

DIPLOMARBEIT

Konzeption und Erstellung eines Datenaustausches zwischen BIM und der Structural-Analysis-Software ATENA auf der Grundlage des digitalen Bauwerksmodells IFC und der MVD-Methode

Bearbeiter: Hamdan, Al-Hakam

Matrikelnummer: 3718025

Institution: Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für

Bauinformatik

Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. R. J. Scherer

Betreuer: Ismail, Ali

Termin der Abgabe: Dresden, 01.02. 2016

SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tag dem Prüfungsausschuss der Fakultät Bauingenieurwesen eingereichte Diplomarbeit zum Thema:

Konzeption und Erstellung eines Datenaustausches zwischen BIM und der Structural-Analysis-Software ATENA auf der Grundlage des digitalen Bauwerksmodells IFC und der MVD-Methode

vollkommen selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen	als
Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.	

Dresden, den

Al-Hakam Hamdan

KURZE ZUSAMMENFASSUNG - ABSTRACT

Ziel der Diplomarbeit ist die Entwicklung einer Model View Definition im standardisierten mvdXML-Format, die Austauschprozesse innerhalb der Tragwerksplanung unterstützt. Die Informationen hierfür werden mit Hilfe der IFC-Erweiterung Structural Analysis Model (kurz: ST-4) modelliert. Da diese Erweiterung einige Aspekte der Tragwerksberechnung, wie z.B. eine nichtlineare probabilistische Analyse, nicht unterstützt, muss untersucht werden, inwieweit ST-4 dafür verwendet werden kann. Es wird auch die Interoperabilität zwischen ST-4 und Statik-Programmen untersucht. Hierfür wurde als Beispielprogramm ATENA ausgewählt. Basierend auf diesen Ergebnissen, werden Property-Sets für eine Erweiterung von IFC-Modellen erstellt, damit eine nicht-lineare probabibilistische Analyse möglich wird.

Es werden 3 Typen von Property-Sets erstellt. Zum einen muss das IFC-Schema um lineare und nicht-lineare Materialparameter ergänzt werden. Zum anderen wird ein Property-Set für die Definierung von probabilistischen Parametern erstellt. Zusätzlich wird ein Property-Set entwickelt, das Netzparameter für eine FEM-Vernetzung beinhaltet.

Die Model View Definition verwendet bereits existierende Konzepte der Structural Analysis View, einer MVD, die in Konzeptform vorliegt und ebenfalls für Tragwerksmodelle konzipiert worden ist. Die im Rahmen der Diplomarbeit zu entwickelnde MVD wird um einige Konzepte erweitert, die Bewehrungselemente, Flächenlager, sowie unterschiedliche Materialebenen unterstützen. Außerdem werden die entworfenen Property-Sets implementiert.

Abschließend wird ein Beispielmodell anhand der MVD validiert.

ABSTRACT - ENGLISH VERSION

This study aspires to develop a Model View Definition in the standardized mvdXML-format. Its objective is to support the exchange of structural analysis processes. Data for structural analysis in IFC are provided by the extension Structural Analysis Model (short: ST-4). Some aspects of structural analysis, such as the non-linear probabilistic analysis, are not supported by ST-4. Therefore it must be examined to what extent ST-4 can be used for exchanging processes between structural analysis software. For this purpose ATENA will be used as the program, that shall use data of ST-4. Based on this examination, several property-sets will be created to extend IFC-models for a non-linear probabilistic analysis.

3 different types of property-sets have been developed. The first property-set supports the use of linear and non-linear material-parameters. The second defines probabilistic parameters. Additionally a property-set with mesh parameters is created for FEM-use.

The Model View Definition is based on the Structural Analysis View, a MVD designed for structural design and analysis. The MVD created in this study, is extended by concepts, that support reinforcing elements, surface connections and different material layers. The newly developed property-sets will also be implemented.

Finally an IFC-example-model will be validated, using the MVD.

INHALTSVERZEICHNIS

Inhalt

Se	lbstst	ändi	gkeitserklärung	l
Ku	rze Zı	usam	nmenfassung - Abstract	11
Αb	strac	t - eN	IGLISH vERSION	III
Inł	naltsv	erzei	chnis	IV
Αb	bildur	ngsv	erzeichnis	VII
Та	beller	nverz	eichnis	X
Αb	kürzu	ngs-	und Symbolverzeichnis	XI
1	Einl	eitur	ng	12
	1.1	Pro	blemstellung	12
	1.2	Ziel	e	13
	1.3	Erlä	uterung zur Aufgabenstellung	13
	1.4	Glie	ederung	14
2	Stru	uctur	al Analysis Model	14
	2.1	Allg	emeines zu ST-4	14
	2.2	Auf	bau von ST-4	16
	2.2	.1	IfcStructuralAnalysisModel	18
	2.2	.2	lfcStructuralItem	19
	2.2.3		IfcStructuralActivity	25
	2.2	.4	IfcStructuralLoadGroup und IfcStructuralResultGroup	28
3	ATE	ENA	Eingabe Datenstruktur	30
;	3.1	Allg	emeines zu ATENA	30
;	3.2	Eing	gabeoptionen und Aufbau in ATENA	30
	3.2	.1	Materialparameter	31
	3.2.	.2	Makroelemente	33
	3.2	3	Rewehrung	39

		3.2.	4	Auflager und Belastungen	41
		3.2.	5	Federung	44
4		Opt	imier	rung von IFC für eine nicht-lineare probabilistische Analyse	45
	4.	.1	Inte	roperabilität zwischen ST-4/IFC 2x3 und ATENA	45
	4.	4.2 ERv		veiterung des IFC-Schemas	48
		4.2.	1	Allgemeines zu Property Sets	48
		4.2.	2	Lineare und nicht-lineare Materialeigenschaften	50
		4.2.	3	Vernetzung	61
		4.2.	4	Parameter für eine probabilistische Analyse	63
5		Allg	eme	ines Verfahren zur Erstellung einer MVD	65
	5.	.1	Allg	emeines zu Model View Definitions	65
	5.	.2	IDN	I/MVD-Methode zur Erstellung einer MVD	66
	5.	.3	Sch	ematischer Aufbau einer MVD	67
		5.3.	1	Variables Konzept	68
		5.3.	2	Adapter Konzept	68
		5.3.	3	Statisches Konzept	69
	5.	.4	Erlä	uterung zu mvdxml	71
		5.4.	1	Allgemeines	71
		5.4.	2	Aufbau einer Model-View-Definition in mvdXML	72
6	Konzept einer MVD für den Austausch von Daten der Tragwerksplanung		76		
	6.	.1	IDM	I zur Beschreibung des Datenaustausches innerhalb der Tragwerksplanung	76
	6.	.2	MVI	D-Konzept für Datenaustausch zwischen IFC-Modell und ATENA	78
		6.2.	1	Aufbau der Structural Analysis View	78
		6.2.	2	Variable Konzepte zu Entitätstypen außerhalb von ST-4	79
		6.2.	3	Variable Konzepte zu Entitätstypen innerhalb von ST-4	81
	6.	.3	Erw	eiterungen und Veränderungen zur Structural Analysis View	84
		6.3.	1	Materialeigenschaften	84
		6.3.	2	Material Layer	89

	6.3	.3	Bewehrung	90
	6.3	.4	Flächenlager	93
	6.4	Erst	ellung der MVD in mvdXML	94
7	Vali	dieru	ng eines IFC-Modells mittels MVD	95
	7.1	Allg	emeine Informationen zum Beispiel-Modell	95
	7.2	Aufl	oau des Beispiel-Modells	96
	7.3	Vali	dierung des IFC-Modells mit IfcDoc	100
	7.4	Korı	ektur von Validierungsfehlern	102
	7.4	.1	Owner and Status Information	102
	7.4	.2	Loaded By Three Level Hierarchy	103
	7.4	.3	Structural Object Placement	105
	7.4	.4	Generic Structural Connection Assignment	106
	7.5	Übe	ertragung des Beispielmodells in ATENA	106
	7.6	Erga	inzungen des Beispielmodells	107
	7.6	.1	Aggregates Structural Analysis Models	107
	7.6	.2	Materialparameter im Beispielmodell	107
	7.6	.3	Structural Analysis Group Assignment	108
8	Auf	trete	nde probleme der MVD	109
	8.1	Aus	tauschprobleme zwischen Structural Analysis Model und ATENA	109
	8.2	Prol	pleme durch ATENA	109
	8.3	Prol	pleme des Formats mvdXML	109
9	Zus	amm	nenfassung und Ausblick	111
	9.1	Zus	ammenfassung der Diplomarbeit	111
	9.2	Aus	blick	112
1	0 L	iterat	curverzeichnis	114
Д	nhana			118

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 - Beziehungen zwischen Building Elements und Elementen anderer Modelle	;
(Weise, et al., 2003)	16
Abbildung 2 - Hauptelemente des Structural Analysis Model und deren Relationen in	
EXPRESS-G (Weise, et al., 2003)	17
Abbildung 3 - Express-G Diagramm von IfcStructuralAnalysisModel (buildingSMART, 200	7)
	18
Abbildung 4 - Relationen zu IfcStructuralMember (buildingSMART, 2007)	20
Abbildung 5 - Express-G Diagramm von IfcStructuralAnalysisMember (buildingSMART, 2	007)
	21
Abbildung 6 - Repräsentation der Geometrie von IfcStructuralCurveMember	
(buildingSMART, 2007)	23
Abbildung 7 - Express-G Diagramm von IfcStructuralActivity (buildingSMART, 2007)	25
Abbildung 8 - Beispielhafter Spannungsverlauf bei Temperatureinwirkung (buildingSMAR	Τ,
2007)	26
Abbildung 9 - Beispiel für Zusammenwirken von IfcStructuralAction und	
IfcStructuralReaction (buildingSMART, 2007)	27
Abbildung 10 - Beispiel für eine Gruppe in IfcStructuralLoadCase ohne Lastfallkombinatio	n
(buildingSMART, 2007)	28
Abbildung 11 - Beispiel für eine Gruppe in IfcStructuralLoadCase ohne Lastfallkombinatio	n
(buildingSMART, 2007)	29
Abbildung 12 - Grober Aufbau der Eingabeoptionen in ATENA 3D (nicht alle Optionen	
enthalten)	31
Abbildung 13 - Materialtypen in ATENA 3D (Červenka, et al., 2014)	32
Abbildung 14 - Mögliche Geometrien der Makroelemente in ATENA 3D (Červenka, et al.,	
2014)	33
Abbildung 15 - Generierung eines Prismas in der Benutzerumgebung von ATENA 3D	
(Červenka, et al., 2014)	34
Abbildung 16 - Generierungssequenz einer Öffnung innerhalb eines Makroelements	
(Červenka, et al., 2014)	35
Abbildung 17 - Ausrichtung der Achsen zur Erstellung eines Shell-Makroelements (Červe	nka,
et al., 2014)	37
Abbildung 18 - Abbildung eines Shell-Makroelementes (Červenka, et al., 2014)	38

Abbildung 19 - Erstellung einer Kontaktverbindung zwischen zwei Makroelementen in	
ATENA 3D (Červenka, et al., 2014)	. 38
Abbildung 20 - Erstellung eines Bewehrungsstabes in ATENA 3D (Červenka, et al., 2014)	. 39
Abbildung 21 - Spannstahl in ATENA 3D (Červenka, et al., 2014)	. 40
Abbildung 22 - Deklarierung von mechanischen Aktivitäten in ATENA 3D (Červenka, et al.,	,
2014)	. 42
Abbildung 23 - Linien- und Flächenbelastung (Červenka, et al., 2014)	. 43
Abbildung 24 - Linien- und Flächenfeder (Červenka, et al., 2014)	. 44
Abbildung 25 - Express-G Diagramm von IfcPropertySet (buildingSMART, 2007)	. 48
Abbildung 26 - Express-G Diagramm von IfcProperty (buildingSMART, 2007)	. 49
Abbildung 27- Express-G Diagramm von IfcPropertySingleValue und	
IfcPropertyEnumeratedValue (buildingSMART, 2007)	. 50
Abbildung 28 - Eingabe eines nicht-linearen E-Modul-Verlaufs in ATENA (Červenka, et al.,	
2014)	. 53
Abbildung 29 - Linearer Spannungs-Dehnungs-Verlauf (CADFEM-wiki, 2014)	. 57
Abbildung 30 - Bilinearer Spannungs-Dehnungs-Verlauf (Červenka, et al., 2014)	. 58
Abbildung 31 - Multilinearer Spannungs-Dehnungs-Verlauf (Červenka, et al., 2014)	. 59
Abbildung 32 - Globale Vernetzung in ATENA 3D (Červenka, et al., 2014)	. 62
Abbildung 33 - Lokale Vernetzung in ATENA 3D (Červenka, et al., 2014)	. 62
Abbildung 34 - Konzept der probabilistischen Analyse (Voigt, 2012)	. 63
Abbildung 35 - Abbild von Dichtefunktionen der Normalverteilung (Thum, 2010)	. 64
Abbildung 36 - Sub-Modell (Konfiguration) eines IFC-Modell (Definition)(Hietanen, 2008)	. 66
Abbildung 37 - IDM/MVD-Methode	. 67
Abbildung 38 - Variables Konzept (Hietanen, 2008)	. 68
Abbildung 39 - Adapter Konzept (Hietanen, 2008)	. 68
Abbildung 40 - Statisches Konzept (Hietanen, 2008)	. 69
Abbildung 41 - Statisches Konzept GUID (Lehtinen, 2008)	. 70
Abbildung 42 - Relationen zwischen Konzepten (Hietanen, 2008)	. 71
Abbildung 43 - Verwendbare Werte-Typen innerhalb eines mvdXML-Constraints (Chipmar	٦,
et al., 2012)	. 75
Abbildung 44 - Verwendbare Operatoren innerhalb eines mvdXML-Constraints (Chipman,	et
al., 2012).	. 75
Abbildung 45 - Processmap	. 77
Abbildung 46 - Prozess der Modellierung des Tragwerkmodells	. 77
Abbildung 47 - Statisches Konzept GUID (Lehtinen, 2008)	. 79

Abbildung 48 - Variables Konzept Project (Lehtinen, 2008)	. 79
Abbildung 49 - Variables Konzept Site (Lehtinen, 2008)	. 80
Abbildung 50 - Variables Konzept Building (Lehtinen, 2008)	. 80
Abbildung 51 - Variables Konzept Building Storey (Lehtinen, 2008)	. 80
Abbildung 52 - Instaziierungsdiagram des Statischen Konzepts Loaded by Three Level	
Hierarchy (Lehtinen, 2008)	. 82
Abbildung 53 - Express-G Diagramm von IfcGeneralMaterialProperties (buildingSMART,	
2007)	. 85
Abbildung 54 - Express-G Diagramm von IfcMechanicalSteelProperties (buildingSMART,	
2007)	. 86
Abbildung 55 - Express-G Diagramm von IfcMechanicalConcreteProperties (buildingSMAF	₹T,
2007)	. 87
Abbildung 56 - IFC-Instanziierungsdiagramm zu Mechanical Steel Material Properties	
(Lehtinen, 2008)	. 88
Abbildung 57 - IFC-Instanziierungsdiagramm zu Mechanical Concrete Material Properties	
(Lehtinen, 2008)	. 88
Abbildung 58 - IFC-Instanziierungsdiagramm zu Extended Material Properties in IfcDoc	. 89
Abbildung 59 - IFC-Instanziierungsdiagramm zu General Material Properties in IfcDoc	. 89
Abbildung 60 - Material Layer in ATENA (Červenka, et al., 2014)	. 89
Abbildung 61 - Funktionsweise des Material Layer in IFC (buildingSMART, 2007)	. 90
Abbildung 62 - IFC-Instanziierungsdiagramm zu Material Layer in IfcDoc	. 90
Abbildung 63 - IFC-Instanziierungsdiagramm zu Aggregates Reinforcing Bar in IfcDoc	. 91
Abbildung 64 - IFC-Instanziierungsdiagramm zu Surface Connection Assignment in IfcDoc	93
Abbildung 65 - Erstellung der MVD in ifcDoc	. 94
Abbildung 66 - Entwurf der Elbebrücke Wittenberge (Mansperger, et al., 2014)	. 95
Abbildung 67 - Zu modellierender Bereich der Fahrbahnplatte (Mansperger, et al., 2014)	. 96
Abbildung 68 - Graphische Darstellung des IFC-Modell 3DModelRoadwayslab.ifc	. 97
Abbildung 69 - Validierungsfehler von Owner and Status Information	102
Abbildung 70 - Validierung von Structural Object Placement	105

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 - Spannstahleigenschaften in ATENA	. 41
Tabelle 2 - Interoperabilität zwischen ATENA und ST-4 / IFC 2x3	. 46
Tabelle 3 - Entitäten des Modells 3DModelRoadwayslab.ifc	. 98
Tabelle 4 - Entitäten des Modells VK150_Loads.ifc	. 99
Tabelle 5 - Validierte Konzepte von VK150_Loads.ifc	102

ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS

IFC Industry Foundation Classes, offener Standard zur Beschreibung von

Gebäudemodellen

MVD Model View Definition, definiert ein Sub-Modell eines IFC-Modells

XML Extensible Markup Language, Auszeichnungssprache zur Darstellung

hierarchisch strukturierter Daten

mvdXML Model View Definition Extensible Markup Language, standardisiertes

Format für MVDs

ST-4 Structural Analysis Model, Erweiterung des IFC-Schemas für Informationen

zur Tragwerksplanung

ST-7 Erweiterung des IFC-Schemas zur Einbindung dynamischer Prozesse und

FEM-Modelle

GiD Programm zur Numerischen Simulation

ifcDoc Programm zur Erstellung von MVD's im mvdXML-Format

T3D Programm zur Generierung von FEM-Netzen

AEC Architecture, Engineering and Concstruction

ER Exchange Requirements, Austauschbedingungen die innerhalb einer MVD

definiert werden

FEM Finite-Elemente-Methode

IDM Information Delivery Manual

1 EINLEITUNG

1.1 PROBLEMSTELLUNG

Das Datenmodell Industry Foundation Classes (kurz: IFC) stellt ein allgemeines

Datenschema dar, das einen Austausch von Daten zwischen verschiedenen proprietären

Software-Anwendungen ermöglicht. Dieses Datenschema umfasst Informationen aller am

Bauprojekt mitwirkenden Disziplinen über dessen gesamten Lebenszyklus (buildingSMART).

Im Gegensatz zu den Aspekten der Architektur, die bereits seit der ersten Version von IFC unterstützt werden, ist eine Erweiterung zur Tragwerksplanung erst später unter der Bezeichnung "Structural Analysis Model" (kurz: ST4) erschienen(Zarli, et al., 2008). Eine Unterstützung von entsprechender Software, wie es z.B. für Fachbereiche der Architektur und des Designs der Fall ist, befindet sich noch in der Entwicklung bzw. ist noch nicht vollends für eine praktikable Nutzung ausgereift. Dies liegt auch daran, dass ST4 nicht alle Bereiche der Tragwerksplanung abdeckt (Zarli, et al., 2008). So ist beispielsweise eine Modellierung von dynamischen Einwirkungen derzeit nicht möglich.

Softwarefirmen wie SOFiSTiK oder Dlubal GmbH entwickeln eine Unterstützung von IFC für ihre Statik-Programme. So besitzen die von SOFiSTiK erstellten Programme Teddy und SSD eine Schnittstelle für den IFC-Import. Dadurch ist es möglich eine IFC-Datei, die Komponenten von ST4 besitzt, einzulesen und in der entsprechenden Software ein Tragwerksmodell zu generieren. Die Dlubal GmbH bietet einen entsprechenden IFC-Export an, so dass ein Import von RFEM/RSTAB Daten nach SOFiSTiK möglich ist. Weiterhin gibt es einen Konverter für Daten im CIMSteel-Format der ebenfalls von SOFiSTiK verarbeitbare IFC-Dateien erzeugt (SOFiSTiK, 2008). Im Jahre 2010 wurde zusätzlich auch noch eine Exportmöglichkeit in der SOFiSTiK-Software implementiert, wodurch das Programm eine bidirektionale Schnittstelle besitzt (SOFiSTiK, 2010).

Obwohl bereits IFC-Schnittstellen für Software der Tragwerksplanung existieren, ist deren Nutzung noch nicht für eine fortgeschrittene Tragwerksanalyse praktikabel. Dies liegt vor allem daran, dass zahlreiche Parameter, wie z.B. Werte für das Scherverhalten oder Eigenschaften der Bewehrung für statische Berechnungen, noch nicht in IFC implementiert sind.

Aufgrund verbesserter Lösungsalgorithmen und leistungsstarker Desktop-Computer entstehen kürzere Lösungszeiten, die eine nichtlineare probabilistische Analyse in der

Tragwerksplanung ermöglichen (SolidWorks). Allerdings werden nichtlineare sowie probabilistische Eigenschaften noch nicht ausreichend vom IFC-Schema unterstützt.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden Ergänzungen für das IFC-Schema in Form von Property-Sets definiert, die nichtlineare und probabilistische Berechnungen ermöglichen sollen.

Mit dem Ziel Interoperabilitätsprobleme zu lösen, wird außerdem der Datenaustausch definiert, der über eine IFC-Schnittstelle verläuft. Auf der Grundlage dieser Definition lässt sich eine Model View Definiton (kurz: MVD) erstellen. Dadurch werden die Komponenten des Datenaustauschs formal dargestellt.

