werden. Zuerst erfolgt die Sortierung nach Bauteilen, danach kann innerhalb eines Bautei-

les über Entfernungsangaben gefiltert werden. Dies gelingt umso zuverlässiger, je genauer die Ortsangabe sind.

Eine zusätzliche Möglichkeit ist, die Schäden in ein dreidimensionales IFC-Modell einzutragen, welches als Lageplan dient. So kann die Reihenfolge der Schäden durch den Prüfer einfach visuell erkannt werden. Die Verknüpfung des IFC-Modells mit dem Prüfbericht wird in Kapitel 6 erläutert.

5.3.10 SHACL-Regeln

Mit SHACL können zwei verschiedene Aufgaben gelöst werden. Auf der einen Seite können mithilfe von Shapes die Form und die notwendigen Eigenschaften von Instanzen definiert, vgl. Abschnitt 4.3.7, sowie eine Ontologie an sich auf ihre erforderlichen Eigenschaften geprüft werden. Auf der anderen Seite können mit SHACL¹⁹ Regeln aufgestellt werden, mit denen aus den bestehenden Tripeln weitere geschlussfolgert und somit eine Erhöhung des Informationsgehaltes der Ontologie erreicht wird. Mögliche Anwendungsfälle sind das Schlussfolgern der Bewertung auf Grundlage der Schadensart und Menge oder die Wahl des Schadenstyps anhand gewählter Eigenschaften. So kann die Schadensaufnahme effizienter und schneller durchgeführt werden, da die Auswahl nicht aller Eigenschaften manuell erfolgen muss. Außerdem können durch die Regeln subjektive Einschätzungen verringert und die Beschreibung einheitlicher dargestellt werden.

Es gibt zwei verschiedene Formen von Regeln: die *sh:TripelRule* und die *sh:SPARQLRule*. In die *sh:SPARQLRule* ist eine CONSTRUCT-Abfrage entsprechend der SPARQL-Syntax integriert, in der die Tripel definiert werden, die geschlussfolgert werden sollen. In Quellcode 5.2 ist beispielhaft eine Regel abgebildet, die einem Bauteil einen Schaden über *dot:hasDamage* zuordnet, wenn ihm auch deren Vorgänger zugeordnet wurde.

¹⁹<https://www.w3.org/TR/shacl-af/>

```

:hasDamageRulesShape
  a sh:NodeShape ;
  sh:targetClass brot:BridgeElement ;
  sh:rule [
    a sh:SPARQLRule ;
    sh:prefixes brot: ;
    sh:construct """
      CONSTRUCT {
        $this dot:hasDamage ?schadenAktuell }
    WHERE {
      $this dot:hasDamage ?schadenAlt.
      ?schadenAlt pruef:damageID ?ID.
      ?schadenAktuell pruef:damageID ?ID.
      ?schadenAlt pruef:replacedBy ?schadenAktuell.
      ?schadenAktuell rdf:type opm:CurrentPropertyState.
      ?schadenAlt rdf:type opm:OutdatedPropertyState.
      }""" ;

    sh:condition :BridgeElementShape ;
  ].

```

Quelltext 5.2: SHACL-Regel zur Zuordnung eines Schadens zu einem Bauteil anhand des Vorgängerschadens

5.3.11 Eingabe der Schäden vor Ort

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Ausführung der Bauwerksprüfung ist die Möglichkeit, die Schäden direkt vor Ort in das Programm einzugeben, statt zuerst Notizen auf Papier anzufertigen. Wichtig ist dabei, dass die Eingabe schnell möglich ist, ohne dass lange nach Schlüsselwörtern gesucht werden muss. Dies ist besonders bei der Eingabe von neuen Schäden relevant, während bei bereits bestehenden i. d. R. nur wenig ergänzt werden muss. Auf diesen Aspekt muss vor allem bei der Erstellung der Programmoberfläche für die Eingabe der Schäden geachtet werden, jedoch bietet das entwickelte Ontologiemodell auch einige Vorteile für eine schnellere Eingabe. Zum einen ist das betroffene Bauteil direkt aus den vorhandenen auswählbar, anstatt dass das Bauteil und Material einzeln aus einem Katalog gesucht werden muss. Zum anderen wäre eine Möglichkeit, keine oder weniger Pflichtfelder bei der vor Ort Eingabe vorzusehen, welche später ergänzt werden können, bspw. die Bewertung kann auf Grundlage der Schadensbeschreibung im Nachhinein erfolgen.

Eine weitere Funktionalität, die Ontologien mitbringen, ist die Inferenz von Informationen, welche der Prüfer somit nicht selbst eintragen muss. Mithilfe zuvor aufgestellter Regeln,

vgl. Abschnitt 5.3.10, können Teile der Schadensbeschreibung, wie die Bewertung oder Schadenstypen, automatisch ergänzt werden. In der Praxis könnte das so ablaufen, dass dem Prüfer die geschlussfolgerten Eigenschaften zuerst vorgeschlagen werden und er sie noch bestätigen muss. So wird Zeit gespart, da der Prüfer die Schlüsselbegriffe nicht selbst suchen und auswählen muss. Bei Bedarf sollten jedoch auch andere Eigenschaften ausgewählt werden können, da es nicht möglich ist, alle Sonderfälle in den Regeln zu berücksichtigen.

6 Konzept zur Verlinkung eines BIM-Modells mit Schadensdaten

6.1 Allgemein

Im Bauwesen gibt es viele unterschiedliche Aufgaben zu bearbeiten. Dafür steht eine große Zahl an fachspezifischen Softwareanwendungen zur Verfügung. Häufig nutzt jedes Programm ihr eigenes etabliertes Dateiformat für den Datenaustausch, welches nicht mit anderen Anwendungen kompatibel ist. Die domänenübergreifende Informationsübergabe und Kommunikation ist jedoch für das Füllen von Entscheidungen in Bauprojekten besonders wichtig. Deshalb steht der interdisziplinäre Datenaustausch im Fokus vieler Forschungen (Fuchs und Scherer 2017). Ein Ansatz zur Lösung dieses Problems ist die Erarbeitung eines gemeinsamen domänenübergreifenden Dateiformats, welches die Datenübergabe zwischen verschiedenen fachspezifischen Programmen ermöglicht. Dafür wurde der IFC-Standard entwickelt. Der Nachteil an diesem Vorgehen ist, dass an jeder der genutzten Softwareanwendungen große Veränderungen vorgenommen werden müssen, damit diese IFC-Dateien unterstützen. Weiterhin sind in dem Datenstandard viele Fachbereiche noch nicht integriert, was die Nutzung auf ein paar Bereiche beschränkt. Erweiterungen werden jedoch fortlaufend erarbeitet und hinzugefügt, wie bspw. *ifcBridge* für die Modellierung von Brückenbauteilen (buildingSMART International 2020). Eine ständige Erweiterung des Standards bis zu einem „Super-Datenmodell“ ist jedoch nicht erstrebenswert, da dies zu groß und komplex werden würde, um eine effiziente Nutzung umzusetzen. Um dieses Problem zu umgehen, wurde in Fuchs (2015) ein anderer Ansatz vorgestellt: das Multimodellkonzept.

6.2 Überblick Multimodellkonzept

Mit dem Multimodellkonzept soll die uneingeschränkte Weiternutzung von etablierten Programmen, in deren Entwicklung viel Energie gesteckt wurde, möglich sein und trotzdem die interdisziplinäre Übergabe und Verknüpfung von Daten mithilfe neuer Anwendungen erreicht werden.

Das Konzept sieht die Erstellung eines Containers vor, der die heterogenen und lose miteinander gekoppelten Elementarmodelle enthält. Unter Elementarmodellen werden die verschiedenen Modelle und Dateien in ihrem spezifischen Format, die unterschiedliche Aspekte des Bauwerks und Bauprozesses beschreiben, verstanden. Der Container enthält ebenfalls Linkmodelle, welche die Links zur Beschreibung der Verknüpfungen zwischen den Elementen der Elementarmodelle enthalten (vgl. Abb. 6.1). Diese verknüpften Modelle können mit universellen Multimodell-Anwendungen bearbeitet und modellübergreifend ausgewertet werden. Trotzdem ist die Bearbeitung jedes Modells für sich weiterhin mit der fachspezifischen Software möglich.

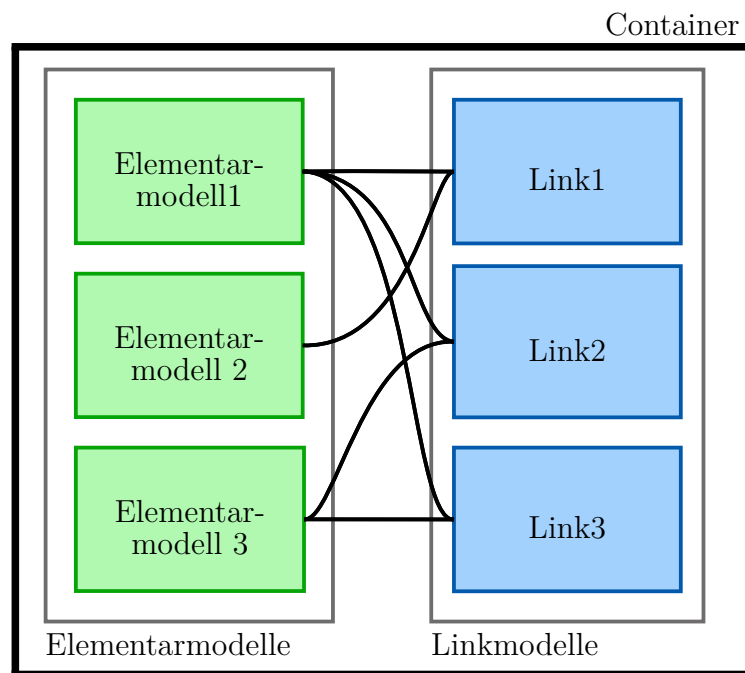


Abbildung 6.1: Elemente eines ICDD

6.3 ICDD

Für die Nutzung von Multimodell-Containern ist es wichtig, dass beim Datenaustausch die Interoperabilität gewährleistet wird. Dafür wurde in der internationalen Norm ISO 21597 der Standard des *Information container for data drop (ICDD)*, welcher teilweise auf dem Konzept von Fuchs 2015 basiert, erarbeitet. Die Norm ist als Entwurf zur Stellungnahme veröffentlicht und wird parallel auch als europäische eingeführt und damit auch automatisch als nationale deutsche Norm DIN EN ISO 21597 übernommen (DIN-Normenausschuss Bauwesen 2018). Sie besteht aus zwei Teilen mit den Titeln: „Container“ und „Dynamische Semantik“. In dieser Arbeit wurde sich auf den ersten Teil konzentriert, der den Aufbau und die Anwendung eines ICDD beschreibt.

6.3.1 Aufbau ICDD

Ein ICDD besteht aus einer Datei mit der Endung „icdd“. Die Ordnerstruktur in dieser Datei ist wie folgt festgelegt. Jeder Container muss eine Übersichtsdatei „Index.rdf“ enthalten, welche den gesamten Inhalt des Containers auflistet. Weiterhin müssen die Ordner „Ontologie-Ressourcen“, „Nutzdaten-Dokumente“ und „Nutzdaten-Tripeln“ vorhanden sein. Der Aufbau ist in Abb. 6.2 am Beispiel der Inhalte für eine Bauwerksprüfung dargestellt. Im Ordner „Ontologie-Ressourcen“ werden die beiden Ontologien „Linkset.rdf“ und „Container.rdf“ gespeichert, welche im Anhang der DIN EN ISO 21597-1 zu finden sind und nicht verändert werden dürfen. Die verwendeten Präfixe sind *ct* für die Container und *ls* für die Linksets. Die Ontologien enthalten das Vokabular zur Beschreibung des Containers und seines Inhaltes und zur Definition von Verknüpfungen zwischen Dateien oder Elementen aus den Dateien. Im Ordner „Nutzdaten-Dokumente“ werden alle Ressourcen gespeichert, welche der Container aufnehmen soll. Diese können in verschiedenen Formaten vorliegen, wie BIM-Modelle im IFC-Format oder Bilder als JPG-Dateien, wobei auch Unterordner zur Strukturierung möglich sind. Im Ordner „Nutzdaten-Tripeln“ werden die erstellten Link-Sets zur Verknüpfung der Ressourcen gespeichert.

In der „Index.rdf“ werden mithilfe des „Container.rdf“-Vokabulars alle Dokumente, die im Container enthalten sind, aufgelistet. Es können interne und externe Ressourcen beschrieben werden, für die jeweils die Angabe des Namen und des Pfades innerhalb der Ordnerstruktur bzw. der URI notwendig ist. Die externe Speicherung von Ressourcen verringert die Größe des Containers (Fuchs und Scherer 2017). Auch die vorhandenen Link-Datensätze werden aufgelistet. Die „Index.rdf“-Datei, sowie die im Folgenden beschriebenen Link-Datensätze, müssen im RDF/XML Serialisierungsformat vorliegen. In Quellcode 6.1 ist ein Auszug aus der „index.rdf“-Datei dargestellt. Er beschreibt ein internes Dokument im IFC-Format und ein Linkset.

Mithilfe der Linkset-Ontologie „Linkset.rdf“ ist die Verknüpfung von zwei oder mehreren Ressourcen aus dem Container möglich. Dafür werden einem Link beliebig viele Link-Elemente zugewiesen, welche wiederum auf ein konkretes Dokument verweisen. Es können nicht nur ganze Dokumente verknüpft werden, sondern auch Teile von ihnen. Dafür kann dem Link-Element ein Identifikationskriterium zugewiesen werden, welches das gewünschte Element eindeutig beschreibt. Dafür gibt es drei Varianten: die string-basierte, die Abfrage oder die URL-basierte. Bei dem string-basiertem Vorgehen wird eine Zeichenkette angegeben, die das gewünschte Element eindeutig identifiziert. Bei dem Vorgehen mit einer Abfrage ist die Angabe einer Abfragesprache, bspw. SPARQL, notwendig. Anschließend werden die Befehle der Abfrage nach den Regeln der gewählten Sprache angegeben. Die URI-basierte Identifikation erfolgt durch die Angabe der URI des gesuchten Elementes. In Quellcode 6.2 ist ein Linkelement dargestellt, dass ein Element des IFC-Modells mit der string-basierten Methode identifiziert.