1.2 ZIELE

Eine Übersicht für den Datenaustausch einer IFC-Schnittstelle zu erstellen, ist das Ziel dieser Diplomarbeit. Die IFC-Schnittstelle soll dabei den Im- und Export von IFC-Modellen berücksichtigen, die von Programmen der Tragwerksplanung verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierfür die Eingabestruktur der ATENA Software analysiert. Es wird untersucht inwieweit die Erweiterung des IFC-Schemas, das sogenannte Structural Analysis Model, Informationen für eine Tragwerksanalyse mit ATENA liefern kann und ob zusätzliche Daten vonnöten sind. Das Resultat der Diplomarbeit soll eine Model View Definition als formale Beschreibung dieses Datenaustausch-Szenarios bilden. Die MVD wird im mvdXML-Format erstellt. Abschließend wird ein IFC-Beispielmodell mittels der entwickelten MVD validiert und auf Interoperabilitätsprobleme überprüft.

1.3 ERLÄUTERUNG ZUR AUFGABENSTELLUNG

Laut vorliegender Aufgabenstellung sind folgende 4 Schritte zu bewältigen:

- Vergleichen des IFC ST4 Structural Analysis Model und der ATENA Elngabe Datenstruktur
- Erstellung von PropertySets für eine nichtlineare und probabilistische Analyse des Designmodells
- 3. Erstellung einer MVD basierend auf mvdXML mit Hilfe des Programms ifcDoc
- 4. Qualitätsprüfung der erstellten MVD anhand eines IFC-Beispielmodells

Die Diplomarbeit bezieht sich auf den Stand der Version 1.0 von mvdXML, sowie IFC2x3 des IFC-Schemas. Ein IFC-Modell wird als Beispiel für eine Validierung mit der MVD genutzt. Hierfür wird ifcDoc verwendet.

1.4 GLIEDERUNG

Auf der Grundlage der Schritte, die gemäß der Aufgabenstellung behandelt werden sollen, ist die Diplomarbeit gemäß folgender Gliederung aufgebaut:

- Analyse und Erläuterung der Komponenten und Funktionsweise des Structural Analysis Model
- 2. Zusammenfassung der Eingabeoptionen und -parameter in ATENA
- 3. Gegenüberstellung von Structural Analysis Model und ATENA
- 4. Entwicklung von Property Sets zur Ergänzung des Structural Analysis Model
- 5. Erstellung einer MVD basierend auf der Structural Analysis View
- 6. Validierung eines IFC-Models mit der erstellten MVD
- 7. Erfassung von möglichen Problemen, die in der MVD auftreten bzw. Probleme die innerhalb des Datenaustausches nicht im Rahmen der Diplomarbeit behoben werden konnten.
- 8. Abschließende Zusammenfassung, sowie Ausblick auf die Durchsetzbarkeit der MVD

2 STRUCTURAL ANALYSIS MODEL

2.1 ALLGEMEINES ZU ST-4

Bei dem IFC Structural Analysis Model (kurz IFC ST-4) handelt es sich um eine Erweiterung der IFC-Struktur, die in IFC 2x Edition 2 im Mai 2003 (buildingSMART, 2015) implementiert wurde (Weise, et al., 2003). Die Fachebenen der Tragwerksplanung in den Informationsmanagement-Prozess einzubinden, ist das Hauptziel von IFC ST-4 (Weise, et al., 2003).

Es ist beabsichtigt, bereits im IFC-Modell vorhandene Gebäudedaten wiederzuverwenden und in Relation zu den Daten zu setzen, die für die statischen Berechnungen benötigt werden (Weise, et al., 2003). Außerdem sollen wichtige Entscheidungen des Tragwerksplaners in IFC ST-4 erfasst werden und für andere Fachebenen, falls nötig, sichtbar sein (http://cib.bau.tu-dresden.de/icss/structural-papers/meetings/structural_papers.html).

Das Structural Analysis Model soll folgende Funktionen erfüllen (Weise, et al., 2003):

- Definition eines Tragwerksmodells von einem Gebäude
- Definition von r\u00e4umlichen und/oder ebenen Tragwerksmodellen, die von entsprechender Statik-Software genutzt werden k\u00f6nnen.
- Spezifikation von verschiedenen Structural Analysis Sub-Modellen, die verschiedene Aspekte oder Teile des Gebäudes beschreiben und analysieren. Die Sub-Modelle können voneinander abhängig sein.
- Definition von Verknüpfungen zwischen Gebäudeelementen und Elementen des Tragwerksmodells.
- Spezifikation von mechanischen Einwirkungen und entsprechenden Lastgruppen, Lastfällen und Lastkombinationen.
- Angabe der Ergebnisse aus der Tragwerksanalyse.

Das Structural Analysis Model beinhaltet keine Informationen zu dynamischen Tragwerksanalysen, Vorspannkräften, bestimmten Stabilitätsproblemen und keine detaillierte Beschreibung von finiten Elementen, die in numerischen Analysen genutzt werden (Weise, et al., 2003).

Es wurde ein Prototyp einer Erweiterung entwickelt, die es ermöglicht Finite-Elemente-Modelle und Dynamische Analyse-Prozesse in ein IFC-Modell einzubinden. Sie besitzt das Kürzel ST-7 (Nielsen, et al., 2010).

2.2 AUFBAU VON ST-4

Das Prinzip für die Verwendung des Structural Analysis Model ist in nachfolgender Abbildung bildhaft dargestellt. Die Gebäudeelemente des Design Model (hier als Building Elements bezeichnet) bilden das Basiskonzept, das vorschreibt, wie das Gebäude aufgebaut ist. Elemente von anderen Modellen nehmen Bezug auf die Building Elements und fügen dadurch Informationen hinzu, die für den entsprechenden Fachbereich benötigt werden.

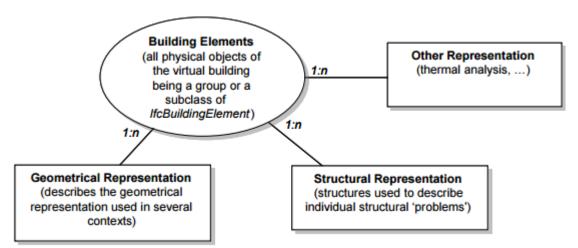


Abbildung 1 - Beziehungen zwischen Building Elements und Elementen anderer Modelle (Weise, et al., 2003)

Die Kardinalitäten der Beziehungen in Abbildung 1 repräsentieren die Verknüpfung eines individuellen Building Elements zu beliebig vielen Repräsentationen anderer Modelle.

Das Structural Analysis Model funktioniert wie ein eigenständiges Sub-Modell, das innerhalb der IFC-Datei integriert wird. Es werden dabei verschiedene Entitäten der zwei Supertypen IfcStructuralItem und IfcStructuralActivity in der Entität IfcStructuralAnalysisModel gruppiert.

Nachfolgend ist ein Schema abgebildet, das den allgemeinen Aufbau des ST-4 darstellt.

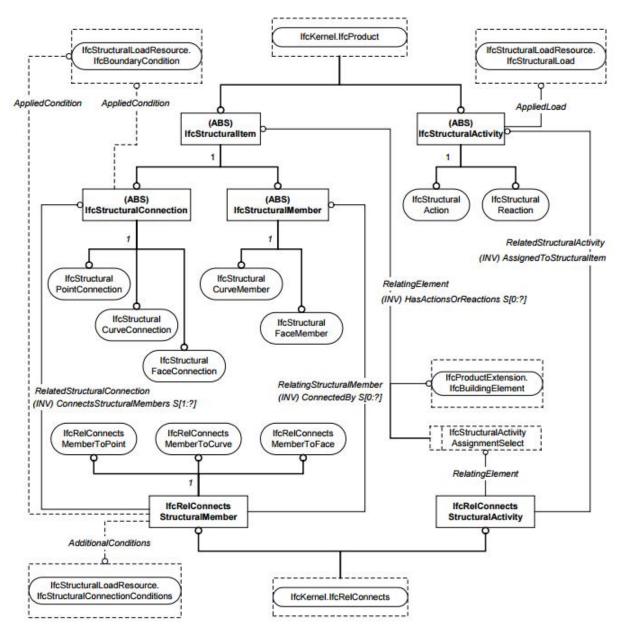


Abbildung 2 - Hauptelemente des Structural Analysis Model und deren Relationen in EXPRESS-G (Weise, et al., 2003)

2.2.1 IfcStructuralAnalysisModel

Die Entität IfcStructuralAnalysisModel wird genutzt um Informationen, die benötigt werden in einem Tragwerksmodel zu repräsentieren. Es werden allgemeine Eigenschaften, wie z.B. die Dimensionalität oder die Lage des Koordinatensystems in den Attributen der Entität deklariert. Die festgelegten Werte sind für alle Elemente innerhalb des IfcStructuralAnalysisModel gültig (buildingSMART, 2007). Nachfolgend sind die spezifischen Attribute der Klasse aufgelistet:

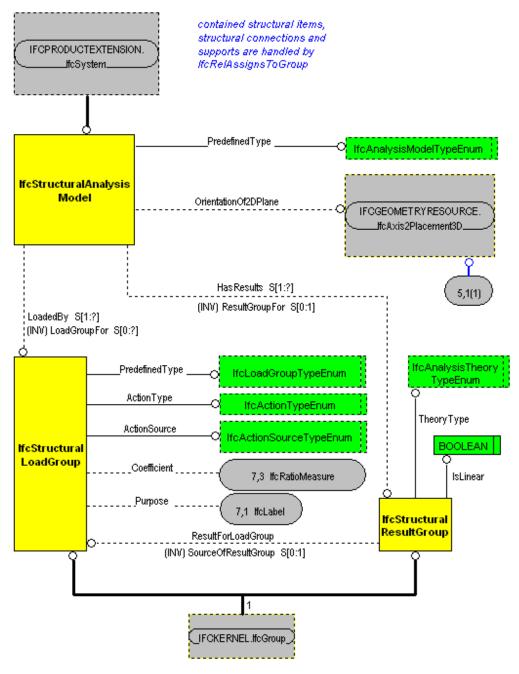


Abbildung 3 - Express-G Diagramm von IfcStructuralAnalysisModel (buildingSMART, 2007)

Die Attribute von IfcStructuralAnalysisModel besitzen folgende Funktionen:

PredefinedType: Definiert über die Entität IfcAnalysisModelTypeEnum die Dimensionalität des verwendeten Tragwerksmodells (2D- oder 3D-Modell).

OrientationOf2DPlane: Dieses Attribut kann genutzt werden um mittels
IfcAxis2Placement3D ein Koordinatensystem zu deklarieren, das sich vom
Koordinatensystem des IFC-Projektes unterscheidet. Die Belegung ist optional und im Falle
eines Nullwertes wird das System des IFC-Projektes genutzt.

LoadedBy: Beinhaltet eine Liste von Entitäten der Klasse IfcStructuralLoadGroup. Diese Entität fasst physische Einwirkungen in einer Gruppe zusammen.

HasResults: Beinhaltet eine Liste von Entitäten der Klasse IfcStructuralResultGroup. Innerhalb dieser Entität werden resultierende Kräfte aus Tragwerksberechnungen und Auflagerkräfte zusammengefasst.

Über die inverse Relation zu IfcRelServicesBuildings können mehrere Entitäten von IfcStructuralAnalysisModel einem Gebäudemodell (IfcBuilding) zugewiesen werden.

2.2.2 IfcStructuralItem

IfcStructuralItem ist die Superklasse von IfcStructuralConnection und IfcStructuralMember und umfasst hierbei alle Tragwerkselemente, sowie die Auflager und Verbindungen (z.B. Gelenke oder Einspannungen).

Alle statischen Einwirkungen auf die Entität, werden durch die inverse Beziehung AssignedStructuralActivity mittels IfcRelConnectsStructuralActivity deklariert (buildingSMART, 2007).

Die Geometrie der Instanzen von IfcStructuralItem wird über die Entität der Superklasse IfcTopologyRepresentation, einer Sub-Klasse von IfcProductRepresentation, bestimmt. Zusätzlich wird darin auch die Position deklariert.

2.2.2.1 IfcStructuralMember

Bei IfcStructuralMember handelt es sich um eine Sub-Klasse von IfcStructuralItem. Deren Instanzen repräsentieren das idealisierte Tragwerksverhalten von Bauelementen (buildingSMART, 2007).

Entitäten des Typs IfcStructuralMember können folgende Eigenschaften besitzen:

- eine Beschreibung des Materials. Dies wird über IfcStructuralMember o--IfcRelAssociatesMaterial - o IfcMaterial definiert.
- eine Beschreibung des Profils. Dies wird über IfcStructuralMember o--IfcRelAssociatesProfileProperties - -o IfcProfileProperties definiert.
- ein Structural Analysis Model, dem die Entität zugewiesen wird. Dies wird über IfcStructuralMember o- - IfcRelAssignsToGroup - -o IfcStructuralAnalysisModel definiert.

In der nachfolgenden Abbildung sind die entsprechenden Verknüpfungen nochmals dargestellt:

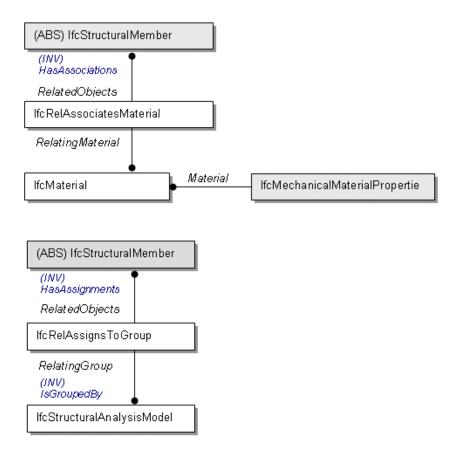


Abbildung 4 - Relationen zu IfcStructuralMember (buildingSMART, 2007)

Mit dem inversen Attribut ConnectedBy können, durch eine Liste aus Entitäten der Klasse IfcRelConnectsStructuralMember alle dazugehörigen Verbindungselemente des Bauteils aufgezählt werden. Außerdem kann das idealisierte Bauelement mit dem entsprechenden Bauteil des IFC-Gebäudemodells verknüpft werden. Dies geschieht durch das inverse Attribut ReferencesElement, das ebenfalls eine Liste von IfcRelConnectsStructuralMember beinhaltet (buildingSMART, 2007).

IfcStructuralMember stellt eine abstrakte Superklasse dar, die in einer IFC-Datei nicht angewendet wird. Stattdessen werden Instanzen von den Sub-Klassen IfcStructuralCurveMember und IfcStructuralSurfaceMember gebildet. Diese ermöglichen eine weitere Differenzierung bezüglich der Geometrie des Bauteils.

2.2.2.2 IfcStructuralSurfaceMember

IfcStructuralSurfaceMember beschreibt als Sub-Klasse von IfcStructuralMember Flächenbauteile, wie z.B. Tragwerksidealisierungen von Decken oder Wänden. Nachfolgend ist das ExpressG-Schema der dargestellt, das den Aufbau der Entität strukturiert.

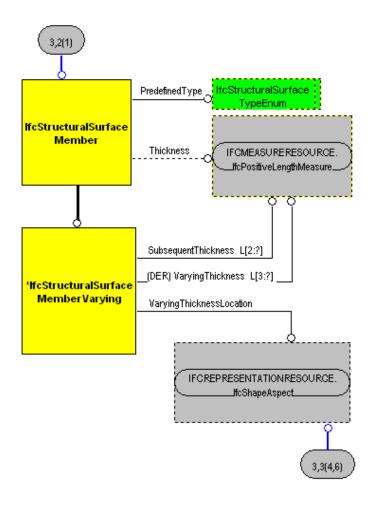


Abbildung 5 - Express-G Diagramm von IfcStructuralAnalysisMember (buildingSMART, 2007)

Die Bauteile können entweder eben oder gekrümmt sein. Ebenso wie Oberflächenverbindungen, wird die Geometrie entweder über die Entität IfcFace oder IfcFaceSurface repräsentiert. Dies geschieht über eine Verknüpfung mit dem Attribut Representation durch IfcProductRepresentation. Die Dicke des Bauteils kann durch das optionale Attribut Thickness festgelegt werden (buildingSMART, 2007).

Außerdem kann mittels der Entität IfcStructuralSurfaceTypeEnum, die durch die Eigenschaft PredefinedType verknüpft wird, das Tragverhalten bestimmt werden. Zur Auswahl stehen hierbei folgende Typen:

- **BENDING_ELEMENT** = Ein Element, das Querbelastung aufnehmen kann (z.B. Platte)
- MEMBRANE_ELEMENT = Ein Element, das Belastungen längs zur Ebene aufnehmen kann (z.B. tragende Wand)
- SHELL = Ein Element, dass sowohl Quer- als auch Längsbelastungen aufnehmen kann.
- **USERDEFINED** = Das Tragverhalten ist benutzerdefiniert
- **NOTDEFINED** = Das Tragverhalten ist nicht definiert

2.2.2.3 IfcStructuralCurveMember

Instanzen der Entität IfcStructuralCurveMember beschreiben lineare Tragwerkselemente (Stützen). Die Geometrie wird gemäß folgendem Schema festgelegt:

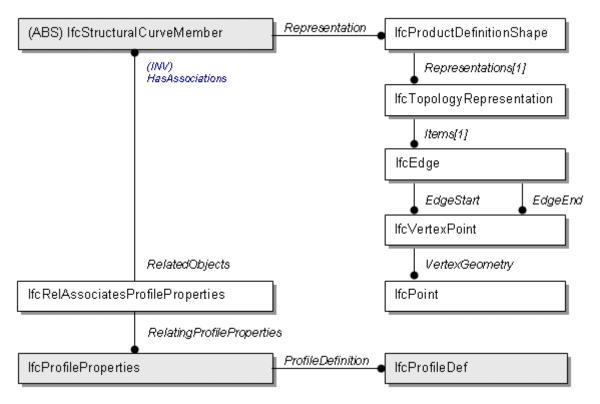


Abbildung 6 - Repräsentation der Geometrie von IfcStructuralCurveMember (buildingSMART, 2007)

Mittels des Attributs Representation werden zwei Punkte definiert, die die Mittellinie des Bauteils beschreiben. Hierbei wird für gerade Bauteile die Entität IfcEdge verwendet. Bei einer gekrümmten Mittellinie wird IfcEdgeCurve genutzt (buildingSMART, 2007).

Durch IfcRelAssociatesProfileProperties kann dem Bauteil ein Profil zugewiesen werden.

2.2.2.4 IfcStructuralConnection

Die abstrakte Entität IfcStructuralConnection ist die Superklasse von Entitäten, die Auflager oder Verbindungselemente, wie z.B. Gelenke repräsentieren. Es werden 3 Typen von Verbindungen unterstützt (buildingSMART, 2007):

- Punktverbindungen: Definiert durch IfcStructuralPointConnection
- Kurvenverbindungen: Definiert durch IfcStructuralCurveConnection
- Flächenverbindungen: Definiert durch IfcStructuralSurfaceConnection

Analog zu dem in 2.2.1.1 erwähnten Attribut ConnectedBy, können mit dem inversen Attribut ConnectsStructuralMembers alle Bauteile zu der betreffenden Instanz von IfcStructuralConnection verknüpft werden, die eine Verbindung besitzen (buildingSMART, 2007).

Das optionale Attribut AppliedCondition dient dazu mit Hilfe einer Instanz von IfcBoundaryCondition die Auflagerbedingungen zu definieren (buildingSMART, 2007).

2.2.3 IfcStructuralActivity

Sowohl einwirkende Kräfte, als auch Reaktionskräfte und Deformationen werden durch Eigenschaften der abstrakten Entität IfcStructuralActivity beschrieben. Dabei existieren die zwei Sub-Typen IfcStructuralAction und IfcStructuralReaction, um zwischen den Arten der Kräfte zu differenzieren (buildingSMART, 2007). In nachfolgender Abbildung ist der das ExpressG-Schema der Entität zu sehen, das den Aufbau inklusive der Subtypen und Attribute definiert.

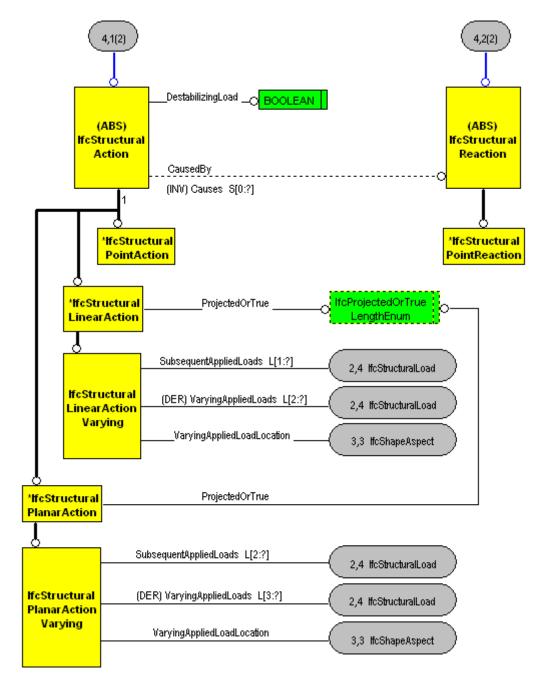


Abbildung 7 - Express-G Diagramm von IfcStructuralActivity (buildingSMART, 2007)

Eine Deklarierung der Position im Koordinatensystem ist optional und nicht nötig, wenn die mechanische Aktivität auf das gesamte Bauteil wirkt. Die Aktivität wird dem Bauelement mittels Attribut AssignedToStructuralItem durch die Instanz von IfcRelConnectsStructuralActivity zugewiesen (buildingSMART, 2007).