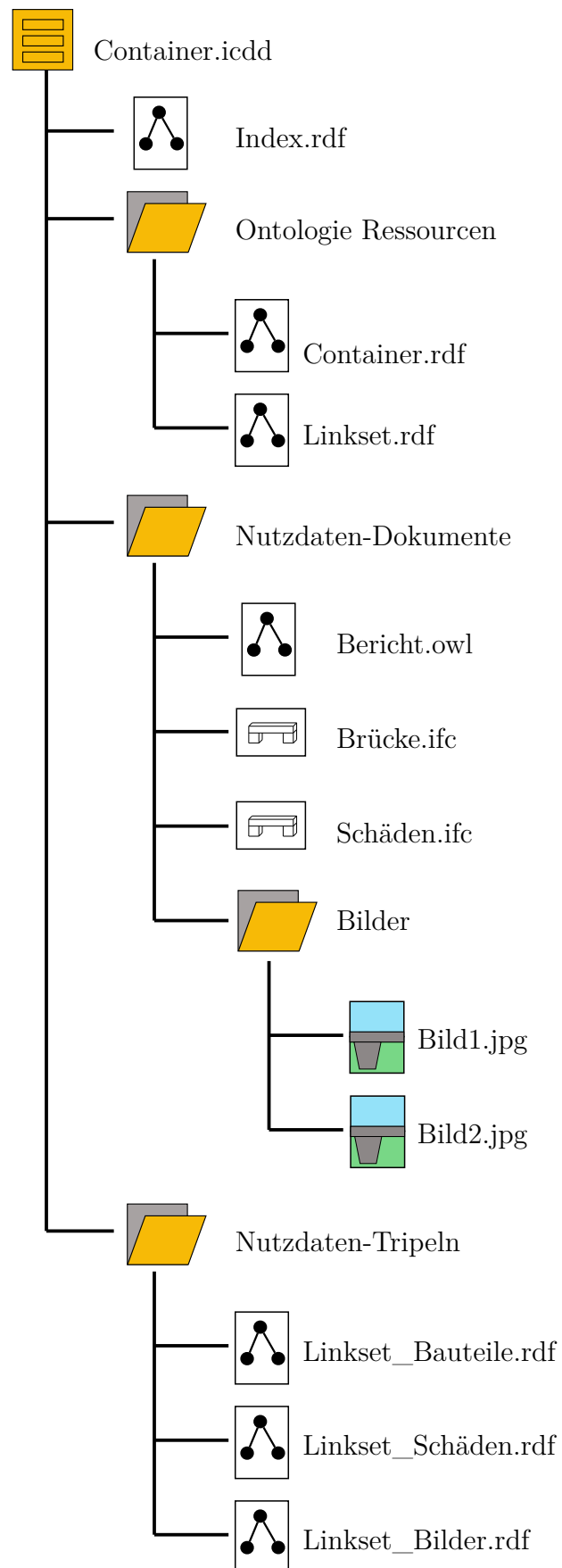


Abbildung 6.2: Aufbau eines ICDD nach DIN EN ISO 21597-1 zur Verknüpfung einer Schadensontologie mit IFC-Modellen und Fotos

```

<ct:containsDocument>
  <ct:InternalDocument rdf:ID="idec9cea6f-dabf-476f-a095-7ad0de">
    <ct:filename>Brücke.ifc</ct:filename>
    <ct:filetype>ifc</ct:filetype>
    <ct:versionDescription>first version</ct:versionDescription>
    <ct:creationDate rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#dateTime"
    >2020-01-11T14:13:28.167</ct:creationDate>
    <ct:description>Brückenmodell</ct:description>
    <ct:versionID>1</ct:versionID>
  </ct:InternalDocument>
</ct:containsDocument>

<ct:containsLinkset>
  <ct:Linkset rdf:ID="ls93b78d01-d141-4e9e-bf48-aad7cf2e3ab9">
    <ct:versionID>1</ct:versionID>
    <ct:creationDate rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#dateTime"
    >2020-01-11T14:13:28.167</ct:creationDate>
    <ct:filename>links.rdf</ct:filename>
  </ct:Linkset>
</ct:containsLinkset>

```

Quelltext 6.1: Auszug eines „index.rdf“-Dokumentes mit der Beschreibung einer IFC-Datei und einem Linkset

```

<ls:hasLinkElement>
  <ls:LinkElement rdf:ID="lea9402420-a5e0-4d77-98e4-6c0b5e1c6b2f">
    <ct:versionID>1</ct:versionID>
    <ct:creationDate rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#dateTime"
    >2020-01-11T14:13:28.167</ct:creationDate>
    <ls:hasIdentifier>
      <ls:StringBasedIdentifier rdf:ID="id62088d8-745a-46f4-ace6-ebee2f62397c">
        <ls:identifier>2ptPWWHjCCfWE1B3yaT2A</ls:identifier>
      </ls:StringBasedIdentifier>
    </ls:hasIdentifier>
    <ls:hasDocument rdf:resource="index.rdf#idec9cea6f-dabf-476f-a095-7ad0de"/>
  </ls:LinkElement>
</ls:hasLinkElement>

```

Quelltext 6.2: Auszug eines Linksets mit der Beschreibung eines Linkelementes aus dem IFC-Modells mit der string-basierten Methode

6.3.2 Verlinkung der Schadensontologie mit einem IFC-Modell

Eine Anwendung des Containers bei der Schadensaufnahme ist die Verknüpfung von Elementen aus der ABox der Schadensontologie mit Elementen aus einem IFC-Bauwerksmodell. Die Verlinkung erfolgt dabei auf der Seite des IFC-Modells mit der string-basierten Identifikation, wobei der eindeutige Identifikator die *Globally Unique Identifier (GUID)* ist. Auf der Ontologieseite sind potenziell alle drei Identifizierungsvarianten des Linkelementes möglich.

Die Verlinkung kann einerseits zwischen den Bauteilen und andererseits zwischen Schäden erfolgen. Durch die IFC-Erweiterung um Brückenbestandteile ist die Erstellung von Links zu den Ontologieelementen einfach möglich. Obwohl Schäden nicht mit IFC abgebildet werden können, besteht die Möglichkeit sie mit Proxyklassen darzustellen, vgl. Abschnitt 2.2.5. Da die genauen Informationen über die Schäden in der Ontologie enthalten sind, genügt es im Geometriemodell die Lage und Ausbreitung darzustellen. Die genaue Angabe der Schadensgeometrie ist aufwendig, für die Prüfung genügt jedoch die Darstellung der groben Abmaße. Doch von den meisten Bauwerken ist kein IFC-Modell vorhanden. Für die aufwandsarme Nachmodellierung des Bestandes wurde in Abschnitt 2.2.5 bereits ein Verfahren zur parametrischen Modellierung beschrieben. Die Genauigkeit dieses Modells ist für die Angabe der Positionen der Schäden ausreichend.

In Abb. 6.3 ist der prinzipielle Aufbau eines Containers für den Anwendungsfall der Schadensaufnahme an einem Brückenbauwerk dargestellt. Der Container enthält die Ontologie mit den Brücken- und Schadensinformationen. Daneben gibt es zwei separate IFC-Modelle, wovon eines die Geometrie der Brückenbauteile enthält und das andere die Schäden darstellt. Weiterhin gibt es einen Ordner, der Fotos der Schäden enthält. Mit den Linkmodellen erfolgt die Verknüpfung der Ressourcen untereinander folgendermaßen: Die Brückenbauteile aus der Ontologie werden mit ihrer geometrischen Repräsentation im IFC-Modell verlinkt und die Schäden werden den Elementen aus dem IFC-Modell zugeordnet.

6.3.3 Fotos und Skizzen

Neben geometrischen IFC-Modellen gibt es viele weitere Dokumente, die in dem Container mit der Schadensontologie verlinkt werden können und für die Bauwerksprüfung relevant sind.