Die benötigten Werte der Aktivität, wie z.B. die Betragsgröße der mechanischen Einwirkungen oder Temperaturveränderung, werden über das Attribut AppliedLoad durch die Instanz von einem Subtyp der Entität IfcStructuralLoad definiert (buildingSMART, 2007).

2.2.3.1 IfcStructuralLoad

Die abstrakte Entität IfcStructuralLoad wird zur Beschreibung von allen möglichen Einwirkungen genutzt. Da es in IFC2x3 und IFC2x4 nicht möglich ist, dynamische Einwirkungen festzulegen, existiert als einziger direkter Subtyp nur IfcStructuralLoadStatic, der statische Einwirkungen beschreibt (buildingSMART, 2007). Von diesem ebenfalls abstrakten Entitätstyp, können folgende Subtypen instanziiert werden:

- IfcStructuralLoadSingleForce = definiert eine Einzelkraft und / oder ein -Moment in bis zu 3 Einwirkungsrichtungen
- IfcStructuralLoadLinearForce = definiert eine Linienkraft und / oder ein -Moment in bis zu 3 Einwirkungsrichtungen
- IfcStructuralLoadPlanarForce = definiert eine Flächenlast in bis zu 3 Einwirkungsrichtungen
- IfcStructuralLoadSingleDisplacement = definiert die Exzentrizität einer mechanischen Aktivität, die auf einen Punkt angreift, in bis zu 3 Einwirkungsrichtungen.
 - **IfcStructuralLoadTemperature** = definiert eine Temperaturdifferenz die auf einen Bereich wirkt, der von 2 Richtungen (y und z) umfasst wird [siehe nachfolgende Abbildung]

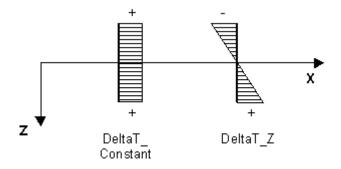


Abbildung 8 - Beispielhafter Spannungsverlauf bei Temperatureinwirkung (buildingSMART, 2007)

2.2.3.2 IfcStructuralAction und IfcStructuralReaction

IfcStructuralAction beschreibt eine mechanische Aktivität (z.B. Einzelkraft), die auf eine Instanz der Entität IfcStructuralItem (Bauteile oder Verbindungen) wirkt.

IfcStructuralReaction deklariert hingegen alle Reaktionskräfte oder Deformationen. Im nachfolgenden Bild ist die Beziehung zwischen den beiden Entitätentypen dargestellt (buildingSMART, 2007).

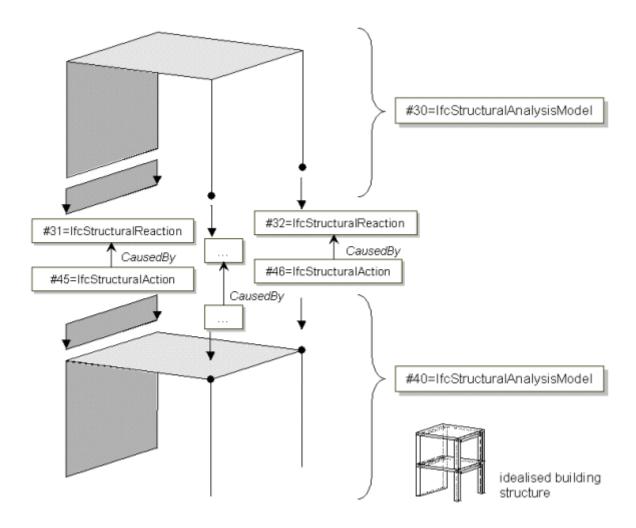


Abbildung 9 - Beispiel für Zusammenwirken von IfcStructuralAction und IfcStructuralReaction (buildingSMART, 2007)

In der Abbildung werden zwei Structural Analysis Modelle dargestellt. Die Auflagerkräfte die im oberen Modell entstehen werden als IfcStructuralReaction definiert und sind im unteren Modell einwirkende Einzelkräfte. Diese werden demzufolge als IfcStructuralAction modelliert. Die Beziehung zwischen den beiden Typen, die prinzipiell die gleiche Kraft darstellen, wird über das Attribut CausedBy hergestellt.

2.2.4 IfcStructuralLoadGroup und IfcStructuralResultGroup

Die Entität IfcStructuralLoadGroup wird dazu genutzt, die mechanischen Einwirkungen innerhalb des Structural Analysis Modells zu strukturieren (buildingSMART, 2007). Durch die Attribute, die von IfcGroup vererbt werden, können Instanzen von IfcStructuralAction (oder ihrer Sub-Klassen) und von IfcStructuralLoadGroup Gruppen definieren, die Lastfälle, Lastkoeffizienten (wie z.B. Sicherheitsfaktoren) und Lastkombinationen beinhalten. Im folgenden Beispiel ist ein zweidimensionales Structural Analysis Model abgebildet, das von verschiedenen Krafteinwirkungen des gleichen Types (Eigengewicht) und demzufolge Sicherheitsfaktors (1,35) belastet wird.

IfcLoadGroup LoadCase, f=1.35, .dead load' IfcRelAssignsToGroup

Grouping to a LoadCase

Abbildung 10 - Beispiel für eine Gruppe in IfcStructuralLoadCase ohne Lastfallkombination (buildingSMART, 2007)

IfcStructuralAction

Mit der Entität IfcRelAssignsToGroup können mechanische Aktivitäten einer Gruppe zugewiesen werden. Dies ist vor allem dann nützlich, wenn Lastkombinationen modelliert werden sollen, wie in folgender Abbildung dargestellt (buildingSMART, 2007).

Grouping to a LoadCombination

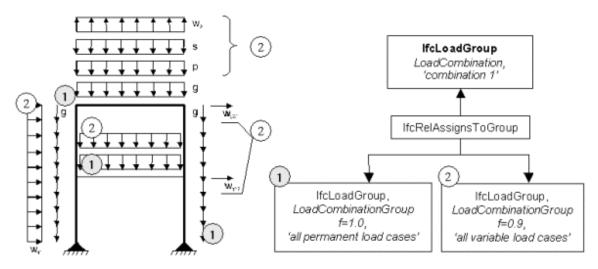


Abbildung 11 - Beispiel für eine Gruppe in IfcStructuralLoadCase ohne Lastfallkombination (buildingSMART, 2007)

Ähnlich wie IfcStructuralLoadGroup, können Entitäten vom Typ IfcStructuralReaction gruppiert werden. Dies geschieht mit der Entität IfcStructuralResultGroup.

3 ATENA EINGABE DATENSTRUKTUR

3.1 ALLGEMEINES ZU ATENA

ATENA ist ein Software-Tool, mit deren Hilfe man nichtlineare statische Berechnungen an bewehrten und unbewehrten Betontragwerken durchführen kann (Cervenka Consulting, 2015). Entwickelt wurde das Programm von dem tschechischen Software-Unternehmen Červenka Consulting. Im Rahmen der Diplomarbeit wird ATENA Version 5.1.1 verwendet.

ATENA nutzt das Tool GiD zur numerischen Simulation des Betonverhaltens. Dabei ist es auch möglich das Rissverhalten und Betonversagen, sowie das Nachgeben der Bewehrung zu simulieren.

GiD ist ein Programm, das zur numerischen Simulation in der Wissenschaft und Ingenieurwissenschaften genutzt wird. Es wurde so konzipiert, dass alle allgemeinen Funktionen vorhanden sind, die bei einer numerischen Simulation von der Vor- bis zur Nachbereitung der Daten benötigt werden. Entwickelt wurde GiD von CIMNE, dem International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE, 2015).

Das ATENA Software-Paket beinhaltet neben GiD, zwei Entwicklungsumgebungen in denen Tragwerksmodelle bearbeitet und ausgewertet werden können. Die eine ist hierbei für 2D-Modellierung entwickelt worden, während die andere zur Arbeit mit 3D-Modellen genutzt wird.

3.2 EINGABEOPTIONEN UND AUFBAU IN ATENA

ATENA ermöglicht es Betontragwerke zu modellieren und sie auf deren Tragfähigkeit zu untersuchen. In ATENA 3D kann man die Eingabebefehle mit Hilfe eines Eingabedatenbaums (engl. Input data tree) erreichen.

In ATENA gibt es dabei verschiedene Typen von Elementen, die man aus dem Eingabebaum wählen kann. Aus ihnen lassen sich Tragwerksmodelle zusammensetzen.

In nachfolgender Abbildung sind die Hauptgruppen der Elemente dargestellt, aus denen man ein Modell erstellen kann und deren Relationen zueinander.

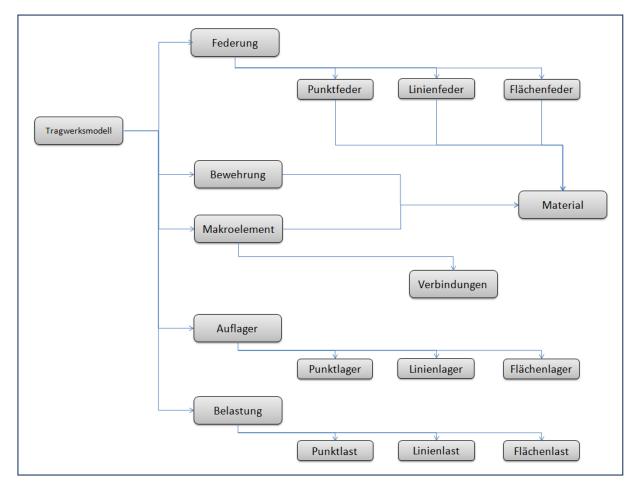


Abbildung 12 - Grober Aufbau der Eingabeoptionen in ATENA 3D (nicht alle Optionen enthalten)

3.2.1 Materialparameter

Über das Material werden einem Bauteil sowohl lineare, als auch nicht-lineare Eigenschaften zugewiesen. Auch die geometrische Nichtlinearität wird in ATENA über das Material deklariert. Ebenso wird der Lagerung ein nicht-lineares Verhalten über einen entsprechenden Materialtyp zugewiesen.

Allen Bauteilen muss in ATENA ein Materialobjekt zugewiesen werden, das vorher in einem entsprechenden Editor erstellt wird. Dabei können mehrere Bauteile die gleiche Materialzugehörigkeit besitzen. Insgesamt existieren im Programm 13 Typen, nach denen das Material klassifiziert werden kann (siehe nachfolgende Abbildung).

Material Type	Description	Material
3D Elastic isotropic	Linear elastic isotropic.	Any
1D Elastic Isotropic	Linear elastic material for 1D-	Reinforcement
	reinforcement.	
3D Non Linear Cementitious 2	Same as above but fully incremental both in	
	tension and compression. Recommended	
	model for 2D and 3D concrete.	
3D Variable Non Linear Cem.	Same as above but certain material	Concrete
	parameters can vary during analysis.	
3D Non Linear Cem. User	Same as 3D Nonlinear Cem. 2, but the user	
	can specify stress-strain relationships in	
	tension, compression, shear and tension-	concrete
	compression interaction	
Microplane4 Material	Bazant Microplane M4	Concrete
3D Drucker-Prager Plasticity	Drucker-Prager plasticity.	Soil, Rock
3D Interface	Iterface, cohesive, dry friction, gap.	Contact
Reinforcement	1D non-linear, bi-linear, multi-linear.	Steel
Cyclic Reinforcement	1D Cyclic, Menegotto-Pinto.	Steel
Bond for Reinforcement	Bond-slip relation.	Reinforcement
3D Bilinear Steel Von Mises	Von Mises plasticity.	Steel
Spring	1D linear, multi-linear,	Support

Abbildung 13 - Materialtypen in ATENA 3D (Červenka, et al., 2014)

Gängige Attribute, die in fast allen Materialtypen auftauchen sind z.B. der Elastizitätsmodul, die Poisssonzahl µ oder die Wichte.

Jeder Materialdefinition muss eine ID, ein Name sowie ein Typ zugewiesen werden um, andere Elemente mit dem Material zu verknüpfen. Nachfolgend sind als Beispiel die Parameter des Bewehrungsstahls S355 in dem Input-Format von ATENA angegeben. Die Materialwerte werden zeilenweise angegeben.

3.2.2 Makroelemente

Elemente des Typs "Macroelement" definieren die Geometrie von soliden Objekten (Červenka, et al., 2014). In ATENA 3D können diese Objekte mit Hilfe eines Generators erstellt werden. Sie weisen dabei 3 grundlegende Merkmale auf:

- 1. Die geometrische Form gehört zu einem von 4 Typen: Prisma, mehrseitige Säule, mehrseitige Pyramide oder eine der drei Formen mit Öffnungen.
- 2. Die Oberfläche des Objektes muss aus ebenen Flächen bestehen.
- 3. Öffnungen können nur innerhalb der Objekte generiert werden.

Nachfolgend sind 4 Beispiele der geometrischen Form abgebildet:

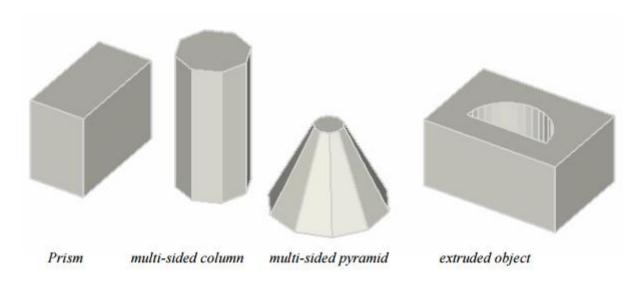


Abbildung 14 - Mögliche Geometrien der Makroelemente in ATENA 3D (Červenka, et al., 2014)

Makroelemente, vom Typ Prism werden über einen Punkt im globalen Koordinatensystem erstellt. Über diesen Punkt können 3 Vektoren in verschiedene Richtungen gelegt werden, die somit die geometrische Form des Körpers bestimmen.

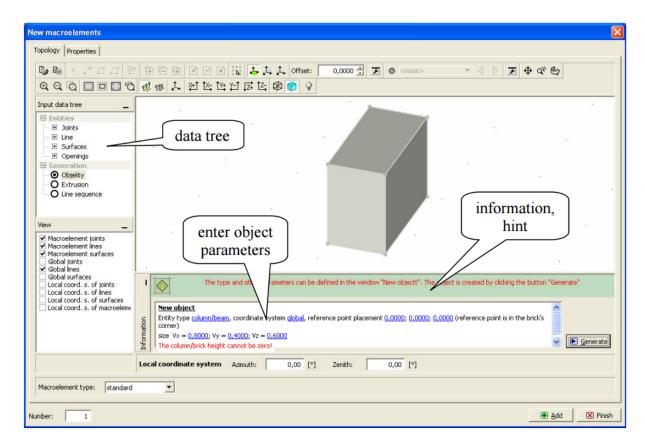


Abbildung 15 - Generierung eines Prismas in der Benutzerumgebung von ATENA 3D (Červenka, et al., 2014)

Will man eine mehrseitige Stütze modellieren, so geschieht dies ebenfalls über einen Punkt im globalen Koordinatensystem. Dieser funktioniert als Mittelpunkt, von dem aus ein Radius gezogen wird und die Stützenhöhe, sowie Anzahl der Seiten angegeben wird.

Mehrseitige Pyramiden werden auf ähnliche Weise erstellt. Hierbei wird zusätzlich ein zweiter Radius angegeben.

Offnungen können aus einer Anzahl vorgefertigter Typen gewählt und auf die entsprechende Oberfläche modelliert werden.

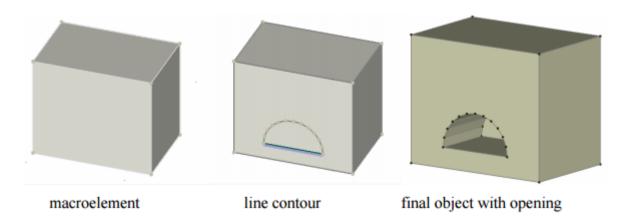


Abbildung 16 - Generierungssequenz einer Öffnung innerhalb eines Makroelements (Červenka, et al., 2014)

Makroelementen kann außerdem ein Wert für den Bewehrungsgrad zugewiesen werden, der sich aus folgender Formel berechnen lässt: $p = (A_s / A_c) / 100$.

Dabei steht As für die Bewehrungsfläche und Ac für die Querschnittsfläche des Beton. Der Bewehrungsgrad wird in % angegeben.

Für die numerische Analyse werden die generierten Makroelemente in Objekte aus finiten Elementen umgewandelt und im ATENA Input Format gespeichert. ATENA nutzt dafür den T3D-Mesh-Generator. In nachfolgendem Code, ist beispielhaft die Struktur der finiten Elemente im Input Format angezeigt, die ein Makroelement definieren. Es wird hierbei eine Oberfläche aus 4 finiten Elementen erstellt.

```
// Geometry definition
GEOMETRY ID 1303 NAME "SCM.1303" TYPE "3D"
// Element type definition
ELEMENT TYPE ID 1 NAME "Tetra elements" TYPE "CCIsoTetra<xxxx>"
ELEMENT TYPE ID 2 NAME "Pyram. elements" TYPE "CCIsoBrick<xxxxxxxxx"
ELEMENT TYPE ID 3 NAME "Wedge elements" TYPE "CCIsoWedge<xxxxxx>"
ELEMENT TYPE ID 4 NAME "Hexa, i.e. brick
elements" TYPE "CCIsoBrick<xxxxxxxxx" // // Element group definition
ELEMENT GROUP ID 130301 TYPE 1 MATERIAL 45 GEOMETRY 1303
ELEMENT GROUP ID 130302 TYPE 2 MATERIAL 45 GEOMETRY 1303
ELEMENT GROUP ID 130303 TYPE 3 MATERIAL 45 GEOMETRY 1303
ELEMENT GROUP ID 130304 TYPE 4 MATERIAL 45 GEOMETRY 1303
T3D EXPAND SELECTIONS PROP GENERATION AUTOMATIC
T3D GENERATE "-u 0.200 -k 1"
vertex 130301 xyz -0.10000 0.00000 -0.51000
vertex 130302 xyz -0.10000 0.00000 -0.49000
vertex 130303 xyz 0.10000 0.00000 -0.49000
vertex 130304 xyz 0.10000 0.00000 -0.51000
curve 130301 order 2 vertex 130301 130302
curve 130302 order 2 vertex 130302 130303
curve 130303 order 2 vertex 130303 130304
curve 130304 order 2 vertex 130304 130301
surface 130301 order 2 2 curve 130301 130302 130303 130304
```

Das geometrische Objekt wird im Code mit GEOMETRY deklariert, die finiten Elemente mit ELEMENT. Den finiten Elementen werden Typen bezüglich ihrer Form zugewiesen (z.B. Tetraeder oder Hexaeder) und sie werden mit dem geometrischen Objekt verknüpft. Anschließend wird die Topologie der finiten Elemente in der Syntax des T3D-Mesh-Generators deklariert.

Zuerst wird die Position jedes Elementpunktes über den Befehl vertex in Koordinaten angegeben. Daraufhin werden die Punkte über curve miteinander verknüpft und als Oberfläche mittels surface gruppiert.

3.2.2.1 Shell als Spezialfall von Macroelements

ATENA bietet zusätzlich noch die Möglichkeit, Platten zu modellieren. Diese werden Shell genannt. Hierbei zeigt sich die Dicke des 3D-Objektes um ein Vielfaches geringer, als die Länge und Breite. Bei den Platten wird angenommen, dass der Querschnitt bei einer Deformation eben sei. Dadurch bleibt die Dehnungsverteilung über die Dicke linear. Platten werden in ATENA von einem Subtypen der Ahmad finiten Elemente erstellt. Diese Elemente sind auf ein quadratisches 3D-Block-Element mit 20 Knoten reduziert. Das Element besitzt 9 Integrationspunkte in der Plattenebene und verschiedene Schichten in Normalrichtung zur Ebene. Dadurch ergibt sich eine Gesamtzahl von Integrationspunkten die 9x der Schichten beträgt (Červenka, et al., 2014).

Die Z-Achse muss senkrecht zur Plattenoberfläche sein. Die anderen zwei Achsen, X und Y, befinden sich innerhalb der Plattenebene. Diese Bedingungen müssen vom Benutzer gewährleistet werden (Červenka, et al., 2014).

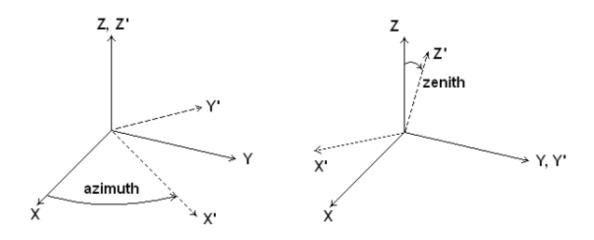


Abbildung 17 - Ausrichtung der Achsen zur Erstellung eines Shell-Makroelements (Červenka, et al., 2014)

In jedem Plattenknoten existieren 3 Verformungsfreiheitsgrade und korrespondierende Knotenkräfte. Das Plattenelement besitzt keine Momente oder Rotationen als globale Variablen (Červenka, et al., 2014).