Fotos und Skizzen sollen mit einzelnen Schäden verlinkt werden. Da jede Abbildung in einem Dokument gespeichert wird, ist es nicht notwendig, Identifikatoren anzugeben, die Elemente aus einer Datei bezeichnen. Dagegen wird das gesamte Dokument mit der Fotoinstanz verlinkt. In der Ontologie sind die Fotoinstanzen mit einem bestimmten Schaden verknüpft oder werden einer Prüfung zugeordnet, wenn sie allgemeine Abbildungen der Brücke zeigen. Auf Schadensskizzen sind häufig mehrere Schäden abgebildet. Das Doku-

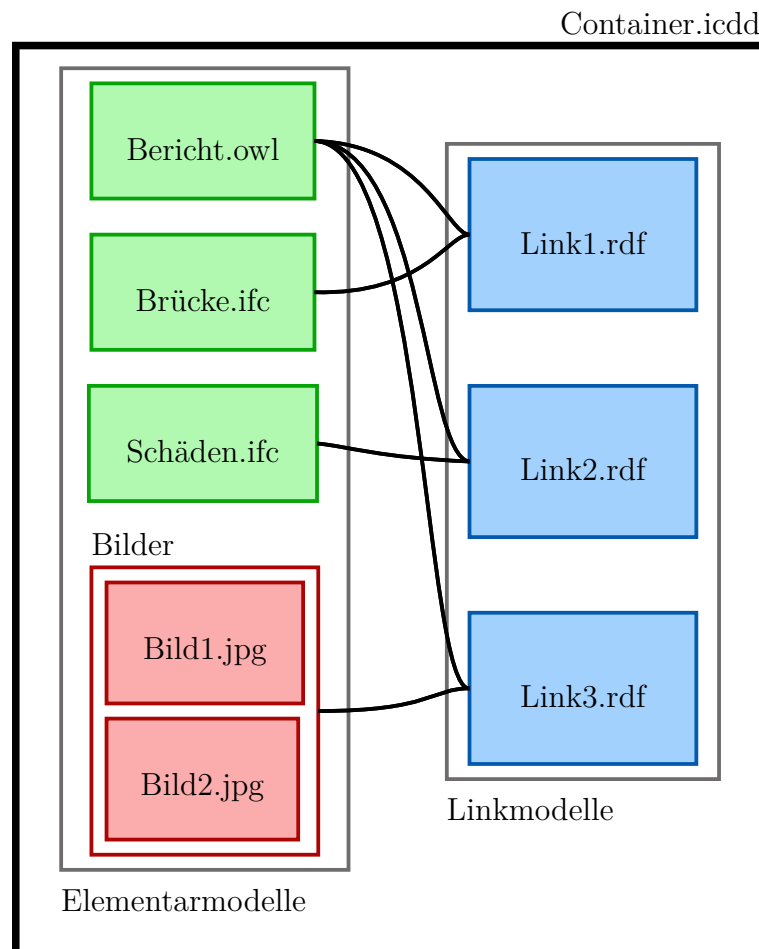


Abbildung 6.3: Aufbau eines ICDD zur Verknüpfung einer Schadensontologie mit IFC-Modellen und Fotos

ment, dass die Schadensskizze enthält, muss jedoch nur einmal mit dem Skizzenelement verlinkt werden, da lediglich eine Instanz existiert. Diese wird in der Ontologie mit mehreren Schadenselementen verknüpft.

6.3.4 SIB-Datenbank

Es ist ebenfalls prinzipiell möglich, die Datenbanktabellen aus SIB-Bauwerke in dem Container zu speichern und die Zeilen, die einen Schaden beschreiben, mit einem Schaden aus der Ontologie zu verlinken. Dies stellt jedoch nur eine lose Verknüpfung der Daten dar. Eine Verlinkung der Datenbank mit einem IFC-Modell ist ebenfalls möglich.

6.3.5 Punktwolken

Beim Einsatz von modernen Technologien in der Bauwerksprüfung, wie Laser-Scanning, UAS oder Sensornetzwerken, entstehen sehr umfangreiche Datensätze, welche eine besondere Verarbeitung benötigen. Die Integration dieser Daten in ein IFC-Modell wird in Taraben u. a. (2018) analysiert. Das Ergebnis der Untersuchung ist, dass der große

Datenzuwachs zu einer schlechteren Datenverarbeitbarkeit und die Konvertierung der Daten zu einem Informationsverlust führen kann. Eine Alternative dazu ist die Integration der Monitoringdaten in ihren eigenen Formaten in das Bauwerksmodell nach dem Multimodellkonzept von Fuchs (2015). In Taraben (2019) wird ein Ansatz vorgestellt, wie Punktwolken-Daten in Teilmengen aufgeteilt und mit den anderen Brücken- und Schadensdaten verlinkt werden können. Um die Verlinkung mit anderen Daten zu ermöglichen, müssen Elemente eindeutig identifizierbar sein, was meist über eine ID realisiert wird. Punktwolkendaten besitzen solche meist nicht. Dafür können Grenzen definiert werden, welche ein Element darstellen, das eine ID erhält und mit anderen Elementen verlinkt werden kann. Alle Punkte, die innerhalb dieser Grenze liegen, sind Bestandteil des Elementes. Dieses in Taraben (2019) entwickelte Modell ist momentan nicht mit dem standardisierten ICDD-Container kompatibel und stellt somit zunächst nur das prinzipiell mögliche Vorgehen dar.

6.3.6 Versionierung

Eine Versionierung des Containerinhaltes ist in der Norm ebenfalls vorgesehen. Versioniert werden können einzelne Dokumente, Linksets oder der gesamte Container, jedoch keine einzelnen Elemente aus den Dokumenten. Die Versionierung erfolgt durch die Vergabe einer Versions-ID an das Element. Mittels der Eigenschaft *ct:priorVersion* kann von einer Ressource auf die frühere gezeigt werden.

7 Vergleich und Auswertung der vorgestellten Datenstrukturen

7.1 Vergleich

Der Vergleich der beiden Ansätze aus Kapitel 3 und 4 erfolgt auf der Ebene der Datenstrukturen, also zwischen relationalen Datenbanken und Ontologien. Ein Programm mit einer fachspezifisch angepassten Oberfläche gibt es für Ontologien noch nicht. Deshalb werden für ein solches die Anforderungen definiert, die aus der Anwendung von SIB-BAUWERKE ermittelt wurden.

7.1.1 Vergleichskriterien

Die Kriterien für den Vergleich werden im Folgenden aufgelistet. Dabei werden die funktionalen Aspekte fokussiert. Folgende Kriterien ergeben sich aus der DIN 1076 und den zugehörigen Richtlinien:

- Beschreibung von Schäden durch vorgegebene Schlüsselwörter
- Darstellung der zeitlichen Änderung (Versionierung) der Schäden
- Verknüpfen von Bauteilen mit den zugehörigen Schäden
- Erstellen von Maßnahmenempfehlungen und Verknüpfung mit den zugehörigen Schäden
- Anhängen von Fotos und Dokumenten an Schäden
- Maschinelle Auswertbarkeit der Daten zur Erstellung von Statistiken

Folgende Kriterien ergeben sich zusätzlich aus der praktischen Anwendung:

- Auswahl mehrerer Schlüsselwörter einer Kategorie zu einem Schaden
- Eindeutige Lokalisierung der Schäden am Bauwerk
- Einfache, schnelle Eintragung vor Ort

7.1.2 Erfüllung der Kriterien

Schadensbeschreibung

In der Schadensbeschreibung können mit beiden Ansätzen Schlüsselworte angegeben und durch einen Freitext ergänzt werden. Bei SIB-BAUWERKE gibt es für jede Kategorie eine Spalte, in die die Eingabe eines Begriffes möglich ist. Bei den Ontologien werden die Begriffe über Datentyp-Eigenschaften angegeben. Für jede Kategorie gibt es eine eigene Eigenschaft, welche beliebig oft an einem Schaden verwendbar ist.