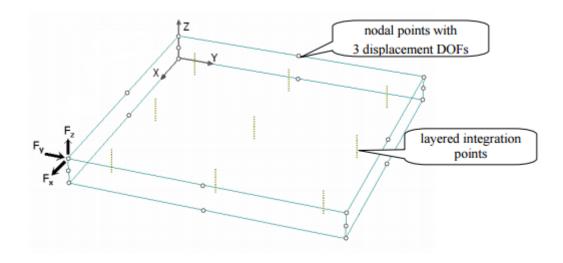


Abbildung 18 - Abbildung eines Shell-Makroelementes (Červenka, et al., 2014)

3.2.2.2 Contacts als Element zur Verbindung von Macroelements

Wenn eine Interaktion bzw. eine Übertragung von Kräften zwischen Macroelements ermöglicht werden soll, müssen Kontaktelemente erstellt werden, die eine Verbindung definieren. Dies geschieht in ATENA 3D über Contacts.

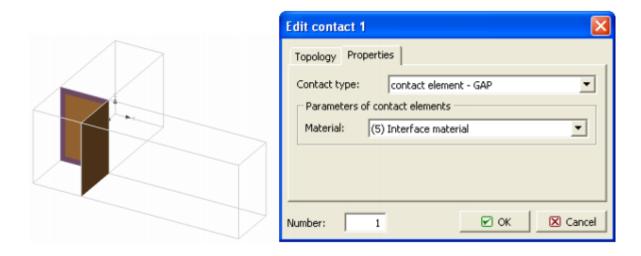


Abbildung 19 - Erstellung einer Kontaktverbindung zwischen zwei Makroelementen in ATENA 3D (Červenka, et al., 2014)

Für die Tragwerksanalyse ist insbesondere der Kontakttyp GAP relevant, da hiermit der Kontaktebene zwischen 2 Makroelementen individuelle Materialeigenschaften zugewiesen werden.

3.2.3 Bewehrung

Neben der Angabe eines Bewehrungsgrades als Attribut für ein Makroelement, ist es auch möglich Bewehrungseisen separat als 3D-Objekt im Modell zu erstellen. Der Bewehrungsstahl ist dabei die Verbindung einzelner Punkte in einem geometrischen System. Der Durchmesser wird dabei zusätzlich bei der Erstellung der Verbindung eingegeben.

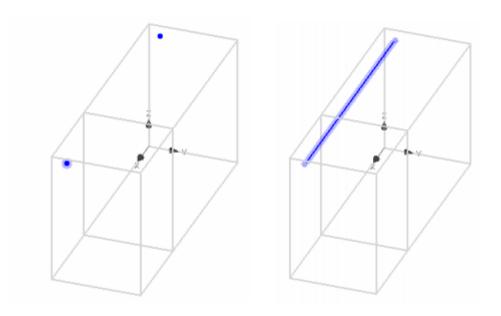


Abbildung 20 - Erstellung eines Bewehrungsstabes in ATENA 3D (Červenka, et al., 2014)

Die Materialparameter, wie z.B. E-Modul oder Festigkeit sind aus dem verknüpften Material zu entnehmen.

Im ATENA Input-Format werden Bewehrungsstäbe und -matten über eine Verbindung von sogenannten Nodes deklariert. Nodes sind hierbei Punkte, die über den Befehl vertex erstellt werden und unabhängig von Finiten Elementen agieren.

Der nachfolgende Code gibt ein Beispiel für die Deklarierung eines Bewehrungsstabes über Nodes.

```
MACRO_ELEMENT 1001 GENERATE TYPE "CCDiscreteReinforcementME"

THROUGH NODES 100 101 NAME "Bottom reinforcement" MINIMUM 0.

GROUP 2 EMBEDDED AT 1

ELEMPROP "Bar_1"

NODEPROP "N1" ID 1

NODEPROP "N2" ID 2
```

3.2.3.1 External Cable zur Modellierung von Spannstahl

Spannstahl wird in ATENA 3D durch Objekte vom Typ External Cable modelliert. Der Verlauf des Stahls kann in einem entsprechenden Editor erstellt werden (siehe Abbildung).

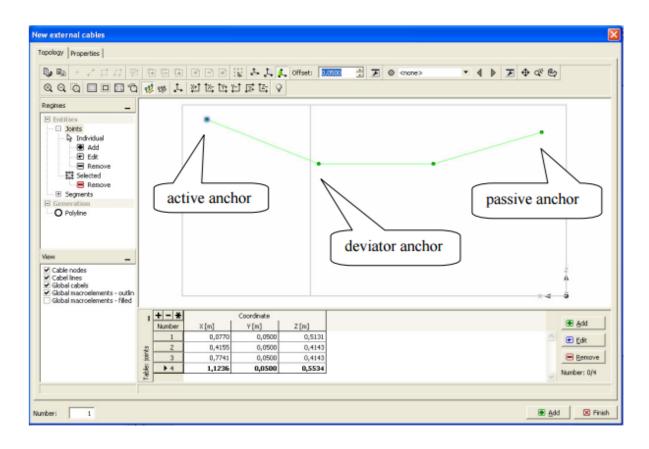


Abbildung 21 - Spannstahl in ATENA 3D (Červenka, et al., 2014)

Parameter wie Durchmesser oder Kohäsion können ebenfalls in den Eigenschaften festgelegt werden. Die möglichen Werte, die hierfür angegeben werden können, sind in nachfolgender Tabelle angegeben.

Eigenschaft	Mögliche Werte	Einheit
Material	Materialtyp (Reinforcement, Cyclic Reinforcement, 3D Bilinear Steel von Mises)	-
Area	REAL-Wert	m²
Active anchor	At the beginning, at the end	-
Friction coefficient	REAL-Wert	-
Coehsion	REAL-Wert	MN/n
Radius	REAL-Wert	m

Tabelle 1 - Spannstahleigenschaften in ATENA

3.2.4 Auflager und Belastungen

Auflager und sämtliche mögliche Belastungen werden in ATENA 3D durch Objekte des Typs Loading beschrieben. Dabei kann aus einem Katalog von 6 verschiedenen Belastungsarten, sowie Auflagern ausgewählt werden:

- 1. Eigengewicht
- 2. Kräfte
- 3. Auflager
- 4. Deformationen
- 5. Temperatureinwirkung
- 6. Einwirkungen durch Schrumpfen
- 7. Vorspannung

Auflager wirken dabei als Gegenkräfte zu den vorherrschenden anderen Einwirkungen.

Vorspannungen werden verwendet um das Verhalten von Spannstahl beschreiben zu können.

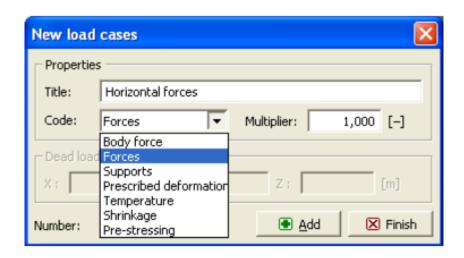


Abbildung 22 - Deklarierung von mechanischen Aktivitäten in ATENA 3D (Červenka, et al., 2014)

In dem dargestellten Load Case Fenster wird die Belastungsart ausgewählt, sowie ein zugehöriger Lastfaktor.

Es kann für die Belastungsart aus bis zu 3 Dimensionen gewählt werden, in denen die mechanische Aktivität auf ein Bauelement einwirkt. Diese wären:

- 1. Punktuelle Einwirkung
- 2. Linieneinwirkung
- 3. Flächeneinwirkung

In dem ATENA 3D Editor können die Einwirkungen auf das Bauelement ausgerichtet werden (siehe Abbildung).

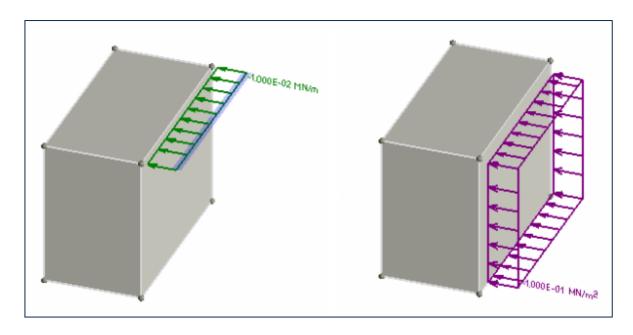


Abbildung 23 - Linien- und Flächenbelastung (Červenka, et al., 2014)

Belastungen werden im ATENA Input Format gemäß folgendem Beispiel deklariert:

```
// Load definitions

MACRO_JOINT COORDINATES

4001 0.00000 0.00000 0.15000

4002 3.20000 0.00000 0.15000

4003 3.20000 3.60000 0.15000

4004 0.00000 3.60000 0.15000

SELECTION "ALOAD_4021_IDS" LIST 4001 4002 4003 4004

SELECTION_REAL "ALOAD_4021_LOADS" LIST -0.00375 -0.00375 -0.00375

LOAD CASE ID 21 NAME "Load Group 5121"

LOAD BODY

GROUP 205101 TO 205104 MNODE_IDS "ALOAD_4021_IDS" MNODE_LOADS "ALOAD_4021_L
OADS" MNODE_DOFS_MASK 4 MNODE_MAX_DISTANCE 0.001 MNODE_DIM1 18 MNODE_DIM2 1
6 MNODE_DIM3 1
```

In dem Beispiel-Code wird eine Flächenlast definiert, die über 4 Punkte im dreidimensionalen Raum generiert wird. Die Koordinaten werden über den Befehl MACRO_JOINT COORDINATES festgelegt. Die Belastungsgröße wird über SELECTION definiert. Dies geschieht über eine Liste, bei der jedem der 4 Punkte ein Lastwert zugewiesen wird.

3.2.5 Federung

In ATENA 3D ist es möglich Federn als an ein Bauteil zu setzen. Diese werden als Bauelemente angesehen und können unter der Rubrik "Topology" erstellt werden. Es sind 3 Arten von Federn möglich, wie folgt:

1. Punktuelle Feder

2. Linienfeder

3. Flächenfeder

Als Materialtyp ist "Spring" vorgesehen, der den Anwender die Steifigkeit der Feder definieren lässt.

Nachfolgend sind beispielhaft eine Linienfeder, sowie eine Flächenfeder in ATENA 3D grafisch dargestellt:

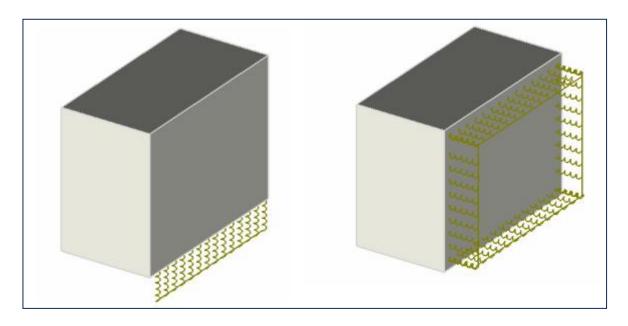


Abbildung 24 - Linien- und Flächenfeder (Červenka, et al., 2014)

4 OPTIMIERUNG VON IFC FÜR EINE NICHT-LINEARE PROBABILISTISCHE ANALYSE

Durch leistungsstärkere Rechner und verbesserte Lösungsalgorithmen ist ein Wandel im Bereich der Tragwerksberechnung von der linearen zur nicht-linearen probabilistischen Analyse eingetreten. Programme, wie ATENA, SOFiSTiK oder mb AEC unterstützen nichtlineare Modelleigenschaften. Um daher eine Verwendung von IFC in der Tragwerksplanung praktikabel zu gestalten, müssen Informationen für eine nicht-lineare probabilistische Analyse in einem IFC-Modell vorhanden sein. Ohne eine Definition neuer Entitätstypen ist eine entsprechende Erweiterung mit Property-Sets möglich. In diesem Abschnitt wird zunächst die Interoperabilität zwischen ST-4 und dem nichtlinearen Analyse-Programm ATENA überprüft. Darauf aufbauend werden Property-Sets erläutert, die eine Definition von nicht-linearen, sowie probabilistischen Eigenschaften ermöglichen.

4.1 INTEROPERABILITÄT ZWISCHEN ST-4/IFC 2X3 UND ATENA

Für einen Austausch von Daten zwischen IFC-Modellen und Programmen der Tragwerksanalyse muss zuerst überprüft werden, inwieweit eine Interoperabilität gewährleistet ist. Das IFC-Modell muss ausreichend Eingabewerte für eine Nutzung durch die Software liefern. Es sollten nach dem Datenimport im Programm eine minimale Anzahl von Werten manuell außerhalb von IFC eingegeben werden, um den Austausch praktikabel zu gestalten. Auch der Datenexport muss beachtet werden, da die Ergebnisse häufig von anderen Fachebenen ausgewertet werden müssen.

In der nachfolgenden Tabelle sind alle relevanten Eingabeoptionen der Tragwerks-Software ATENA angegeben. Es wurden Möglichkeiten untersucht, die benötigten Informationen in ein IFC-Modell einzubinden. Dabei wird zwischen Parametern unterschieden, die in IFC 2x3 und ST4 deklariert werden.

ATENA	Structural Analysis Model	IFC 2x3
Geometrie von Bauelementen	Vorhanden	Vorhanden
Materialeigenschaften	Nicht vorhanden	Teilweise vorhanden
Material Layer	Nicht vorhanden	Vorhanden (aber ursprünglich nicht für Tragwerksanalyse vorgesehen)
Stabbewehrung	Nicht vorhanden	Vorhanden
Mattenbewehrung	Nicht vorhanden	Vorhanden
Spannstahl-Bewehrung	Nicht vorhanden	Vorhanden
Bewehrungsparameter	Nicht vorhanden	Teilweise vorhanden
Eigengewicht	Vorhanden	Nicht vorhanden
Krafteinwirkungen	Vorhanden	Nicht vorhanden
Auflager	Vorhanden	Elemente nicht als Auflager deklariert
Deformationen	Vorhanden	Nicht vorhanden
Einwirkung durch Schrumpfen	Nicht explizit als Schrumpfeinwirkung deklariert	Nicht vorhanden
Temperatureinwirkung	Vorhanden	Nicht vorhanden
Vorspannkraft	Nicht vorhanden	Vorhanden
Federlager	Vorhanden	Nicht vorhanden
Dynamische Krafteinwirkung	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden
FEM-Vernetzung	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden

Tabelle 2 - Interoperabilität zwischen ATENA und ST-4 / IFC 2x3

Existieren bestimmte Informationstypen weder in ST-4 noch in IFC, müssen die entsprechenden Daten entweder manuell im Tragwerks-Programm eingegeben oder durch eine Erweiterung des IFC-Schemas in das IFC-Modell implementiert werden.

Die Geometrie der Bauelemente ist sowohl in ST-4, als auch in IFC definierbar. Sie kann komplexer erfolgen, als in ATENA, da sich die Geometrie nicht nur auf die Angabe von Punkten und Linien beschränkt, sondern auch Profile deklariert werden können. Während des Datenaustausch-Prozesses sollte ein Drittprogramm zum Einsatz kommen, das die geometrischen Informationen aus dem IFC-Modell für die Verwendung innerhalb von ATENA aufbereitet.

Zur Beschreibung von Materialeigenschaften verweisen Entitäten des Typs IfcStructuralMember auf IfcMaterial. IfcMaterial kann mit Entitäten verknüpft werden, die das mechanische Materialverhalten definieren, wie z.B. IfcMechanicalMaterialProperties oder IfcGeneralMaterialProperties. Es existieren allerdings zahlreiche Parameter, die in den Materialklassen von IFC noch keine Berücksichtigung finden, aber in ATENA zur Anwendung kommen (z.B. die Zug- oder Scherfestigkeit von Beton).

Bewehrungselemente sind in ST-4 nicht implementiert und eine Interaktion zwischen der Bewehrung und der Tragwerksstruktur nicht vorgesehen. Dennoch können in IFC 2x3 verschiedene Bewehrungsarten modelliert werden. Die Parameter, die den Elementen zugewiesen werden können, sind allerdings hauptsächlich für eine Verwendung im Bereich der Bauausführung und -planung konzipiert. Dementsprechend können weniger Arten von Werten eingegeben werden, als es in ATENA möglich ist.

Mechanische Einwirkungen können in ST-4 über die Entität IfcStructuralAction definiert werden. Anders als bei ATENA werden Auflager nicht als Auflagerkraft modelliert, sondern als Feder mit Steifigkeitswerten. Die Vorspannkraft von Spannstahl wird in ST-4 nicht definiert, sondern in IFC 2x3 über das Attribut PreStress von IfcTendon. Dynamische Krafteinwirkungen oder die Deklarierung von FEM-Netzen sind in IFC nicht implementiert.

4.2 ERWEITERUNG DES IFC-SCHEMAS

Um Interoperabilitätsprobleme zu beheben, die bei einem Datenaustausch zwischen IFC und ATENA auftreten können, kann das IFC-Schema erweitert werden. Mittels benutzerdefinierter Property-Sets können Attribute hinzugefügt werden, ohne dabei neue Entitätstypen in IFC einzufügen.

4.2.1 Allgemeines zu Property Sets

Ein Property Set wird zur Definition von dynamisch erweiterbaren Attributen genutzt. Es handelt sich dabei um eine Container-Klasse, die die Attribute innerhalb eines Schemas beinhaltet. Die Interpretation der Attribute erfolgt gemäß ihrer Bezeichnung (buildingSMART, 2007).

Der Aufbau eines Property Sets ist durch folgende Attribute bestimmt:

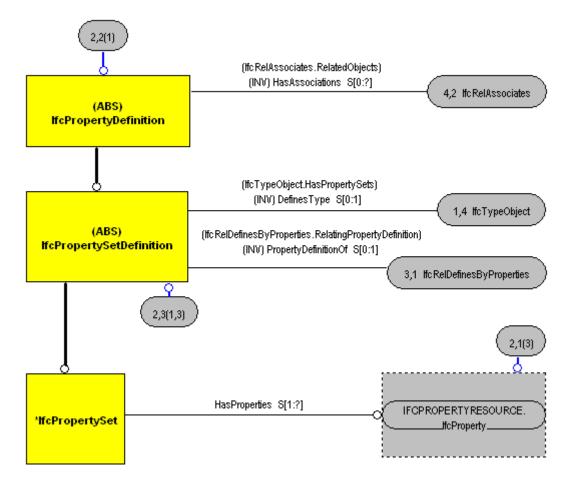


Abbildung 25 - Express-G Diagramm von IfcPropertySet (buildingSMART, 2007)

Über das Attribut *HasAssociations* wird mittels der Entität *IfcRelAssociates* das Property Set einer Anzahl von anderen Entitäten zugewiesen.

Das Attribut HasProperties besteht aus einer Liste von mehreren Entitäten des Typs IfcProperty, die dem Property Set zugewiesen werden.

IfcProperty ist hierbei nur eine abstrakte Generalisierung der Property-Typen (buildingSMART, 2007). Die Subklassen von IfcProperty sind IfcComplexProperty und IfcSimpleProperty. In nachfolgender Abbildung sind die Eigenschaften von IfcProperty, sowie deren Subtypen aufgezählt.

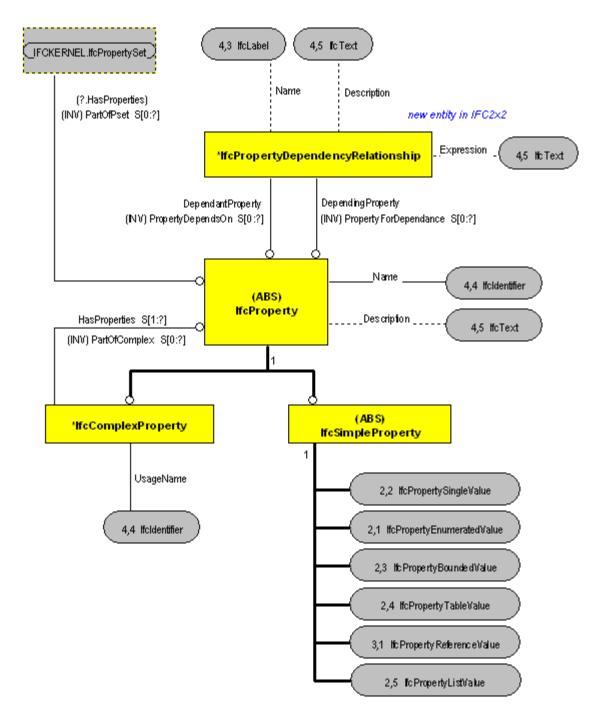


Abbildung 26 - Express-G Diagramm von IfcProperty (buildingSMART, 2007)

IfcComplexProperty wird genutzt um Listen und Tabellen aus mehreren Properties in einer Property zusammenzufassen. Es funktioniert hierbei ähnlich wie ein Property-Set, kann jedoch auch als Property verwendet werden.