Versionierung

Die Veränderung eines Schadens kann in der relationalen Datenbank erfasst werden. Dies geschieht durch die Erstellung einer neuen Zeile für den gleichen Schaden bei der neuen Prüfung, in die die aktuellen Eigenschaften eingetragen werden können. In der Oberfläche von SIB-BAUWERKE wird jedoch nur die aktuellste Version des Schadens angezeigt, sodass der Verlauf der Schadensveränderung nicht erkennbar ist.

Mit Ontologien sind ebenfalls verschiedene Stadien eines Schadens abbildbar. Für jede Prüfung wird eine neue Instanz des Schadens erstellt, welche über eine Objekt-Eigenschaft mit der Instanz des vorherigen Stadiums des Schadens verbunden werden kann.

Verknüpfung von Schäden und Bauteilen

Die Verknüpfung von Zeilen verschiedener Tabellen, wie Schäden und Bauteile, ist in relationalen Datenbanken über Fremdschlüssel möglich. Allerdings ist es dafür meist notwendig, eine neue Tabelle zur Angabe der Relationen zu erstellen. Die Bauteilzuordnung ist in SIB-BAUWERKE momentan jedoch nicht als Verknüpfung umgesetzt, sondern über die Angabe eines Schlüsselwortes aus der ASB-ING in der Schadensbeschreibung, welches das betroffene Bauteil bezeichnet. Genau genommen ist mit den Schlüsselworten kein bestimmtes Bauteil definiert, sondern nur eine Bauteilart. Bei der Angabe von bspw. „Kappe“ als Bauteil ist unklar, welche Kappe betroffen ist. Dies wird über die Ortsangabe geregelt.

Bei Ontologien werden die Schadensinstanzen über Objekt-Eigenschaften direkt mit den Bauteilinstanzen verknüpft. Dabei kann die Erfassung der Bauteile möglichst kleinteilig erfolgen, z. B. wird je eine Instanz für „Geländer rechts“ und „Geländer links“ erstellt, sodass die Seitenangabe in der Ortsbeschreibung entfallen kann.

Maßnahmenempfehlungen

Die Maßnahmenempfehlungen sind im Gegensatz zu den Bauteilen in SIB-BAUWERKE über Fremdschlüssel mit den Schäden verknüpft. In einer separaten Tabelle werden die Verknüpfungen von Schäden und Empfehlungen, durch Zuordnung der jeweiligen IDs, erstellt.

In Ontologien wird für jede Maßnahmenempfehlung eine Instanz angelegt, welche beliebig über eine Objekt-Eigenschaft mit den Schadensinstanzen verknüpft werden kann.

Anhängen von Dateien

Das Anhängen von Dateien, wie Bilder oder Skizzen, ist in beiden Strukturen ähnlich umsetzbar. Der Dateiname und -pfad werden textlich in einer Tabellenspalte bzw. über eine Datentyp-Eigenschaft gespeichert, während die eigentliche Datei in einem separaten Verzeichnis abgelegt wird.

Mit den Linkmodellen und Multimodellcontainern aus Kapitel 6 ist eine Möglichkeit dargestellt, wie die Schadensmodelle und Bilder gemeinsam in einem Container gespeichert und miteinander verlinkt werden können. Dieses Vorgehen ist prinzipiell mit beiden Datenmodellen möglich.

Auswertbarkeit

Die Auswertbarkeit von Daten bedeutet, dass diese maschinell nach verschiedenen Kriterien gefiltert werden können. Dafür gibt es in den vorliegenden Fällen die Abfragesprachen: SQL für relationale Datenbanken und SPARQL für Ontologien. Beide haben einen ähnlichen Aufbau und Befehlsumfang, sodass mit beiden Sprachen die Erstellung der Standardauswertungen nach ASB-ING für die Bauwerksstatistik, die Zustandsnoten, die Tragfähigkeit und die Altersstruktur möglich ist.

Zuordnung mehrerer Typen

Eine Auswahl mehrerer Schlüsselworte zur Beschreibung eines Schadens, besonders bei der Schadensart, ist erstrebenswert, da durch nur einen Begriff der Schaden u. U. nicht vollständig charakterisiert werden kann bzw. ein Schaden aus mehreren Typen zusammengesetzt ist. In den Richtlinien ist nicht explizit festgelegt, dass nur ein Schlüsselwort je Kategorie ausgewählt werden darf. In der Datenbank ist es jedoch nur möglich, ein Wort je Spalte bzw. Kategorie einzugeben. Um das Problem zu umgehen, könnte mehr als eine Spalte für den Schadenstyp vorgesehen werden, welche nicht alle belegt sein müssen.

Bei Ontologien ist die Anzahl der Attribute, die einer Instanz zugeordnet werden können, unbegrenzt. So ist die Anzahl der auswählbaren Schlüsselwörter beliebig festlegbar. Um sie zu begrenzen, können Shapes zur Validierung der Instanzen erstellt werden, welche die maximale Anzahl an Attributen einer Kategorie festlegen.

Lokalisierung

Die eindeutige Angabe der Position der Schäden ist wichtig, um dem Prüfer die Lokalisierung der Schäden aus den vergangenen Prüfungen zu vereinfachen. Außerdem soll anhand der Ortsangaben eine Sortierung der Schäden in der Prüfreihefolge möglich sein. Die Beschreibung der Position erfolgt bei SIB-BAUWERKE durch Schlüsselwörter, zu

denen auch eine genaue Dimension angegeben werden kann. Mit den Begriffen muss die Position global am Bauwerk und genau am entsprechenden Bauteil angegeben werden. Dafür stehen genau fünf Spalten zur Verfügung und zusätzlich jeweils eine zur Angabe der Dimension: „Ortsangabe längs“, „quer“, und „hoch“ sowie „Feld“ und „Nummer des Überbaus“

Bei den Ontologien können beliebig viele Schlüsselbegriffe zur Ortsangabe über Datentyp-Eigenschaften der Beschreibung angefügt werden. Dabei muss nur die Position in dem Bauteil beschrieben werden, da das betroffene Bauteil und dessen Position über die Bauteilzuordnung festgelegt wird.

Die textliche Ortsbeschreibung bleibt jedoch unabhängig vom Modell umständlich und aufwändig im Vergleich zur Eintragung in ein zwei- oder dreidimensionales Geometrie-modell. Aus diesem Grund ist die Integration eines IFC-Modells in den Prozess der Schadensaufnahme zur Lokalisierung der Schäden erstrebenswert.

Eintragung vor Ort

Eine Eintragung der Schäden in das Programm vor Ort ist erstrebenswert um doppelte Arbeit zu ersparen. Ansonsten müssen alle Schäden zuerst auf Papier aufgenommen und anschließend übertragen werden.

Die Nutzung von SIB-BAUWERKE vor Ort ist möglich, jedoch hat es sich in der Praxis als zu umständlich erwiesen. Die Eintragung neuer Schäden dauert sehr lang, da die Schlüsselbegriffe aus umfangreichen Katalogen ausgewählt werden müssen.

Mit Ontologien kann aufgrund ihrer offenen Struktur und der Möglichkeit der Schlussfolgerung eine schnellere Eintragung umgesetzt werden.