IfcSimpleProperty ist der Supertyp von verschiedenen Property-Klassen, die instanziiert werden können. Für die Erweiterung im Rahmen der Diplomarbeit werden nur 2 Subtypen von IfcSimpleProperty benötigt. Zum einen IfcPropertySingleValue, wodurch Attribute mit einem einzelnen numerischen oder deskriptiven Wert definiert werden. Zum anderen IfcEnumeratedValue. Durch IfcEnumeratedValue ist es möglich eine Liste zu erstellen, aus denen ein Wert dem Attribut zugewiesen werden kann. Die Attribute, die diese Funktionsweise deklarieren sind in nachfolgender Abbildung dargestellt:

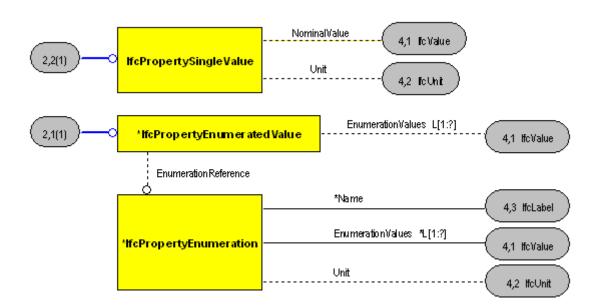


Abbildung 27- Express-G Diagramm von IfcPropertySingleValue und IfcPropertyEnumeratedValue (buildingSMART, 2007)

4.2.2 Lineare und nicht-lineare Materialeigenschaften

Innerhalb der 12 Materialtypen, die man in ATENA verwenden kann, existieren Parameter, die in IFC nicht definiert sind. Einige von ihnen beschreiben ein nicht-lineares Materialverhalten. Für eine Erweiterung des IFC-Schemas werden somit die Materialtypen untersucht und fehlende Attribute mittels Property-Sets ergänzt.

4.2.2.1 3D Elastic Isotropic

Dieser Materialtyp wird für alle Stoffe genutzt, die ein elastisch isotropes Verhalten aufweisen.

Folgende Eigenschaften werden für das Material festgelegt:

- Elastizitätsmodul
- Poissonzahl
- Wichte
- Wärmeausdehnungskoeffizient

Im Massivbau kann diese Klasse für alle Arten von Baustoffen verwendet werden und bildet somit den Basistyp, auf dem die anderen Materialien aufbauen. Die Wichte kann in der Entität IfcGeneralMaterialProperties durch das Attribut MolecularWeight festgelegt werden. Die anderen 3 Eigenschaften sind in der Entität IfcMechanicalMaterialProperties definiert. Da alle Attribute bereits im IFC-Schema vorhanden sind, ist es nicht nötig für diesen Materialtyp ein Property-Set anzulegen.

4.2.2.2 3D Nonlinear Cementitious 2

Das Material weist ebenfalls ein elastisch isotropes Verhalten auf, allerdings können hierbei zusätzlich noch wichtige Betoneigenschaften hinsichtlich des Zug- und Druckspannungsverhaltens deklariert werden. Folgende Eigenschaften werden hierbei festgelegt:

- Elastizitätsmodul
- Poissonzahl
- Wichte
- Wärmeausdehnungskoeffizient
- Druckfestigkeit (kubisch)
- Druckfestigkeit (zylindrisch)
- Zugfestigkeit
- Faktor zur Berücksichtigung von Oberflächenanomalien
- Faktor zur Berücksichtigung der plastischen Fließrichtung
- Bruchenergie
- Rissabstand
- berücksichtigte Zugversteifung zwischen den Rissen
- Entlastungsfaktor, der bei der Rissentstehung auftritt
- Rissmodel-Koeffizient
- kritische Stauchung des Materials bei Druck
- maximale plastische Verformung
- auftretende Reduzierung der Druckfestigkeit durch Risse
- Steifigkeitsfaktor, der beim Rissscheren berücksichtigt wird
- Aggregatgröße

4.2.2.3 3D Variable Nonlinear Cementitious 2

Dieser Materialtyp ist bis auf bestimmte Aspekte, identisch mit der in 6.2.1.2 beschriebenen Klasse 3D Nonlinear Cementitious 2. Insgesamt 4 Attribute besitzen dabei allerdings die Eigenschaft, ihre Werte bei unterschiedlichen Belastungsschritten, während der Tragwerksanalyse zu variieren. Die veränderlichen Attribute sind:

- Elastizitätsmodul
- Zugfestigkeit
- Druckfestigkeit
- Bruchenergie G_F

Gemäß nachfolgender Abbildung kann ein Verlauf erstellt werden, nachdem sich die Attributswerte mit jedem Belastungsschritt verändern.

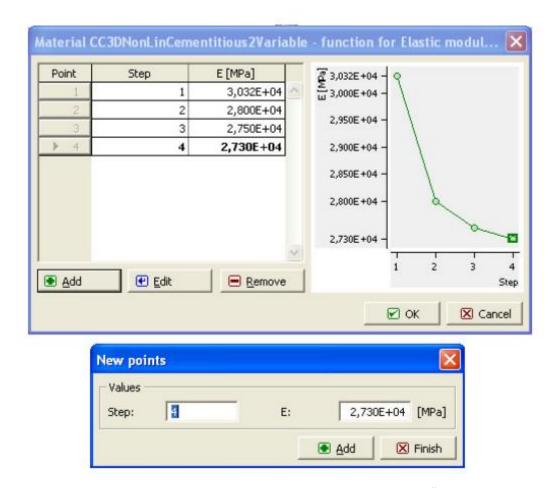


Abbildung 28 - Eingabe eines nicht-linearen E-Modul-Verlaufs in ATENA (Červenka, et al., 2014)

Die Belastungsschritte können vor der Tragwerksanalyse innerhalb der Rubrik "Analysis Steps" bearbeitet werden, so dass es z.B. möglich ist eine Veränderung des E-Moduls innerhalb einer bestimmten Belastungsdauer zu simulieren.

4.2.2.4 3D Nonlinear Cementitious 2 User

Der Materialtyp 3D Nonlinear Cementitious 2 User ermöglicht es benutzerdefinierte Materialgesetze zu erstellen, wie beispielsweise Spannungsdiagramme oder Bruchverhalten (Červenka, et al., 2014).

Folgende Werte können ausschließlich in 3D Nonlinear Cementitious 2 User eingegeben werden:

Materialverhalten bei Zug:

- Spannungs-Dehnungs-Kurve
- Charakteristische Größe
- zulässige Bruchdehnung

Materialverhalten bei Druck:

- Spannungs-Stauchungs-Kurve
- Charakteristische Größe
- zulässige plastische Verformung
- Festigkeitsverminderung infolge von Rissentstehung (als Diagramm)

Materialverhalten bei Scheren:

- Scheren-Verformungs-Kurve
- zulässige Bruchdehnung $\epsilon_{f,loc}$
- Festigkeitsverminderung infolge Rissentstehung (als Diagramm)

Zug-Druck-Relation

• Zug-Druck-Kurve

4.2.2.5 Microplane

Dieser Materialtyp orientiert sich an dem Microplane-Modell für Beton¹. Die Grundidee ist hierbei, die Modelle, die Tensoren und deren Invarianten nutzen, zu verwerfen (Červenka, et al., 2014). Dementsprechend stellen Vektoren eine Beziehung zwischen Zug- und Druckspannungen auf einer Ebene in beliebiger Orientierung in der Mikrostruktur des Materials her (Bazant, et al., 2000). Diese Ebene wird "Microplane" genannt.

¹ http://cee.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers%20-%20Backup%202_20_2013/393.pdf

Der Materialtyp besitzt die 4 dimensionslose Parameter k1, k2, k3, k4 und k5, die zur Beschreibung des Microplane-Modells vonnöten sind. Außerdem muss angegeben werden, wie viele Mikroebenen das Prisma, das das Material im dreidimensionalen Raum beschreibt, besitzen soll. Hinzu kommen noch 20 optionale Parameter C1 - C20, die für eine erweiterte Modellmodifikation genutzt werden können, sowie die Bestimmung des Microplane-Typs M4 bzw. M7. Demzufolge können folgende Eigenschaften deklariert werden:

- Druckfestigkeit
- Elastizitätsmodul
- Poissonzahl
- Materialwichte
- Wärmeausdehnungskoeffizient
- Mikroebenen-Parameter k1, k2, k3, k4 und k5
- Größe der Rissbreite
- Anzahl der Mikroebenen (21, 28, 37 oder 61)
- Microplane-Typ (M4 oder M7)
- Erweiterte Parameter C1 C20 (optional)

Für das Microplane-Modell wird ein Property-Set erstellt, das alle Parameter enthält, die nicht anderweitig im IFC-Schema deklariert werden können:

4.2.2.6 3D Drucker Prager Plasticity

Materialien dieses Typs werden anhand des Fließkriteriums nach Drucker-Prager simuliert. Es handelt sich hierbei um ein druckabhängiges Modell, um nachzuprüfen ob ein Materialversagen oder eine plastische Verformung stattgefunden hat. Dieses Modell eignet sich für die Verwendung von Polymeren, Böden oder granularen Stoffen.

Neben den gleichen Attributen, die auch der Typ 3D Elastic Isotropic 2 besitzt, werden zusätzlich 2 modellrelevante Parameter für eine Spannungsfunktion benötigt. Die Parameter α und k definieren die Form der versagenden Oberfläche. Sie können gemäß des Verfahrens nach Mohr-Coulomb ermittelt werden (Červenka, et al., 2014). Außerdem benötigt man als Bodenkennwerte den Reibungswinkel φ und die Kohäsion C. Ebenso ist es möglich, die maximale Stauchung durch Druck festzulegen.

Demzufolge wären die bedienbaren Attribute folgende:

- Elastizitätsmodul
- PoissonzahlKritische Stauchung des Materials bei Druck
- Wichte des Materials
- Wärmeausdehnungskoeffizient
- Faktor zur Berücksichtigung der plastischen Fließrichtung
- Drucker-Prager Fließkriterium-Parameter
- Drucker-Fließkriterium-Parameter
- Reibungswinkel
- Kohäsion

Anhand der Attribute, die nicht im IFC-Schema deklarierbar sind, wird ein Property-Set für den Materialtyp erstellt.

4.2.2.7 3D Interface

Der Materialtyp 3D Interface wird dazu genutzt, um das mechanische Verhalten eines verbindenden Bauteils bzw. Gelenks zu simulieren. Die Materialeigenschaften basieren auf dem Mohr-Coulomb-Kriterium ohne Beachtung der Zugspannung (Červenka, et al., 2014).

Folgende Parameter werden in dem Materialtyp 3D Interface verwendet:

- Normale Steifigkeit
- Tangentiale Steifigkeit
- Zugfestigkeit
- Kohäsion
- Reibungskoeffizient
- Minimale normale Steifigkeit (benötigt für numerische Analyse)
- Minimale tangential Steifigkeit (benötigt für numerische Analyse)
- Erweichungs-Erhärtungsfunktion infolge Spannung
- Erweichungs-Erhärtungsfunktion infolge Kohäsion

Anhand der Parameter zu 3D Interface wird ein Property-Set erstellt, das Entitäten des Typs IfcStructuralConnection um Attribute erweitert:

4.2.2.8 Reinforcement

Reinforcement wird verwendet, um die Materialeigenschaften von Bewehrungsstahl darzustellen. Es muss dabei festgelegt werden, ob eine lineare, bilineare oder multilineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung angenommen wird. Demzufolge müssen entsprechende Parameter eingegeben werden:

Lineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Wird eine lineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung für den Bewehrungsstahl gewählt, so genügt es, den E-Modul anzugeben, da dieser der Quotient aus Dehnung und Spannung ist (siehe nachfolgende Abbildung).

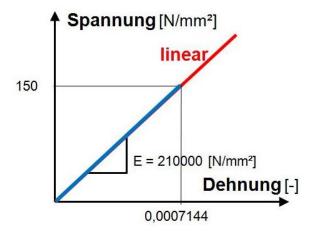


Abbildung 29 - Linearer Spannungs-Dehnungs-Verlauf (CADFEM-wiki, 2014)

Bilineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Ein bilinearer Verlauf besteht aus zwei Teilen. Im ersten Abschnitt wird der elastische Teil des Stahls beschrieben. Es wird hierfür der Elastizitätsmodul E₅ von Stahl beschrieben. Der zweite Abschnitt repräsentiert die Plastizität des Stahls mit Erhärtung. Der Anstieg des zweiten Teils repräsentiert den Härtemodul E₅h. Bei dem Bilinearen Verlauf geht man von einer perfekten Plastizität aus. Daraus ergibt sich E₅h = 0.

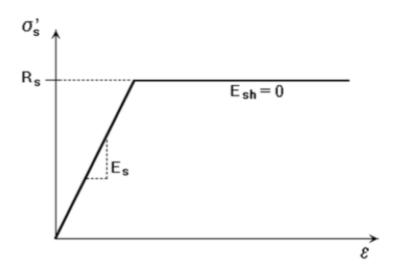


Abbildung 30 - Bilinearer Spannungs-Dehnungs-Verlauf (Červenka, et al., 2014)

Entsprechend werden hierbei folgende 2 Attribute gebraucht:

- Elastizitätsmodul
- Maximale Spannung σ_y

Bilineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung mit Erhärtung

Für einen bilinearen Verlauf bei dem der Härtemodul nicht null ist, werden folgende Parameter benötigt:

- Elastizitätsmodul
- Maximale Spannung σ_y
- Auftretende Spannung bei Erhärtung σt
- Auftretende Dehnung

Multilineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Bei einem multilinearen Verlauf wird die Spannungs-Dehnungs-Kurve in 4 Abschnitte unterteilt. Das Modell erlaubt es, alle vier Stufen des Materialverhaltens von Stahl abzubilden. Es handelt sich dabei um den elastischen Verlauf, Erweichungsverlauf, Erhärtungsverlauf und Bruchverlauf.

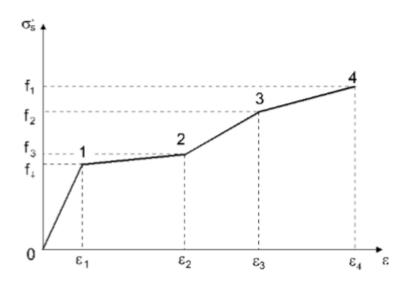


Abbildung 31 - Multilinearer Spannungs-Dehnungs-Verlauf (Červenka, et al., 2014)

Die relevanten Punkte des Diagramms können einzeln in ATENA eingegeben werden.

Weitere relevante Parameter (unabhängig von Linearität)

- Wichte
- Wärmeausdehnungskoeffizient

4.2.2.9 Cyclic Reinforcement

Dieser Materialtyp verwendet die in 6.2.1.9 erwähnte Klasse Reinforcement und erweitert sie um Parameter zur Beschreibung des nichtlinearen Giuffré-Minegotto-Pinto-Modells. Die benötigten Attribute wären hierfür:

- Bauschinger-Effekt-Exponent R
- Menegotto-Pinto-Parameter C1
- Menegotto-Pinto-Parameter C2

Es handelt sich bei diesen 3 Parametern um experimentell bestimmte Werte.

4.2.2.10 Bond for Reinforcement

Bond for Reinforcement wird verwendet um die Materialparameter von Bewehrungsbügeln in die numerische Simulation mit einfließen zu lassen.

Folgende Eingabeparameter können eingegeben werden:

- Bewehrungsbügeltyp
- Druckfestigkeit (kubisch)
- Bewehrungsprofil
- Einbettung in Beton
- Bügelqualität

4.2.2.11 3D Bilinear Steel Von Mises

Dieser Typ beschreibt das Von-Mises-Materialmodell, das in diesem Fall nur für Stahl spezifiziert ist. Das Materialmodell wird genutzt, wenn ein elastisches Material über die Biegefestigkeit hinaus belastet wird. Dabei tritt eine plastische Verformung auf. Das Modell nutzt eine bilineare Kurve, um die Spannungswerte zu berechnen.

Folgende Parameter werden hierbei eingegeben:

- Elastizitätsmodul
- Poissonzahl
- Biegefestigkeit
- Härtemodul
- Wichte
- Wärmeausdehnungskoeffizient

Parameter zur Beschreibung des Bauschinger-Effekts:

- Skalierung der Biegeoberfläche R
- Bauschinger Härtung K1
- Bauschinger Speicher K2

Viele Attribute sind bereits in der Entität IfcMechanicalSteelMaterialProperties definierbar. Nur die Parameter zur Beschreibung des Bauschinger-Effektes müssen durch ein Property-Set ergänzt werden

4.2.2.12 Erstellung von Property-Sets zur Repräsentation der Materialtypen

Basierend auf den unterschiedlichen Materialtypen werden entsprechende Property-Sets erstellt, um die Attribute in einem IFC-Modell definieren zu können. Da alle Attribute von 3D Elastic Isotropic bereits im IFC-Schema integriert sind, ist es nicht nötig hierfür ein Property-Set zu erstellen. Die Parameter aus den 3 Materialtypen 3D Nonlinear Cementitious 2, 3D Variable Nonlinear Cementitious 2 und 3D Nonlinear Cementitious 2 User werden in einem Property-Set zusammengefasst. Ebenso werden Reinforcement und CyclicReinforcement als ein Property-Set definiert. Die Parameter C₁ bis C₂₁ innerhalb des Microplane-Materialtyps werden je nach der Einstellung des Microplane-Typs M4 oder M7 unterschiedlich verwendet. Der Microplane-Typ wird im Property-Set als IfcPropertyEnumeratedValue definiert und gibt die weitere Verwendung der übrigen Parameter vor. [für Property Sets siehe Anhang]

4.2.3 Vernetzung

Eine Möglichkeit, die Vernetzung von Modellen für eine FEM-Analyse bearbeiten, existiert in IFC nicht. Sind beim Datenaustausch allerdings Programme für die Tragwerksanalyse beteiligt, ist es nützlich, Vernetzungsparameter im IFC-Modell zu definieren. Dadurch kann vermieden werden, das FEM-Netz bei jedem Austausch neu generieren und bearbeiten zu müssen.

In ATENA 3D und anderen Vernetzungsgeneratoren wie z.B. Gmsh² oder AxisVM³ werden die Elemente in ein Netz aus linearen Elementen mit konstanten Querschnitt aufgeteilt. Innerhalb jedes Elementes wird ein Gleichungssystem zur Berechnung von Einwirkungen aufgestellt und numerisch gelöst (Wikipedia, 2015). ATENA 3D ermöglicht es hierbei, nicht nur für jeden Körper, die Feinheit des Netzes zu deklarieren, sondern einen globalen Parameter zu bestimmen, nach dem sich die Größe der Finiten Elemente orientiert.

² http://geuz.org/gmsh/

³ http://axisvm.eu/axisvm_products_modeling_meshing.html

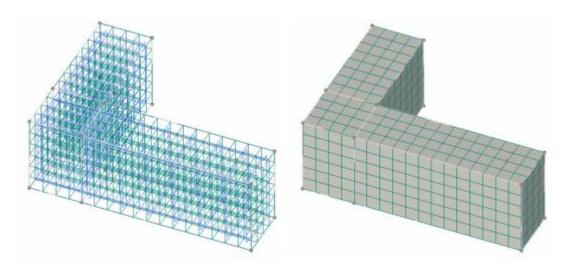


Abbildung 32 - Globale Vernetzung in ATENA 3D (Červenka, et al., 2014)

Ebenso kann für jeden Körper ein eigenes Netz aus Elementen erstellt werden. Konflikte zwischen lokalen Netzen und dem globalen Parameter können hierbei nicht entstehen, da das Programm immer nur das Netz, mit der kleinsten Elementgröße anwendet.

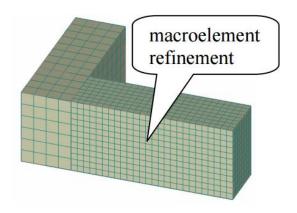


Abbildung 33 - Lokale Vernetzung in ATENA 3D (Červenka, et al., 2014)

Innerhalb eines Bauteils können weitere Verfeinerungen am Netz vorgenommen werden. In ATENA 3D ist dies über Punkte oder Linien, in deren Umkreis verfeinert wird oder eine Fläche, möglich. Vernetzungsgeneratoren wie Gmsh nutzen verschiedene geometrische Formen, um ein Areal zu bilden, in dem eine Verfeinerung des Netzes stattfindet. Da das Programm nicht nur für Gebäude genutzt wird, sind auch gekrümmte Formen, wie z.B. Kugeln einsetzbar.

Der Globale Vernetzungsparameter, der die allgemeine Größe der finiten Elemente bestimmt, kann im IFC-Modell über ein Property-Set bestimmt werden. Hierfür werden die Elementgröße und der Elementtyp als Attribute definiert. Für den Elementtyp können gemäß des Input-Files in ATENA verschiedene Formen ausgewählt werden, wie z.B. Tetraeder oder Hexaeder.

Das Property-Set *Pset_GlobalMeshElements* kann der Entität *IfcStructuralAnalysisModel* zugewiesen werden.

Analog zu *Pset_GlobalMeshElements*, kann für Entitäten des Typs *IfcStructuralMember* ein Property-Set erstellt werden, dass eine lokale Deklarierung der Vernetzungsparameter ermöglicht. [Für Property Sets siehe Anhang]

4.2.4 Parameter für eine probabilistische Analyse

Probabilistische Analysen werden in der Tragwerksplanung hauptsächlich bei Einwirkungen nötig, die statistischen Schwankungen unterworfen sind. Dies ist zum Beispiel der Fall bei Schnee-, Wind- und Erdbebenlasten. Ebenso kann die Festigkeit von Bauteilen wie Beton, Stahl oder Gründungen im Erdreich schwanken. Bei einer probabilistischen Analyse geht man davon aus, dass die Summe der Einwirkungen geringer als der Gesamtwiderstand des Bauwerks ausfallen soll. Die Verteilungsfunktionen für Einwirkung und Widerstand werden miteinander verglichen. In der Regel existiert dabei eine Bereich, in dem sich beide Funktionen überschneiden. Dieser wird als Versagensbereich bezeichnet, aus dem sich die Versagenswahrscheinlichkeit des Bauteils bzw. Bauteils herleiten lässt (Voigt, 2012) (siehe nachfolgende Abbildung).