7.1.3 Auswertung

Ontologien haben in zwei Aspekten deutliche Vorteile gegenüber den relationalen Datenbanken. Zum einen ist das die beliebige Anzahl von Attributen, die einer Instanz zugeordnet werden kann, während die Anzahl der Spalten in Datenbanken starr ist. Dies ist auch ein Vorteil, wenn Anpassungen, wie bspw. bei Änderungen in den Richtlinien, an dem Programm notwendig sind. Der zweite Aspekt ist die unkomplizierte Verknüpfung von Elementen untereinander. Dies ist in Datenbanken auch möglich, jedoch durch die Anlegung separater Verknüpfungstabellen deutlich umständlicher.

Zusammengefasst sind die Vorgaben aus den Richtlinien mit beiden Datenmodellen erfüllbar. Jedoch sind viele der genannten Möglichkeiten von relationalen Datenbanken in SIB-BAUWERKE nicht voll ausgeschöpft, wie bspw. die Verknüpfung von Bauteilen und Schäden, oder sie sind über die Oberfläche nicht erkennbar, wie die einzelnen Entwicklungsstadien eines Schadens.

Ein weiterer Vorteil von Ontologien ist die Schlussfolgerung von Informationen mithilfe von Regeln. Damit kann der Prozess der Schadenseingabe deutlich effizienter und einheitlicher gestaltet werden. Jedoch bedarf es einer großen Anzahl an Erfahrungswerten für die Erstellung der Regeln, um möglichst viele Fälle mit ihnen abzudecken.

7.2 Anforderungen an eine Software für die Bauwerksprüfung

In den vorherigen Abschnitten wurden die Datenstrukturen im Hintergrund von Programmen zur Schadensaufnahme beleuchtet. Ebenso wichtig ist das Clientprogramm, über das die Eingaben in die Datenbanken getätigt werden. Da für diese noch kein Vergleich möglich war, werden im Folgenden die Anforderungen an ein Programm zur Durchführung der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 spezifiziert, mit dem die bestehenden Richtlinien berücksichtigt werden und ein nutzerfreundlicher, effizienter Arbeitsablauf möglich ist:

- Die Daten eines Bauwerkes sollten parallel von mehreren Nutzern (Behörde und Ingenieurbüro) bearbeitet werden können.
- Die zeitliche Entwicklung eines Schadens muss in der Oberfläche abgebildet werden.
- In der Schadensbeschreibung sollte die Auswahl mehrerer Schlüsselwörter aus einer Kategorie möglich sein.
- Die Lagebeschreibung eines Schadens muss genau und eindeutig erfasst werden können.
- Die Möglichkeit der Sortierung der Schäden in Prüfreihenfolge ist erstrebenswert.
- Die Daten sollen in Form eines Bauwerksbuches bzw. eines Zustandsberichtes ausgegeben werden können.
- Die Definition von Pflichtfeldern für notwendige Eingaben ist wünschenswert.
- Der Datentyp und die Länge von Eingabewerte sollte beschränkt werden.
- Zur Bewertung der Schäden sollen die passenden Schadensbeispiele vorgeschlagen werden.
- Die schnelle und unkomplizierte Eintragung von Schäden direkt vor Ort sollte ermöglicht werden.

8 Schlussbetrachtung

8.1 Auswertung

Der Vergleich der beiden Datenmodelle ergibt, dass Ontologien im Gegensatz zu relationalen Datenbanken eine deutlich offenere und flexiblere Struktur aufweisen. Dies zeigt sich vor allem in der beliebigen Anzahl von Eigenschaften, die einer Instanz zugeordnet werden können, sowie der unkomplizierten Verknüpfung von Instanzen. So können Schäden u. a. direkt mit den betroffenen Bauteilen verknüpft werden. In relationalen Datenbanken sind diese Verknüpfungen theoretisch auch darstellbar, jedoch aufwendiger umzusetzen. Schlecht abbildbar ist auch der Verlauf der Änderungen eines Schadens in der Datenbank. Die einzelnen Stadien können in den Tabellen aufgenommen werden, jedoch ist die direkte Verknüpfung zwischen ihnen nicht möglich. Hinzu kommt, dass viele Funktionalitäten von Datenbanken in SIB-BAUWERKE nicht ausgeschöpft wurden. Dazu zählt, dass die Angabe einer Bauteilart, eines Materials und einer Ortsangabe in der Schadensbeschreibung erfolgt, anstelle einer direkten Verknüpfung von Schäden mit Bauteilen, zu denen diese Informationen vorhanden sind.

Neben den Funktionalitäten der Datenmodelle spielen die Möglichkeiten und der Aufbau eines Programms zur Eingabe der Schäden in die Datenbank bzw. Ontologie eine große Rolle. Für Ontologien existiert noch keine solche fachspezifische Anwendung, sodass nur das Programm SIB-BAUWERKE analysiert wurde. In dessen Oberfläche werden bspw. die einzelnen Stadien eines Schadens nicht abgebildet, obwohl die Informationen in der Datenbank vorhanden sind. So ist keine umfassende Beurteilung der Schadensentwicklung möglich.

Neben den angesprochenen Optimierungsmöglichkeiten gibt es eine Reihe von Mängeln an der Programmoberfläche von SIB-BAUWERKE, welche die Geschwindigkeit und Effizienz des Prozesses der Schadensaufnahme stark verringern. Da diese jedoch schlecht objektiv analysierbar sind, wird der Punkt hier nur kurz erwähnt. Ein Beispiel dafür ist das Löschen von Fotos der Brückenansichten, wenn für diese aktuellere vorhanden sind. Jedes Foto muss einzeln angewählt und gelöscht werden. Eine Auswahl von mehreren ist nicht möglich. Ein anderes Beispiel ist, dass für die Auswahl eines Elementes häufig das Element und anschließend ein weiterer Button (z. B.: „Ändern“) angeklickt werden muss, anstatt eines Doppelklicks.

Nach Umsetzung der Änderungsvorschläge für SIB-BAUWERKE würden Ontologien im Rahmen der aktuellen Richtlinien geringere Vorteile gegenüber Datenbanken zeigen, jedoch bieten sie weitere Funktionalitäten, wie die Inferenz von Informationen, welche momentan nicht durch die vorhandenen Regelungen erfasst werden. Mit der Schlussfolgerung von Informationen aus zuvor definierten Regeln kann die Schadensaufnahme effizienter und einheitlicher gestaltet werden. Besonders bei der Eingabe vor Ort kann so Zeit gespart werden.

Für eine solche Automatisierung sind jedoch viele Erfahrungswerte notwendig, um Regeln zu erstellen, die den größten Teil der Sachverhalte abbilden. Für Sonderfälle sollte deshalb auch die Möglichkeit einer individuellen Eingabe ermöglicht werden. Dies ist jedoch weniger eine technische Frage, als vielmehr von den rechtlichen Rahmenbedingungen abhängig. In den Richtlinien sollte vermerkt werden, wie verfahren werden soll, wenn für spezielle Schadensarten, Bauteile oder andere Schlüsselwörter der benötigte Begriff nicht in der ASB-ING enthalten ist. Dabei muss die Einheitlichkeit des Zustandsberichtes gegen die Möglichkeit der Ergänzung von Sonderfällen durch den Prüfer abgewogen werden. Das ist nicht nur eine Frage bei der automatisierten Auswahl, sondern auch bei der händischen, wenn Sonderfälle im Schadensmodell abgebildet werden sollen.