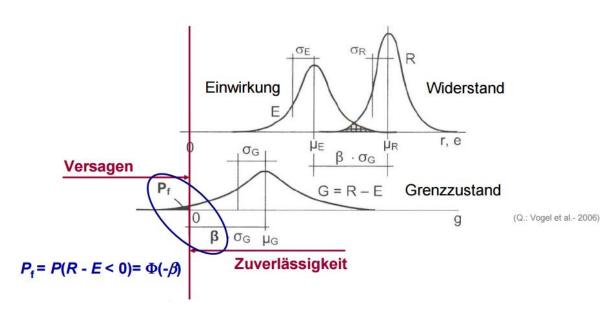


Abbildung 34 - Konzept der probabilistischen Analyse (Voigt, 2012)

In IFC existieren keine Entitäten, die probabilistische Parameter beschreiben. Demzufolge wäre eine Erweiterung eines IFC-Modells mittels Property-Sets nötig, wenn es eine entsprechende Analyse unterstützen soll.

Im Bauwesen ist die gängigste Verteilungsfunktion, die für probabilistische Analysen verwendet wird, die Normalverteilung (siehe Abbildung).

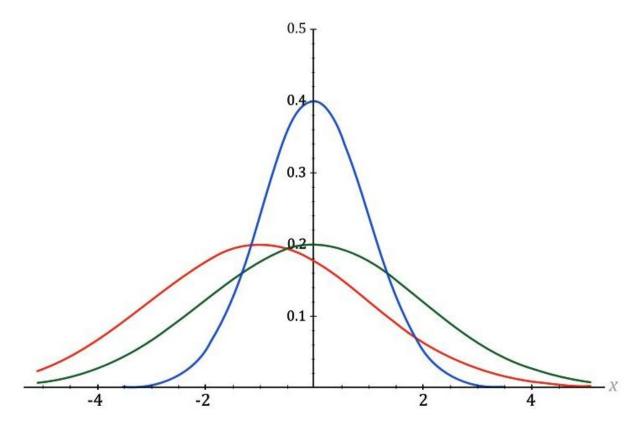


Abbildung 35 - Abbild von Dichtefunktionen der Normalverteilung (Thum, 2010)

Das zu erstellende Property-Set soll sich auf die Dichtefunktion der Normalverteilung beziehen und kann mit jeglicher Entität verknüpft werden. Geeignete Entitäten wären hierbei IfcStructuralLoad für Lasteinwirkungen oder IfcMaterial für Materialschwankungen.

Die allgemeine Formel für die Dichtefunktion der Normalverteilung lautet wie folgt:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Die Varianz σ^2 sowie der Erwartungswert μ definieren die Breite und Höhe der Funktion. Deswegen müssen sie im Property-Set als Attribute deklariert werden. Außerdem müssen die Attribute, auf die sich die Funktion bezieht im Property-Set vermerkt werden, da nicht alle Eigenschaften einer Entität probabilistisch sind. [Für Property Set siehe Anhang]

Eine probabilistische Analyse ist in ATENA nicht möglich. Hierfür wurde von Červenka Consulting das Programm SARA entwickelt.

5 ALLGEMEINES VERFAHREN ZUR ERSTELLUNG EINER MVD

Wenn man Daten aus einem IFC-Modell für die Tragwerksplanung verwenden will, werden grundsätzlich nur bestimmte Informationen benötigt. Um unnötige Datenmengen beim Austausch zwischen verschiedenen Fachebenen zu vermeiden, bietet sich die Erstellung eines Sub-Modells an. Mit Hilfe einer Model View Definition (kurz: MVD) kann das Sub-Modell nach vordefinierten Kriterien validiert werden, um sicherzustellen, dass alle relevanten Daten vorhanden sind. Es ist außerdem möglich, mit einem Drittprogramm direkt ein Sub-Modell durch Einlesen einer MVD zu erstellen.

5.1 ALLGEMEINES ZU MODEL VIEW DEFINITIONS

Gemäß der offiziellen Webseite von buildingSMART definiert eine Model View Definition die Teilmenge eines IFC-Modells, die benötigt wird, um die Austauschanforderungen der AEC-Industrie zu erfüllen(buildingSMART, 2015). Laut einer anderen Definition ist eine Model View Definition ein Schema, das definiert, welche Komponenten in einem Datenaustausch genutzt werden.(Suermann, et al., 2010)

Die erste MVD wurde von der Organisation buildingSMART entwickelt. Es handelt sich hierbei um die Coordination View. Deren Ziel ist es, den Austausch zwischen einzelnen Building-Information-Modellen der unterschiedlichen Fachebenen Architektur, Ingenieurbau und Bauausführung zu optimieren.(buildingSMART, 2015)

Die MVD legt fest, aus was sich die Teilmenge eines IFC-Modells zusammen setzt, um spezifische Datenaustauschanforderungen zu unterstützen und benötigte Daten zu liefern. Repräsentations- und Implementierungsanforderungen werden zusätzlich für die Interface-Implementierung bereit gestellt. (Liebich, et al., 2013)

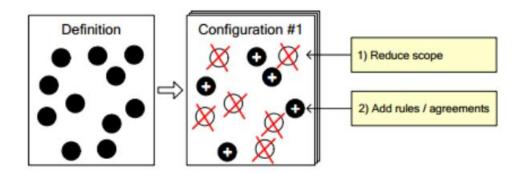


Abbildung 36 - Sub-Modell (Konfiguration) eines IFC-Modell (Definition)(Hietanen, 2008)

In einer MVD wird für den Austauschprozess eines IFC-Modells folgendes definiert: (Liebich, et al., 2013)

- wie Informationen ausgetauscht werden
- der Datenstandard
- benötigte Konfigurationen für den Standard

2011 wurde das XML-Format mvdXML unter buildingSMART veröffentlicht um den Entwicklungsprozess einer MVD zu vereinfachen (Chipman, et al., 2012). Es basiert auf der Methodologie zur Erstellung und Dokumentation von *Model View Definitions* (Hietanen, 2008).

5.2 IDM/MVD-METHODE ZUR ERSTELLUNG EINER MVD

MVDs können durch unterschiedliche Verfahren erstellt werden. Eine wichtige Grundlage bilden hierbei die Datenaustauschbedingungen zwischen den Akteuren, auf die sich eine MVD bezieht. Diese Austauschbedingungen können über ein sogenanntes Information Delivery Manual (kurz: IDM) erfasst werden. Das IDM setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Zum einen ist eine Processmap integriert, die Auskunft darüber gibt, wo und wann ein Datenaustauschprozess ausgeführt wird. Grundsätzlich wird diese mit der grafischen Spezifikationssprache "Business Process Model and Notation" (kurz: BPMN) erstellt. Zum anderen wird beschrieben, welche Informationen ausgetauscht werden. Der Datenaustausch wird in Tabellenform beschrieben, zusammen mit den Austauschanforderungen und funktionellen Bereichen. Demzufolge bringt das IDM die Informationen in eine arbeitsfähige Umgebung, beschreibt aber nicht die Datenformate und Technologien, die für den Austausch nötig sind. Diese Aufgabe wird von der MVD übernommen (Liebich, et al., 2013).

Der allgemeine Ablauf dieses Verfahrens ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.

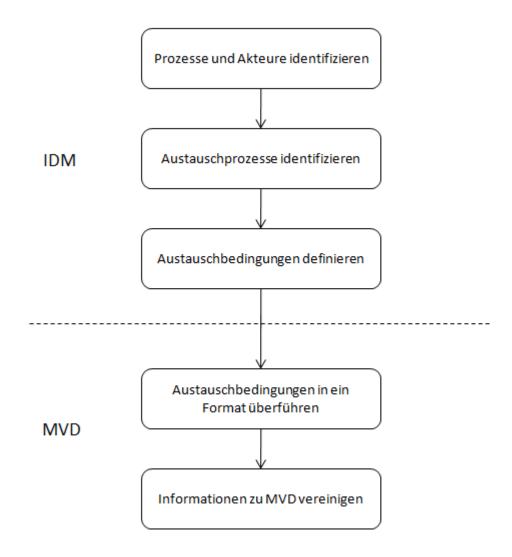


Abbildung 37 - IDM/MVD-Methode

Unter bestimmten Umständen ist es nicht nötig, alle 5 Schritte des IDM/MVD-Verfahrens auszuführen. So können zum Beispiel Schritt 3 der IDM-Erstellung und Schritt 1 der MVD-Erstellung zusammengefasst werden.

5.3 SCHEMATISCHER AUFBAU EINER MVD

Für den Entwurf einer MVD kann das "IFC Model View Definition Format" genutzt werden. Einige MVD's wie z.B. die Structural Analysis View oder die Coordination View sind anhand dieses Schemas aufgebaut.

Hierbei wird eine Model View Definition durch eine Gruppe von Konzepten (engl. Concept) und deren Relationen zueinander erstellt.

Diese Konzepte fassen logisch zusammenhängende Daten zusammen. So müsste z.B. die Position eines Bauteils in IFC über mehrere Klassen und Attribute definiert werden, was in einem Konzept bereits vordefiniert ist. (Scherer, et al., 2014) "Das Beschreiben eines Views wird dadurch einfacher und übersichtlicher als es beispielsweise auf der Basis einer reinen IFC-Definition möglich wäre" (Scherer, et al., 2014)

Gemäß "IFC Model View Definition Format" existieren 3 Arten von Konzepten, die in den nachfolgend in 5.3.1, 5.3.2 und 5.3.3 näher erläutert sind.

5.3.1 Variables Konzept

Ein Variables Konzept bezieht sich grundsätzlich auf einen Entitätstyp im IFC-Schema. Ein Beispiel hierfür wäre *IfcWall*. Die Entität, die das Konzept deklariert, wird in das Sub-Modell übernommen. Das Variable Konzept kann mit Adapter- und Statischen Konzepten verknüpft werden (Hietanen, 2008).

In nachfolgender Abbildung ist ein Variables Konzept dargestellt, das sich auf den Entitätstyp IfcWall bezieht. In einer MVD können beliebig viele Variable Konzepte definiert werden. Einem Variablen Konzept können außerdem mehrere andere Konzepte zugewiesen werden.

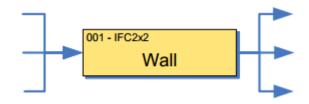


Abbildung 38 - Variables Konzept (Hietanen, 2008)

5.3.2 Adapter Konzept

Adapter Konzepte sind wiederverwendbare Elemente in einer MVD, die statische Konzepte mit einem Variablen Konzept verknüpfen. Sie können als eine Art Ordner, zur Strukturierung der MVD genutzt werden, um eine erhöhte Wiederverwendung des Codes zu bewerkstelligen. (Hietanen, 2008)

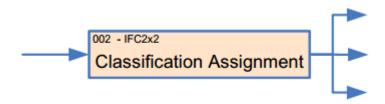


Abbildung 39 - Adapter Konzept (Hietanen, 2008)

5.3.3 Statisches Konzept

Statische Konzepte bleiben in sämtlichen MVDs, in denen sie genutzt werden unverändert. Sie können ohne weitere Modifikation wiederverwendet werden, da sie keinerlei Optionen beinhalten.(Hietanen, 2008)

Ein Beispiel für ein Statisches Konzept stellt ein Konzept bezogen auf *IfcGlobalUniqueID* dar (kurz: GUID).

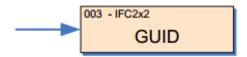


Abbildung 40 - Statisches Konzept (Hietanen, 2008)

In Statischen Konzepten werden zusätzliche Implementierungsbedingungen bezüglich der entsprechenden Entität definiert, die durch das Variable Konzept vorgegeben ist.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Informationen des Statischen Konzeptes GUID, gemäß des Schemas aus "IFC Model View Definition Format" an.

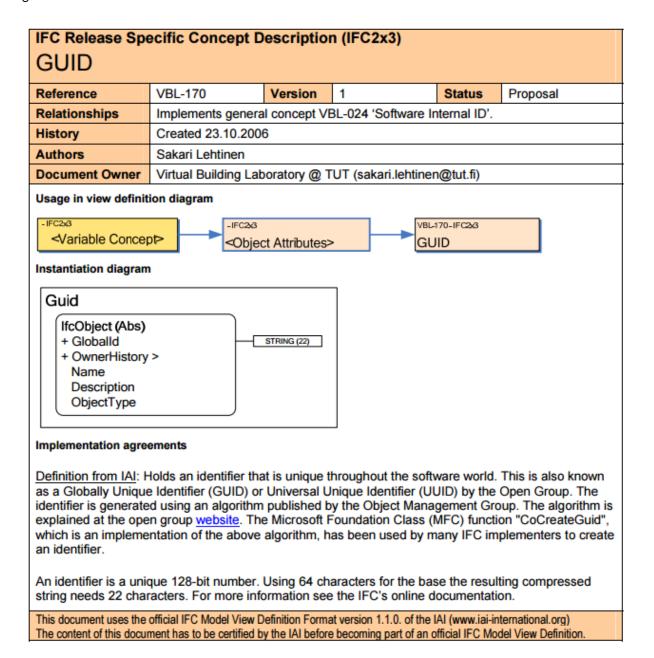


Abbildung 41 - Statisches Konzept GUID (Lehtinen, 2008)

Nachfolgend sei ein Beispiel gezeigt, dass das Zusammenspiel zwischen den drei Konzept-Arten zeigt. Es wurde der MVD "Structural design to structural analysis" entnommen.

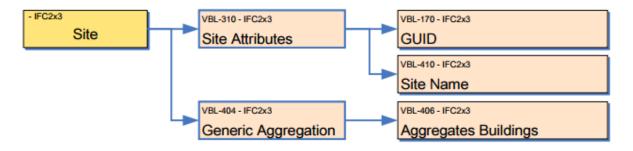


Abbildung 42 - Relationen zwischen Konzepten (Hietanen, 2008)

Jedes Konzept benötigt hierfür eine eigene *ID*, damit andere Konzepte sich darauf berufen können und eine problemlose Verknüpfung möglich ist. Es besteht z.B. eine Verbindung von dem Variablen Konzept *Site* zu den Statischen Konzepten *GUID* und *Site Name* über das Adapter Konzept *Site Attributes*. Das Beispiel bezieht sich auf die Version IFC 2x3.

5.4 ERLÄUTERUNG ZU MVDXML

Eine MVD muss in einem Datenformat gespeichert werden, das es ermöglicht die Datei in einem Austauschprozess zwischen verschiedenen Akteuren zu senden. Dies können zum Beispiel Text- (*.txt, *.docx) sein, Tabellen- (*.xlsx), XML- oder PDF-Formate sein. Die MVD, die im Rahmen dieser Diplomarbeit anzufertigen ist, wird im mvdXML-Format erstellt. Nachfolgend wird näher auf dieses Format und deren Aufbau eingegangen.

5.4.1 Allgemeines

mvdXML ist ein Format, nach welchem MVDs erstellt werden können. Es setzt sich aus zwei bestehenden Entwicklungen zusammen. Zum einen ist dies das seit 2006 verwendete MVD-Format von buildingSMART, das den Fokus auf eine anschauliche Dokumentation setzt. Zum anderen baut mvdXML auf dem Generalized Model Subset Definition Schema (kurz: GMSD) auf, das an der TU Dresden für die serverseitige Datenverwaltung von Teildatensätzen entwickelt wurde. (Scherer, et al., 2014)

Das MVD-Format wurde hierbei auf einer XML-Basis erstellt und parallel dazu eine Abbildung des GMSD-Schemas vorgeschlagen. Im Mai 2012 wurde die aktuelle Version 1.0 von buildingSMART als neues MVD-Format verabschiedet (Scherer, et al., 2014).

Es ist anzumerken, dass auch andere Formate, neben mvdXML existieren und benutzt werden beispielsweise als XML Schema Definition (kurz: XSD), EXPRESS (ISO 10303-11),

Schematron oder Validations-Frameworks in diversen Programmiersprachen und Tools (z.B. NUnit, JUnit).(buildingSMART, 2015)

Das Ziel von mvdXML ist es laut buildingSMART nicht, andere Formate zu ersetzen oder eine Standardisierung herbeizuführen, sondern vielmehr ein Basisschema bereitzustellen, das individuell erweitert werden kann. Zusätzlich ist mvdXML abwärtskompatibel zu älteren IFC-Standards, beispielsweise IFC2x3.(buildingSMART, 2015)

Die aktuelle Version von mvdXML ist Version 1.0. Ein Entwurf von Version 1.1 ist veröffentlicht worden.

5.4.2 Aufbau einer Model-View-Definition in mydXML

Das mvdXML-Format erweitert das Prinzip der Konzepte des "IFC Model View Definition Format" um sogenannte Konzeptmuster (engl: *concept template*).(Scherer, et al., 2014) Diese können je nach Anwendung angepasst und wiederverwendet werden.

Variable Konzepte werden über sogenannte *root concepts*, die in XML über den Tag <*mvd:ConceptRoot>* definiert werden, dargestellt. Die Entitäten, die in das Sub-Modell übernommen werden, sind darin vermerkt. Jedem *root concept* wird eine Anzahl von *concepts*, die über <*mvd:Concept>* deklariert werden, zugewiesen. Die Concepts funktionieren hierbei wie ein Statisches Konzept. Implementierungsbedingungen werden in dem Concept Template festgelegt und mit dem zugehörigen Concept verknüpft. Im einfachsten Fall kann darin festgelegt werden, ob die beschriebenen Daten in einem Datenaustauschszenario vorhanden sein müssen (*mandatory*), vorhanden sein dürfen (*optional*) oder nicht vorhanden sein sollen (*excluded*) (Scherer, et al., 2014). "Darüber hinaus können Einschränkungen wie zulässige Wertebereiche und Kardinalitäten definiert werden." (Scherer, et al., 2014) Nachfolgend sind die Hauptkomponenten im mvdXML-Schema näher erläutert.

5.4.2.1 mvdXML-Element

Das mvdXML-Element beinhaltet den gesamten Umfang einer mvdXML-Datei. In ihm sind eine oder mehrere MVDs, sowie mindestens eine *Concept-Template* enthalten.(Liebich, et al., 2011) Das mvdXML-Element wird durch den Tag <*mvd: mvdXML>* deklariert.

5.4.2.2 Model-View-Element

Innerhalb dieses Elementes ist exakt eine Model View Definition enthalten. Es existieren mindestens ein Concept Root, sowie die Angabe der IFC-Version, die verwendet wird. Optional kann es auch *ExchangeRequirements* besitzen. (Liebich, et al., 2011)

5.4.2.3 ExchangeRequirement

Bei diesem Element handelt es sich um die Beschreibung eines *Exchange Requirement Model* (kurz: ERM), das in der MVD implementiert ist. Innerhalb des ERM werden Austauschbedingungen für ein bestimmtes Datenaustausch-Szenario definiert. ERs sind nicht an einen IFC-Standard gebunden (Wix).

Beispiel eines Exchange Requirements:

Exchange Requirements werden mit einem Konzept verknüpft. Dies wird durch den Tag <Requirement> definiert. Das Attribut applicability legt fest ob sich das ER auf den Import oder Export der MVD bezieht. Requirement definiert, ob das Konzept in den ER optional (optional), obligatorisch (mandatory) oder auszuschließen (excluded) ist.

5.4.2.4 Root Concept

Ein Root Concept deklariert eine Entität, auf die *Concept Templates* angewendet werden. Wird eine Entität im *Root Concept* ohne *Concept Templates* bestimmt, so werden gemäß der MVD alle Entitäten des betreffenden Typs ausgewählt.

applicableRootEntity bestimmt den Typ der Entität, nach dem gefiltert werden soll.

Beispiel einer Concept Root:

5.4.2.5 Concept Template

Mit Hilfe dieses Elementes wird das Konzept deklariert, das auf einen festgelegten Entitätstyp angewendet wird. Der Entitätstyp wird mit *applicableEntity* bestimmt. *applicableSchema* legt die angewandte IFC-Version fest (z.B. IFC2x3). Es ist möglich, in der *Concept Template* sogenannte *Sub-Templates* zu definieren. Somit kann man die Konzepte, ähnlich wie bei einem Adapter-Konzept [siehe 5.1.1.2] übersichtlicher strukturieren und die Code-Wiederverwendung erhöhen.

Beispiel einer Concept Template:

```
<Templates>
    <ConceptTemplate uuid="379db833-7f99-4f31-95cf-8c88af36c9fb"</pre>
name="Etagewall" applicableSchema="IFC4" applicableEntity="IfcWall">
      <Definitions>
        <Definition>
          <Body><! [CDATA[]]></Body>
        </Definition>
      </Definitions>
      <Rules>
        <AttributeRule AttributeName="ContainedInStructure">
          <EntityRules>
            <EntityRule EntityName="IfcRelContainedInSpatialStructure"/>
        </AttributeRule>
      </Rules>
    </ConceptTemplate>
  </Templates>
```

In dem Beispiel werden die Tags *Attribut Rule* und *Entity Rule* verwendet. Diese legen fest, nach welchen Attribut- oder Entitätsbezügen die entsprechende Entität, auf die das Konzept angewendet wird, spezifiziert werden soll. In diesem Fall müssen alle relevanten Entitäten des Typs IfcWall, das Attribut "ContainedInStructure" gemäß der Attribut Rule besitzen. Dieses Attribut muss sich außerdem auf die Entität IfcRelContainedInSpatialStructure beziehen, da dies die Entity Rule innerhalb der Attribut Rule vorschreibt.