Die Integrierung eines IFC-Modells in den Prozess des Schadensmanagement hat sich als vorteilhaft für die Lokalisierung von Schäden herausgestellt. In dieser Arbeit wurde die Möglichkeit der Verlinkung von Schadensdaten mit einem IFC-Bauwerksmodell aufgezeigt. Diese Verknüpfung ist in dem ICDD-Container mit beiden vorgestellten Datenmodellen möglich. Auch wenn momentan nur wenige Bauwerke als geometrisches Modell vorliegen, sollte diese Möglichkeit weiter untersucht werden. Die Erstellung von parametrischen Modellen, welche für mehrere Bauwerke anwendbar sind, könnten den Erstellungsprozess von geometrischen Modellen erleichtern.

Die Nutzung von Ontologien bietet weiterhin Vorteile, wenn man über den Prozess der Bauwerksprüfung hinausblickt. Denn mit ihnen ist der Austausch zu anderen Domänen leichter möglich, bspw. können Bauwerksmodelle aus der Planungsphase für die Eintragung der Schäden wiederverwendet werden. So bildet die Verwendung von Ontologien für die Schadensaufnahme einen Baustein für einen interdisziplinären Informationsprozess über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks.

Weiterhin ist die Nutzung der Schadensontologien nicht auf den Bereich der Prüfung von Infrastrukturbauwerken beschränkt, sondern kann für beliebige andere Bauwerkstypen verwendet werden. Voraussetzung ist dabei nur, dass Ontologien für die Beschreibung der Bauteile existieren.

Abschließend kann gesagt werden, dass mit relationalen Datenbanken die Schadensaufnahme und Bauwerksprüfung nach DIN 1076 gut umsetzbar ist. Ontologien bieten jedoch

weitere Möglichkeiten, um den Prozess effizienter zu gestalten. Dazu zählen die Möglichkeit der Inferenz von Informationen sowie die einfache Verknüpfung von Instanzen in der Schadensaufnahme und der Verlinkung zu Modellen aus anderen Domänen.

8.2 Ausblick

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit ergeben sich weitere Fragestellungen, die Gegenstand folgender Untersuchungen werden sollten. Zunächst sollte das Programm SIB-BAUWERKE und der Prozess des Schadensmanagements auch aus der Sicht der Behörden analysiert werden, um so weitere Anforderungen an das neue Datenmodell zu definieren. Einzelne Aspekte davon wurden in dieser Arbeit bereits angesprochen, wie das Erstellen von Abfragen, um die benötigten Bauwerksstatistiken zu generieren. Ein weiteres Thema wird die Abbildung von Instandsetzungsmaßnahmen sowie die Koordination der verschiedenen Bauwerke und Baumaßnahmen miteinander darstellen.

Weiterhin umfasst die DIN 1076 neben Brücken auch Bauwerke, wie Tunnel, Lärmschutzwände und Stützbauwerke. Diese Bauwerkstypen müssen noch in die Ontologien aufgenommen werden. Dies umfasst die Erstellung von Klassen für die Bauteile, sowie eventuell bauwerksspezifische Schäden.

Ebenso sollte untersucht werden inwiefern der rechtliche Rahmen, d. h. insbesondere die RI-EBW-PRÜF und ASB-ING, für die Verwendung von Ontologien in der Bauwerksprüfung überarbeitet werden muss. Prinzipiell ist die Umsetzung nach den geltenden Regeln möglich, jedoch bieten sich mit Ontologien neue Möglichkeiten der Datenstrukturierung, welche in den Richtlinien noch nicht erfasst sind.

Der Prozess der Umstellung des Schadensmanagements auf eine neue Anwendung und die Konvertierung der Bestandsdaten in das neue Format muss ebenfalls untersucht werden. Möglich wäre, neben der Übertragung der Informationen von SIB-BAUWERKE in die Ontologie, auch die Neuaufnahme der Bauwerk mithilfe von bildgebenden Verfahren, wie dem Laser-Scan. Um die Schadensdaten zwischen den Modellen nur zu Verknüpfen ohne sie umwandeln zu müssen, wäre auch die Verwendung der Multimodellcontainer möglich.

Durch die Nutzung von Ontologien für die Bauwerksprüfung, kann diese in einen multidisziplinären BIM-basierten Arbeitsablauf integriert werden. Damit ist die Schadensaufnahme kein alleinstehender Vorgang, sondern wird Teil eines kollaborativen fächerübergreifenden Prozesses über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks.

Literaturverzeichnis

- Attanayake, Upul u. a. (2011). *Non-Contact Bridge Deflection Measurement: Application of Laser Technology*.
- Baader, Franz, Hrsg. (2010). *The description logic handbook: Theory, implementation, and applications*. 2. Aufl. Cambridge Univ. Press.
- BAST (2019). *Brückenstatistik 2019*.
- BMVBS (2013a). *Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr.22/2013*. Bonn.
- (2013b). *Anweisung Straßeninformationsbank Segment Bauwerksdaten*.
- BMVI (2017). *Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 - RI-EBW-PRÜF*.
- Bonduel, Mathias u. a. (2018). „A novel workflow to combine BIM and linked data for existing buildings“. In: 12th European Conference on Product and Process Modelling (ECPM). CRC Press, S. 347–354.
- Borrmann, André u. a. (2015). „Einführung“. In: *Building Information Modeling*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 1–21.
- buildingSMART International (2020). *IFC Release Notes*. buildingSMART Technical. URL: <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/ifc-release-notes/> (besucht am 26.01.2020).
- Cacciotti, Riccardo; Blaško, Miroslav; Valach, Jaroslav (2015). „A diagnostic ontological model for damages to historical constructions“. In: *Journal of Cultural Heritage* 16.1, S. 40–48. DOI: 10.1016/j.culher.2014.02.002.
- CEDR-INTERLINK (2020). *Approach with basic European Road OTL*. URL: <https://roadotl.eu/static/ireport/index.html> (besucht am 22.01.2020).
- Debus, Paul; Benz, Christian (2019). „Verbesserung der Risserkennung in UAS Bildern durch Fusion mehrerer Aufnahmen“. In: 31. Forum Bauinformatik. Berlin, S. 307–314.
- DIN-Normenausschuss Bauwesen (1999). *DIN 1076:1999-11 Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung*. Beuth Verlag GmbH. DOI: 10.31030/8499929.
- (2018). *DIN EN ISO 21597-1:2018-10, Informationscontainer zur Datenübergabe - Austausch-Spezifikation - Teil 1: Container*. Beuth Verlag GmbH. DOI: 10.31030/2873237.