5.4.2.6 Constraint

Dieses Element wird innerhalb von *Attribut Rule* oder *Entity Rule* eingesetzt und deklariert eine Restriktion innerhalb der entsprechenden Regel, beispielsweise einen festgelegten Wert, der nicht überschritten werden darf (Chipman, et al., 2012).

Beispiel einer Constraint.

Die Werte die innerhalb des Constraints verglichen werden können, sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Metric	Description
Value	Indicates the value of the attribute (value uses syntax according to the attribute type, defined below).
Size	Indicates the size of a collection or STRING (value is an INTEGER).
Туре	Indicates the type of the value assigned to the attribute (value is a STRING).
Unique	Indicates whether value must be unique within the population of instances described within the Concept Template (BOOLEAN).

Abbildung 43 - Verwendbare Werte-Typen innerhalb eines mvdXML-Constraints (Chipman, et al., 2012)

Die Operatoren, die dabei verwendet werden können sind in Abbildung 44 zu sehen.

Operator	XML Escaped	Description
=	=	Equal.
!=	!=	Not Equal.
>	>	Greater Than.
>=	>=	Greater Than Or Equal.
<	<	Less Than.
<=	<=	Less Than Or Equal

Abbildung 44 - Verwendbare Operatoren innerhalb eines mvdXML-Constraints (Chipman, et al., 2012).

6 KONZEPT EINER MVD FÜR DEN AUSTAUSCH VON DATEN DER TRAGWERKSPLANUNG

In diesem Abschnitt wird ein Konzept für eine MVD vorgestellt, das alle Daten definiert, die für einen Austausch zwischen Akteuren in der Tragwerksplanung nötig sind. Es bietet sich hierbei an, die MVD mittels IDM/MVD-Verfahren zu erstellen. Zusätzlich wird die bereits vorhandene MVD "Structural Analysis View" als Basis genutzt und um weitere Konzepte erweitert.

6.1 IDM ZUR BESCHREIBUNG DES DATENAUSTAUSCHES INNERHALB DER TRAGWERKSPLANUNG

Gemäß des IDM/MVD-Verfahrens, sind zuerst die Akteure zu identifizieren, die am Prozess beteiligt sind. Diese sind:

- 1. Die Tragwerksplanung, die alle konstruktiven Bauelemente modelliert
- 2. Die Tragwerksberechnung, die das IFC-Modell für eine FEM-Analyse mit einem Statik-Programm optimiert und auswertet.
- 3. Das Statik-Programm, das Berechnungen anhand der Parameter aus dem IFC-Modell durchführt und die Ergebnisse ausgibt.

Die Austauschprozesse zwischen diesen 3 Akteuren sind in nachfolgender Processmap dargestellt:

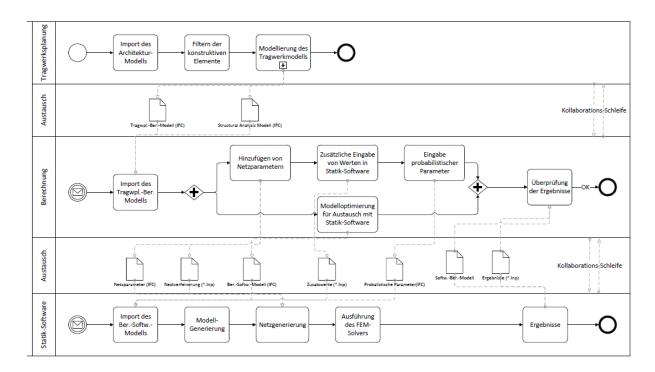


Abbildung 45 - Processmap

In der Tragwerksplanung wird ein Modell bzw. Zeichnung des Architekten verwendet, um daraus ein Tragwerksmodell zu entwickeln. Dabei müssen vorher alle konstruktiven Elemente aus dem Architektenmodell herausgefiltert werden, da sie relevant für das Tragwerksmodell sind. Gegebenenfalls kann die Filterung bereits über die MVD "Coordination View", die den Austausch zwischen Architekt und Tragwerksplaner definiert, unterstützt werden. Das Tragwerksmodell wird nach folgendem Schema modelliert und ist im BPMN-Diagramm als Sub-Prozess dargestellt.

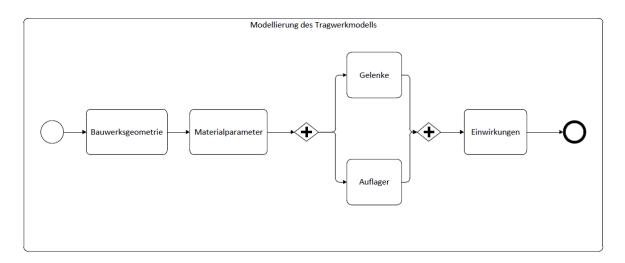


Abbildung 46 - Prozess der Modellierung des Tragwerkmodells

Anhand des Prozesses "Modellierung des Tragwerksmodells" ist zu erkennen, dass sowohl die ST-4-Entitäten des Typs IfcStructuralMember und IfcStructuralActivity, sowie Materialparameter (IfcMaterial) in der MVD berücksichtigt werden müssen.

In der Berechnung wird das erstellte Tragwerksmodell für eine Verwendung von Statik-Software optimiert. Außerdem können Netzparameter, sowie probabilistische Werte eingegeben werden. Informationen, die von IFC ST-4 nicht unterstützt werden, aber für eine Berechnung notwendig sind, müssen in dem Prozess "Zusätzliche Eingabe von Werten in Statik-Software" definiert werden. Dies wären zum Beispiel dynamische Aktivitäten. Das resultierende Modell wird daraufhin von dem Statik-Programm analysiert und die Ergebnisse ausgegeben. Diese werden vom Zuständigen für die Berechnung überprüft. Sind die Ergebnisse zufriedenstellend, d.h. ist der Tragwerkssicherheitsnachweis erfüllt, ist der Prozess beendet. Ist dies nicht der Fall müssen in Kollaboration mit Tragwerksplanung und Statik-Software weitere Änderungen an dem Modell durchgeführt werden.

Die Austauschbedingungen, die aus der Processmap hervorgehen, beziehen sich auf die MVD-Konzepte in nachfolgenden Kapiteln [siehe Anhang].

6.2 MVD-KONZEPT FÜR DATENAUSTAUSCH ZWISCHEN IFC-MODELL UND ATENA

Maßgebend für den Austausch von Daten zwischen einem IFC-Modell und ATENA 3D sind die Informationen aus dem Structural Analysis Modell. Eine MVD hierfür existiert bereits als Entwurf im "IFC Model View Definition Format"⁴. Sie wurde von Sakari Lehtinen und Jiri Hietanen basierend auf vorheriger Arbeiten der IAI Structural Engineering Domain Group entwickelt und wird Structural Analysis View oder auch Structural Design to Structural Analysis genannt (Lehtinen, et al., 2007-2008). Im Rahmen der Diplomarbeit wird das Konzept dieser MVD aufgegriffen und als Basis für die zu erstellende mvdXML-Datei genutzt.

6.2.1 Aufbau der Structural Analysis View

Die Structural Analysis View beinhaltet Austauschinformationen, die nötig sind, um ein erstelltes Structural Analysis Model mit einem oder mehreren Tragwerksanalyse-Programmen zu bearbeiten (Lehtinen, et al., 2007-2008).

⁴ http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-view-definition/structural-analysis-view

Die MVD ist unabhängig vom Hauptkonstruktionstyp (z.B. Stahl-, Holz-, oder Betonkonstruktion) (Lehtinen, et al., 2007-2008).

In der Structural Analysis View werden insgesamt 12 Entitätstypen verwendet, die in nachfolgender Abbildung aufgezählt werden:

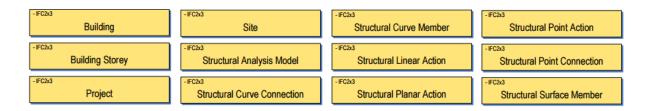


Abbildung 47 - Statisches Konzept GUID (Lehtinen, 2008)

Jedem dieser Variablen Konzepte werden sowohl Adapter- als auch Statische Konzepte zugewiesen.

6.2.2 Variable Konzepte zu Entitätstypen außerhalb von ST-4

In dem Konzept Project werden allgemeine Informationen zum IFC-Modell für den Datenaustausch deklariert, wie z.B. der Name oder die ID des Projektes. Auch die befindlichen Gebäude, mitsamt Stockwerken werden benötigt (*Aggregates Buildings*). Einheitensysteme (z.B. *Metric Project Units*) und die mechanischen Eigenschaften des Betons (*Mechanical Concrete Material Properties*) und Stahls (*Mechanical Steel Material Properties*), die mit den Bauteilen verknüpft werden, müssen ebenfalls implementiert werden. Siehe dazu folgende Abbildung.

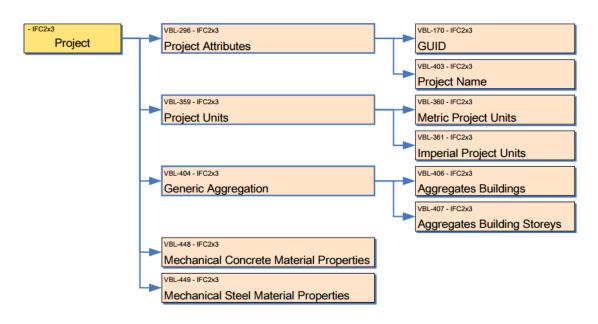


Abbildung 48 - Variables Konzept Project (Lehtinen, 2008)

Das Konzept Site bezieht sich auf die Entität *IfcSite*, die Informationen zum Feld beinhaltet, auf dem die Gebäude platziert sind. Dementsprechend muss das Konzept *Aggregates Building* verwendet werden, um *IfcSite* mit *IfcBuilding* zu verknüpfen.

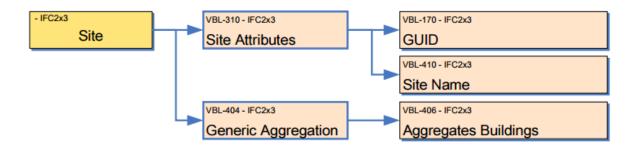


Abbildung 49 - Variables Konzept Site (Lehtinen, 2008)

Die Gebäude, sowie Stockwerke werden durch die Entitäten *Building* und *Building Storey* definiert. Da eine Verknüpfung zwischen *IfcBuilding* bzw. *IfcBuildingStorey* und *IfcStructuralAnalysisModel* mittels *IfcRelServicesBuildings* existiert, werden zwei Variable Konzepte in der MVD aufgeführt (siehe hierzu die nachfolgenden zwei Abbildungen). Die Verknüpfung wird in dem Statischen Konzept *Aggregates Structural Analysis Models* definiert.

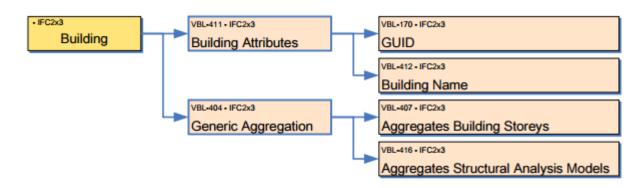


Abbildung 50 - Variables Konzept Building (Lehtinen, 2008)

In dem Konzept *Building* wird zusätzlich noch die Zugehörigkeit der Stockwerke durch *Aggregates Building Storey* vorgeschrieben.

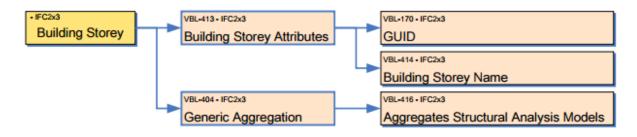


Abbildung 51 - Variables Konzept Building Storey (Lehtinen, 2008)

Die Variablen Konzepte, die sich auf Entitätstypen außerhalb von ST-4 beziehen, dienen der Strukturierung von mehreren Structural Analysis Modellen, die verschiedenen Gebäuden und Stockwerken zugewiesen werden können. Außerdem werden obligatorische Informationen des Projektes integriert.

6.2.3 Variable Konzepte zu Entitätstypen innerhalb von ST-4

In der Structural Analysis View existiert ein Variables Konzept, dass den Entitätstyp

IfcStructuralAnalysisModel und seiner relevanten Eigenschaften und Bezüge beschreibt.

Neben Konzepten für *ID* und *Name* sind dabei auch das Attribut *Predefined Type* (*Structural Analysis Model Predefined Type*) enthalten. Auch eine zusätzliche Verknüpfung zwischen IfcStructuralAnalysisModel und IfcBuilding über das inverse Attribut ServicesBuildings wird berücksichtigt.

Besonders relevant für die Tragwerksplanung sind die drei Statischen Konzepte Loaded by Three Level Hierarchy, Has Results und Structural Analysis Model Group Assignment. Has Results beschreibt das Attribut HasResults von IfcStructuralAnalysisModel. Es bezieht sich auf die Entität IfcStructuralResultGroup und wird dazu genutzt Reaktionskräfte(z.B. Auflager) die durch IfcStructuralReaction beschrieben werden, zu gruppieren. Die Kräfte können dadurch dem entsprechenden Structural Analysis Model zugeordnet werden. Structural Analysis Model Group Assignment ist auf eine ähnliche Weise und Funktionszweck strukturiert. Hierbei wird die Gruppierung und Zuweisung der Bauelemente (repräsentiert durch IfcStructuralItem) zum Structural Analysis Model beschrieben. Dies geschieht über die verknüpfende Entität IfcRelAssignsToGroup. Loaded by Three Level Hierarchy beschreibt die Gruppierung von mechanischen Aktivitäten, die ins Structural Analysis Model implementiert werden. Das Konzept geht hierbei von einer Belastungshierarchie in drei Stufen aus. Das heißt, dass zu einer Gruppe von Belastungen 2 Ebenen von Untergruppen existieren, in denen weitere Belastungen vorgegeben sind (siehe Abbildung). Dieses Schema ist insbesondere bei Lastkombinationen von Vorteil, wenn bereits vorhandene Belastungsgruppen in einer übergeordneten Gruppe, die die Lastfallkombination beschreibt, eingesetzt werden können. Beispielsweise kann eine Entität IfcStructuralLoadGroup für die Lastfallkombination "Schnee" erstellt werden, die wiederum Entitäten von IfcStructuralLoadGroup für Eigengewicht, veränderliche Lasten und Schneelasten beinhaltet.

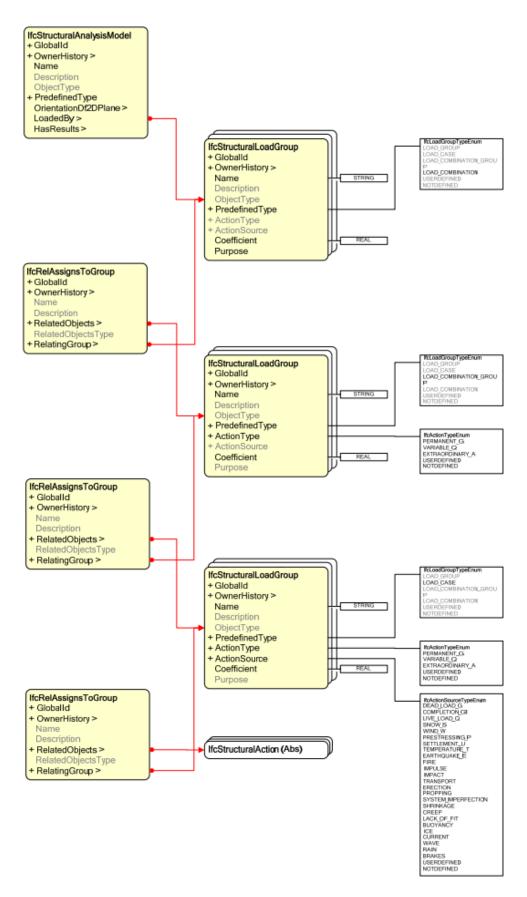


Abbildung 52 - Instaziierungsdiagram des Statischen Konzepts Loaded by Three Level Hierarchy (Lehtinen, 2008)

Bei IFC-Modellen müssen die Entitäten des Typs *IfcStructuralLoadGroup* gemäß dem vorgegeben Schema modelliert werden. Ist es nicht nötig, eine 3-Level-Hierarchie bei Belastungsgruppen zu erstellen, so werden entweder "Dummy"-Level als Platzhalter genutzt (Lehtinen, 2008), oder es müsste in der MVD eine Hierarchie mit niedrigerem Level deklariert werden.

Die Entitäten des Supertyps *IfcStructuralItem* müssen ebenfalls in der MVD vertreten sein. Diese wären *IfcStructuralCurveMember* und *IfcStructuralSurfaceMember* als Sub-Typen von *IfcStructuralMember*, sowie *IfcStructuralPointConnection* und *IfcStructuralCurveConnection* als Sub-Typen von *IfcStructuralConnection*.

Die Variablen Konzepte für *IfcStructuralCurveMember* und *IfcStructuralSurfaceMember* besitzen untereinander einen ähnlichen Aufbau.

Neben Attributen, wie z.B. der Dicke von IfcStructuralSurfaceMember oder Name und ID, werden Verknüpfungen zu den einwirkenden Aktivitäten über Konzepte aus dem Adapter-Konzept Generic Activity Assignment erstellt, wie z.B. Point Action Assignment oder Structural Analysis Displacement. Eine Relation zwischen Subtypen von IfcStructuralMember und IfcStructuralActivity wird somit berücksichtigt. Außerdem muss der Entität das zugehörige Structural Analysis Model zugewiesen werden. Dies wird in Structural Analysis Model Group Assignment, wie auch schon in dem Variablen Konzept Structural Analysis Model, deklariert. Über das Konzept Building Element Assignment wird zwischen IfcStructuralMember eine Verknüpfung zum Bauteil im Design-Model berücksichtigt, das ein Subtyp von IfcElement sein muss (z.B. IfcWall oder IfcSlab). Material und Profil können über Sub-Konzepte von Generic Associations entnommen werden. Position und Geometrie bzw. Topologie des Körpers werden über das Statische Konzept Structural Object Placement, sowie Sub-Konzepte von Topological Representation beschrieben.

Zusätzlich ist es auch wichtig die Relation zu Subtypen von *IfcStructuralConnection* zu berücksichtigen, da jedem Bauteil Verbindungen zugewiesen werden. Dies wird über Sub-Konzepte von *Generic Structural Connection Assignment* bewerkstelligt. In der Structural Analysis View werden nur Punktverbindungen (*IfcStructuralPointConnection*) und Linienverbindungen (*IfcStructuralCurveConnection*) implementiert. Diesen zwei Entitätstypen werden eigenständige Variable Konzepte zugewiesen.

Resultierende Kräfte am Gelenk lassen sich über das Statische Konzept *Structural Analysis Point Result* und Verschiebungen über *Structural Analysis Displacement* mit den Connection-Konzepten verknüpfen. Die Lagerbedingungen werden über *Boundary Edge Support Conditions* definiert. Koordinaten und Topologie werden, ähnlich wie bei anderen Entitäten des Supertyps *IfcStructuralItem* über die Statischen Konzepte *Structural Object Placement* und *Topological Representation* beschrieben. Für Punktlager wird dabei nach Punktkoordinaten gesucht. Bei Linienlagern ist es eine Verbindung aus Punkten, die die Topologie darstellt.

Die mechanischen Aktivitäten werden im Structural Analysis Model über die Entitätstypen IfcStructuralPointAction, IfcStructuralLinearAction und IfcStructuralPlanarAction beschrieben. Diese sind in entsprechenden Variablen Konzepten in der Structural Analysis View vertreten (siehe nachfolgende Abbildung).

Informationen wie Position, Topologie oder Zugehörigkeit zum jeweiligen Structural Analysis Model werden wie bei anderen Mitgliedern des ST-4 durch die gleichen Statischen Konzepte beschrieben. Die zugehörigen Lastgrößen und -Typen werden durch Konzepte des Adapter-Konzeptes *Applied Load* festgelegt.

6.3 ERWEITERUNGEN UND VERÄNDERUNGEN ZUR STRUCTURAL ANALYSIS VIEW

Einige Informationen, die bei der Verwendung von Tragwerksanalyse-Programmen, wie Atena 3D, benötigt werden, sind in der Structural Analysis View nicht berücksichtigt oder im IFC-Schema nicht vorhanden. Aus diesem Grund muss die MVD um einige Bestandteile erweitert werden, um einen geeigneten Austausch zwischen IFC-Modell und Tragwerksanalyse-Software zu ermöglichen. Dem IFC-Schema können Daten in der Form von Property Sets hinzugefügt werden.