- DuCharme, Bob (2013). *Learning SPARQL: querying and updating with SPARQL 1.1*. 2. Aufl. Sebastopol: O'Reilly Media.
- Ellinger, Andreas (2018). „Ansätze zur halbautomatischen Bestandsbrückenmodellierung“. In: 30. Forum Bauinformatik. Weimar, S. 147–154.
- Fuchs, Sebastian (2015). „Erschließung domänenübergreifender Informationsräume mit Multimodellen“. Diss. Technische Universität Dresden.
- Fuchs, Sebastian; Scherer, Raimar J. (2017). „Multimodels — Instant nD-modeling using original data“. In: *Automation in Construction* 75, S. 22–32. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.11.013.
- Gayo, J. E. Labra u. a. (2017). *Validating RDF Data*. 1. Aufl. Bd. 7. Synthesis Lectures on the Semantic Web: Theory and Technology. Morgan & Claypool.
- Haardt, Peter (1999). *Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau H. 22. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss.
- Hamdan, Al-Hakam; Bonduel, Mathias; Scherer, Raimar J. (2019). „An ontological model for the representation of damage to constructions“. In: Linked Data in Architecture and Construction Workshop - LDAC2019. Lissabon.
- Hamdan, Al-Hakam; Scherer, Raimar J. (2018). „A Generic Model for the Digitalization of Structural Damage“. In: IALCCE 2018. Gent.
- (2019). „A knowledge-based Approach for the Assessment of Damages to Constructions“. In: 36th CIB W78 Conference.
- Huber, Daniel u. a. (2010). „Using laser scanners for modeling and analysis in architecture, engineering, and construction“. In: Proc. CORD Conf. S. 1–6. DOI: 10.1109/CISS.2010.5464818.
- Kozak, Taras; Hamdan, Al-Hakam (2019). „Ein ontologisches Modell zur Repräsentation von Brücken“. In: 31. Forum Bauinformatik. Berlin, S. 125–132.
- Li, Gang u. a. (2017). „Recognition and evaluation of bridge cracks with modified active contour model and greedy search-based support vector machine“. In: *Automation in Construction* 78, S. 51–61. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.01.019.
- Morgenthal, Guido u. a. (2019). „Framework for automated UAS-based structural condition assessment of bridges“. In: *Automation in Construction* 97, S. 77–95. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.10.006.
- Pauwels, Pieter; Terkaj, Walter (2016). „EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology“. In: *Automation in Construction* 63, S. 100–133. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.12.003.
- Rasmussen, Mads Holten; Lefrançois, Maxime u. a. (2018). „OPM: An ontology for describing properties that evolve over time“. In: 6th Linked Data in Architecture and Construction Workshop - LDAC2018. London.

- Rasmussen, Mads Holten; Pauwels, Pieter u. a. (2017). „Proposing a central AEC ontology that allows for domain specific extensions“. In: Lean and Computing in Construction Congress. Heraklion.
- Ren, Guoqian; Ding, Rui; Li, Haijiang (2019). „Building an ontological knowledgebase for bridge maintenance“. In: *Advances in Engineering Software* 130, S. 24–40. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2019.02.001.
- Sacks, Rafael u. a. (2018). „SeeBridge as next generation bridge inspection: Overview, Information Delivery Manual and Model View Definition“. In: *Automation in Construction* 90, S. 134–145. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.02.033.
- Singer, Dominic; Borrmann, André (2016). *Machbarkeitsstudie BIM für Bestandsbrücken : Schlussbericht*. Technische Universität München; Beauftragt durch die Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Tanaka, Fumiki u. a. (2018). „Bridge Information Modeling based on IFC for supporting maintenance management of existing bridges.“ In: 17th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering.
- Tang, Pingbo; Akinci, Burcu; Garrett, James (2007). „Laser Scanning for Bridge Inspection and Management“. In: *IABSE Symposium Report* 93, S. 17–24. DOI: 10.2749/222137807796120283.
- Taraben, Jakob (2018). „Methode zur automatisierten Verortung von Inspektionsdaten aus bildbasierten Bauwerksprüfungen“. In: 30. Forum Bauinformatik. Weimar, S. 89–96.
- (2019). „A model for building information management of structural inspections“. In: 31. Forum Bauinformatik. Berlin, S. 307–314.
- Taraben, Jakob u. a. (2018). „Approach for the IFC based Integration of Life Cycle Data and Processes in Building Information Models“. In: 17th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, S. 944–950.
- Tulke, Jan u. a. (2016). „Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags“. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen* Heft B 130.
- Unterstein, Michael; Matthiessen, Günter (2012). *Relationale Datenbanken und SQL in Theorie und Praxis*. eXamen.press. Berlin, Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-28986-6.
- Volk, Rebekka; Stengel, Julian; Schultmann, Frank (2014). „Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs“. In: *Automation in Construction* 38, S. 109–127. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.
- WPM Ingenieure GmbH (2020). URL: http://wpm-ingenieure.de/include.php?path=sib_bauwerke&pid=21&subid=35&lid=&page=5 (besucht am 03.01.2020).
- Yu, Liyang (2014). *A Developer's Guide to the Semantic Web*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Abbildungsverzeichnis

3.1	Tabellenstruktur der Datenbank von SIB-BAUWERKE	12
3.2	Programmoberfläche SIB-BAUWERKE - Allgemeine Bauwerksdaten . . .	13
3.3	Auszug der Darstellung der Schadensbeschreibungen und Fotos im Zu- standsbericht	16
3.4	Workflow der Schadensaufnahme mit SIB-BAUWERKE	17
3.5	Programmoberfläche SIB-BAUWERKE - Maske zur Auswahl eines Schlüs- selwortes zur Beschreibung der Schadensveränderung	18
3.6	Programmoberfläche SIB-BAUWERKE - Maske zur Auswahl eines Schlüs- selwortes zur Beschreibung der Schadensart	19
3.7	Programmoberfläche SIB-BAUWERKE - Maske zur Bestimmung der Scha- densbewertung aus vorgeschlagenen Schadensbeispielen	21
4.1	Graphstruktur eines Tripels	24
4.2	Darstellung einer Schadensinstanz und deren Eigenschaften aus der ABox des Beispiellobjektes	31
4.3	Visualisierung des Unterschiedes zwischen der Verwendung von Klassenin- stanzen oder Zeichenketten zur Beschreibung von Eigenschaften	33
4.4	Ergebnis der SPARQL-Abfrage: Ausgabe aller Einzelbewertungen mit der Note 3 oder 4	37
5.1	Erstellte Klassen und Datentyp-Eigenschaften zur Beschreibung der Scha- denstypen	40
5.2	Möglichkeiten der Angabe von Einheiten in Ontologien	42
5.3	Ontologieerweiterung zur Abbildung von Schäden, Prüfungen und Bauteil- gruppen	43
5.4	Visualisierung der ABox der Schadensontologie unter Verwendung der On- tologieerweiterungen	44
5.5	Visualisierung von verschiedenen Stadien eines Schadens in ABox der Scha- densontologie	46
5.6	Ontologieerweiterung für Prüfanweisungen, Prüfgeräte und Maßnahmen- empfehlungen	48
6.1	Elemente eines ICDD	54

6.2	Aufbau eines ICDD nach DIN EN ISO 21597-1 zur Verknüpfung einer Schadensontologie mit IFC-Modellen und Fotos	56
6.3	Aufbau eines ICDD zur Verknüpfung einer Schadensontologie mit IFC-Modellen und Fotos	59

Tabellenverzeichnis

4.1	Vorhandene Ontologien zur Schadensaufnahme	29
4.2	Vorhandene Ontologien zur Beschreibung von Brücken	30

Quelltextverzeichnis

4.1	Auflistung der in dieser Arbeit auftretenden Prefixe	25
4.2	Ausschnitt der Schadensontologie in XML-Syntax	26
4.3	Ausschnitt der Schadensontologie in Turtle-Syntax	26
4.4	Auszug eines NodeShapes für die Schadensbewertung	35
4.5	Beispiel für eine SPARQL-Abfrage nach allen Einzelbewertungen mit der Note 3 oder 4	37
5.1	Beispiel für NodeShape für die Einschränkungen der Mengenangaben in der Schadensbeschreibung	41
5.2	SHACL-Regel zur Zuordnung eines Schadens zu einem Bauteil anhand des Vorgängerschadens	51
6.1	Auszug eines „index.rdf“-Dokumentes mit der Beschreibung einer IFC- Datei und einem Linkset	57
6.2	Auszug eines Linksets mit der Beschreibung eines Linkelementes aus dem IFC-Modells mit der string-basierten Methode	57