6.3.1 Materialeigenschaften

Das Material, das von Entitäten des Typs *IfcStructuralCurveMember* und *IfcStructuralSurfaceMember* genutzt wird, ist in der Entität *IfcMaterial* benannt und mit den genannten Entitäten über *IfcRelAssociatesMaterial* verknüpft. In der Structural Analysis View wird diese Relation in dem Konzept Material Name beschrieben. *IfcMaterial* enthält allerdings nicht ausreichend Daten, die für eine Tragwerksanalyse genutzt werden, wie z.B. Wichte oder Poissonzahl.

Um weitere Materialeigenschaften in einem IFC-Modell zur Verfügung zu stellen, existiert der Entitätstyp *IfcMaterialProperties*. Die jeweiligen Subtypen stellen zu verschiedenen Materialien entsprechende Attribute zur Verfügung. Für die Tragwerksplanung ist dabei der Entitätstyp *IfcMechanicalMaterialProperties* mit den beiden Subtypen *IfcMechanicalSteelMaterialProperties* und *IfcMechanicalConcreteMaterialProperties* relevant.

IfcMechanicalMaterialProperties besitzt 5 optional belegbare Attribute. Diese sind:

- DynamicViscosity = Dynamische Viskosität
- YoungModulus = Elastizitätsmodul
- ShearModulus = Schubmodul
- PoissonRatio = Poisson-Zahl
- ThermalExpansionCoefficient = Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Der Entitätstyp *IfcGeneralMaterialProperties* besitzt weitere 3 optionale Attribute. Hierbei ist die Wichte des Materials, die mit der Eigenschaft *MolecularWeight* beschrieben wird, für die Tragwerksanalyse relevant.

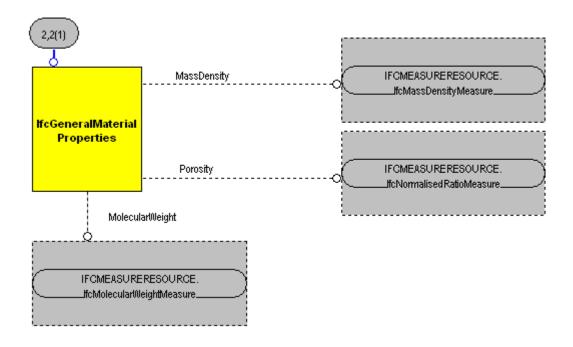


Abbildung 53 - Express-G Diagramm von IfcGeneralMaterialProperties (buildingSMART, 2007)

Die beiden Subtypen besitzen weitere Attribute, die in nachfolgender Abbildung angezeigt sind.

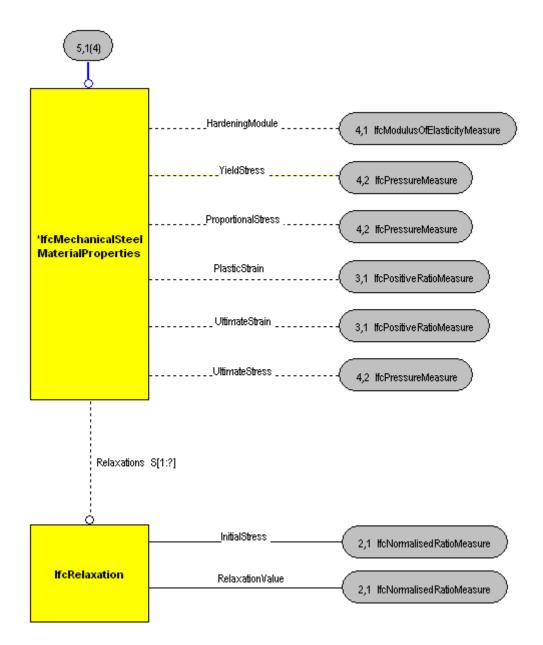


Abbildung 54 - Express-G Diagramm von IfcMechanicalSteelProperties (buildingSMART, 2007)

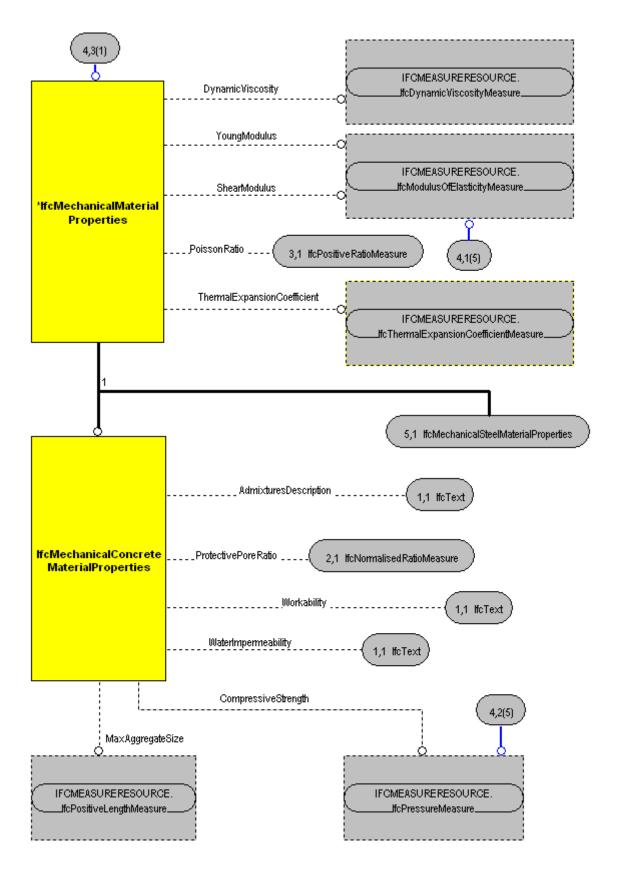


Abbildung 55 - Express-G Diagramm von IfcMechanicalConcreteProperties (buildingSMART, 2007)

IfcMechanicalConcreteMaterialProperties und IfcMechanicalSteelMaterialProperties müssen immer auf eine Entität vom Typ IfcMaterial verweisen. In der Structural Analysis View existieren hierzu zwei Statische Konzepte, die mit dem Variablen Konzept Project verknüpft sind. Die Instanziierungs-Diagramme sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

Mechanical Steel Material Properties IfcMechanicalSteelMaterialProperties + Material > DynamicViscosity YoungModulus ShearModulus PoissonRatio ThermalExpansionCoefficient YieldStress UltimateStress UltimateStrain HardeningModule ProportionalStress PlasticStrain **IfcMaterial** Relaxations > + Name

Abbildung 56 - IFC-Instanziierungsdiagramm zu Mechanical Steel Material Properties (Lehtinen, 2008)

Mechanical Concrete Material Properties

Workability
ProtectivePoreRatio

WaterImpermeability

IfcMaterial

+ Name

Abbildung 57 - IFC-Instanziierungsdiagramm zu Mechanical Concrete Material Properties (Lehtinen, 2008)

Es kann vorkommen, dass die Attribute der zwei Entitätstypen nicht ausreichen, um das Materialverhalten in einem Tragwerksanalyse-Programm simulieren zu können. So kann in ATENA 3D ein Materialtyp (z.B. 3D Nonlinear Cementitious) ausgewählt werden, bei dem die Bruchenergie GF eingegeben werden kann. Auch Spannungs-Dehnungs-Verläufe, die aus mehreren Wertepaaren bestehen, können in ATENA 3D bei bestimmten Materialtypen angegeben werden. In IFC 2x3 existiert der Entitätstyp *IfcExtendedMaterialProperties*. Es handelt sich dabei um eine Kontainer-Klasse, die eine beliebige die mit IfcMaterial verknüpft wird und eine beliebige Anzahl von Properties beinhalten kann. Diese Entität ähnelt vom Aufbau und Funktionsweise stark einem Property-Set.

IfcExtendedMaterialProperties und IfcGeneralMaterialProperties sind in der Structural Analysis View nicht erwähnt. Eine Erweiterung der MVD führt dementsprechend diese beiden Statischen Konzepte ein und verknüpft sie mit dem Variablen Konzept Project (siehe Abbildung).

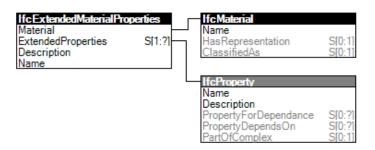


Abbildung 58 - IFC-Instanziierungsdiagramm zu Extended Material Properties in IfcDoc

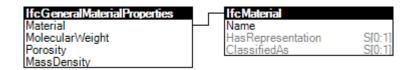


Abbildung 59 - IFC-Instanziierungsdiagramm zu General Material Properties in IfcDoc

Die Materialeigenschaften, die in ATENA 3D verwendet werden, könnten somit innerhalb der Entität IfcExtendedMaterialProperties deklariert werden, sofern sie nicht bereits im IFC-Schema vorhanden sind. Alternativ können hierfür aber auch Property-Sets genutzt werden.

6.3.2 Material Layer

In ATENA kann man über die Shell Macroelements verschiedene Ebenen des Bauelementes modellieren. Diese können jeweils unterschiedliche Materialeigenschaften besitzen und werden Layer genannt. In nachfolgender Abbildung ist ein Beispiel für den schematischen Aufbau eines Shell Macroelements mit mehreren Layern dargestellt.

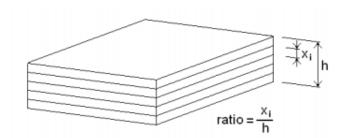


Abbildung 60 - Material Layer in ATENA (Červenka, et al., 2014)

In IFC können Material Layer erstellt werden. Dies wird durch den Entitätstyp IfcMaterialLayerSet ermöglicht. IfcMaterialLayerSet verweist auf eine beliebige Anzahl an

Entitäten des Typs IfcMaterialLayer. Die Summe von deren Dicken ist in IfcMaterialLayerSet als Eigenschaft vermerkt (siehe Abbildung)

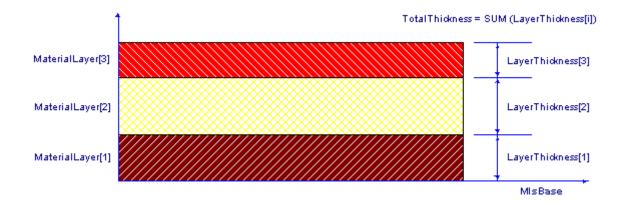


Abbildung 61 - Funktionsweise des Material Layer in IFC (buildingSMART, 2007)

Die MVD wird um das statische Konzept Material Layer erweitert. Das Konzept wird für Plattenbauteile angewandt, weshalb es von den Variablen Konzepten Structural Surface Member, Plate und Slab genutzt wird.

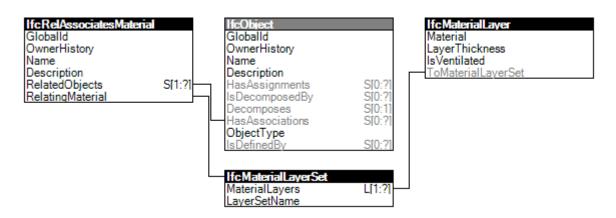


Abbildung 62 - IFC-Instanziierungsdiagramm zu Material Layer in IfcDoc

Es ist zu erwähnen, dass IfcMaterialLayer in IFC ursprünglich für die Erstellung von Bauteilschichten genutzt wird, die nicht für eine Tragwerksanalyse relevant sind. Hierzu gehören z.B. Deckenaufbauten mit Dämmschichten, Estrich und Parkett. Bei anderweitigen Verwendungen könnten Probleme beim Datenaustausch zwischen Fachebenen auftreten, die auf den ursprünglichen Verwendungszweck dieser Entität eingestellt sind (z.B. Bauphysik oder Bauausführungsplanung).

6.3.3 Bewehrung

Für die Structural Analysis Model sind keine Elemente vorgesehen, die Daten zur Bewehrung im Tragwerksmodell wiedergeben. Das IFC-Schema besitzt allerdings

Entitätstypen, die hierzu Informationen beinhalten. Der Entitätstyp *IfcReinforcingElement* besitzt die 4 Subtypen *IfcReinforcingBar*, *IfcReinforcingMesh*, *IfcTendon* und *IfcTendonAnchor*, die verschiedene Bewehrungsarten darstellen können.

Eine Implementierung dieser Elemente in das Structural Analysis Model gestaltet sich allerdings schwierig, da sie mit anderen Entitäten wie z.B. IfcStructuralMember oder IfcStructuralActivity interagieren sollen. Eine Verknüpfung zwischen Bewehrungselementen mit dem Structural Analysis Model wäre möglich über IfcRelAggregates. Demnach wird eine Entität vom Typ IfcReinforcingElement mit IfcStructuralMember in Relation gesetzt werden. IfcRelAggregates beschreibt, dass das Bewehrungselement innerhalb von IfcStructuralMember implementiert ist (siehe Abbildung).

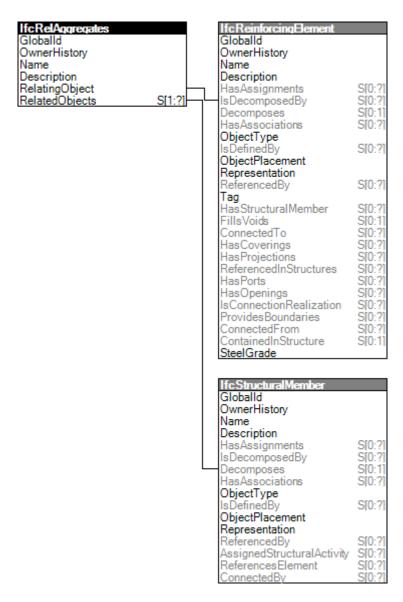


Abbildung 63 - IFC-Instanziierungsdiagramm zu Aggregates Reinforcing Bar in IfcDoc

Eine weitere Möglichkeit ist es, Bewehrungselemente als IfcStructuralConnection zu modellieren. Somit wären sie eine Art gelenkige Verbindung innerhalb des Bauteils. Dies käme dem mechanischen Verhalten eines Bewehrungselementes innerhalb des Structural Analysis Model am nächsten. IfcStructuralConnection müssen dafür allerdings die Entitäten IfcMaterial und gegebenenfalls IfcStructuralProfileProperties zugewiesen werden, da das Materialverhalten und der Stahldurchmesser bzw. die Profilierung der Bewehrung für eine Tragwerksanalyse wichtig sind. Anstatt IfcStructuralConnection mit IfcStructuralProfileProperties zu verknüpfen, bietet es sich an, eine Relation zwischen IfcStructuralConnection und IfcReinforcingElement herzustellen, da Parameter wie Nenndurchmesser und Rippung in IfcReinforcingElement vermerkt sind. Auch Vorspannkräfte von IfcTendon zur Modellierung von Spannstahl können dadurch entnommen werden.

6.3.4 Flächenlager

Flächengelenke können über die Entität *IfcStructuralSurfaceConnection* modelliert werden. Mit Hilfe der Lagerungsbedingungen, die das Attribut *AppliedCondition* deklariert, ist es möglich ein Flächenlager zu erstellen. Dies ist in der Tragwerksplanung meistens bei der Verwendung von Flächenfundamenten nötig.

In der Structural Analysis View werden Flächenverbindungen in dem optionalen Konzept Surface Connection Assignment angedeutet. Es ist mit dem Variablen Konzept Structural Surface Member verknüpft.

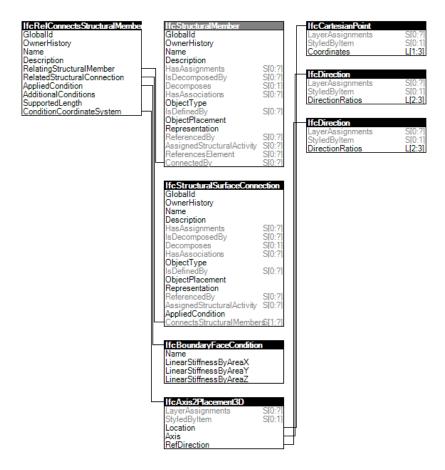


Abbildung 64 - IFC-Instanziierungsdiagramm zu Surface Connection Assignment in IfcDoc

Ebenso, wie für *IfcStructuralPointConnection* und *IfcStructuralCurveConnection* Variable Konzepte existieren, muss ein Konzept für *IfcStructuralSurfaceConnection* erstellen werden [siehe Anhang].

6.4 ERSTELLUNG DER MVD IN MVDXML

Basierend auf der Structural Analysis View und den erweiternden Konzepten, wird eine MVD in mvdXML erstellt. Dafür wird das Tool ifcDoc genutzt.

IfcDoc wurde von buildingSMART als Open-Source-Tool entwickelt. Es ermöglicht dem Nutzer, MVDs in mvdXML zu erstellen.⁵ Es werden anhand eines Express-Schemas die zu übertragenden Klassen und Attribute definiert.

Die Dateien werden im ifcdoc-Format gespeichert. Es besteht die Option, mehrere MVD's in einer Datei anzulegen. Diese können mit einer entsprechenden Anweisung als mvdXML-Dokument exportiert werden.

Das Tool ermöglicht außerdem eine Validation eines beliebigen Ifc-Modells an der MVD.

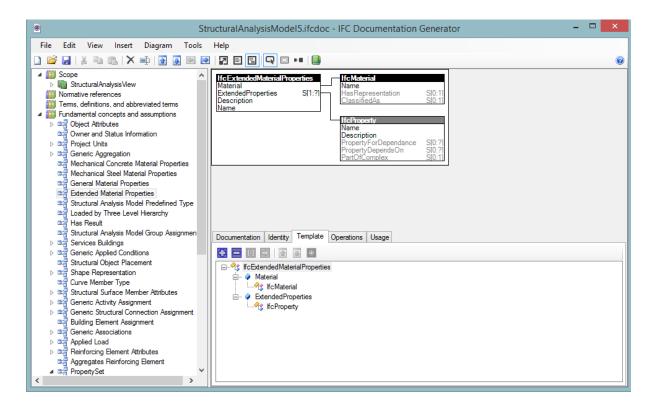


Abbildung 65 - Erstellung der MVD in ifcDoc

Folgende Konzepte sind in der MVD enthalten:

⁵ Programm zu finden unter: http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/specification-tools/ifcdoc-tool/ifcdoc-help-page

- Alle Konzepte der Structural Analysis View
- Konzept f
 ür IfcGeneralMaterialProperties
- Konzepte für IfcMechanicalMaterialProperties
- Konzept f
 ür IfcExtendedMaterialProperties
- Konzept für Material Layer
- Konzepte für Flächenverbindungen/-lager (IfcStructuralSurfaceConnection)
- Konzepte f
 ür Bewehrungselemente
- Konzepte für Property-Sets bezüglich Material, Vernetzung und Probabilitäts-Parameter

Ebenso werden 2 Exchange Requirements für den Austausch zwischen Tragwerksplanung und Berechnung sowie Berechnung und Statik-Software in die MVD implementiert.

7 VALIDIERUNG EINES IFC-MODELLS MITTELS MVD

Um die MVD auf ihre Korrektheit zu überprüfen, wird sie für die Validierung eines IFC-Modells verwendet. Als Beispiel-Modell wird hierfür die IFC-Datei VK150_Loads.ifc genutzt.

7.1 ALLGEMEINE INFORMATIONEN ZUM BEISPIEL-MODELL

VK150_Loads.ifc ist ein IFC-Modell, das einen Abschnitt der neuen Elbebrücke Wittenberge darstellt. Die Brücke führt über die Elbe und erstreckt sich über die Grenzen von Brandenburg und Sachsen-Anhalt, nahe der Stadt Wittenberge (Mansperger, et al., 2014). Das Projekt ist im Zuge der Bundesautobahn A14 geplant worden und soll neben einer bereits bestehenden Straßenbrücke errichtet werden (Wikipedia, 2015). Die Brücke besteht aus einer 696 Meter langen Vorlandbrücke aus Spannbeton, sowie einer 412 Meter langen Strombrücke. Die Gesamtlänge beträgt 1110,5 Meter (Mansperger, et al., 2014).



Abbildung 66 - Entwurf der Elbebrücke Wittenberge (Mansperger, et al., 2014)

Der Abschnitt, der in VK150_Loads.ifc modelliert wird, repräsentiert einen Bereich der Fahrbahnplatte zwischen zwei Querträgern und ist 3,20 Meter lang, sowie 3,60 Meter breit (Mansperger, et al., 2014). Das IFC-Projekt wurde gemäß nachfolgender Abbildung erstellt:

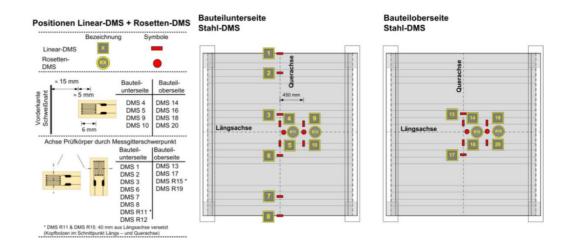


Abbildung 67 - Zu modellierender Bereich der Fahrbahnplatte (Mansperger, et al., 2014)

7.2 AUFBAU DES BEISPIEL-MODELLS

Das IFC-Modell VK150_Loads.ifc besitzt hauptsächlich Entitäten aus dem Structural Analysis Model. Entitäten aus dem Design-Model sind nicht vorhanden. Das Model orientiert sich hierbei an der IFC-Datei 3DModelRoadwayslab.ifc.

3DModelRoadwayslab.ifc beinhaltet eine Platte, die von zwei Querträgern gehalten wird. 4 Unterzüge an der Platte und je 2 Auflager an jeder Wand befestigen das Tragwerk (Siehe nachfolgende Abbildung).

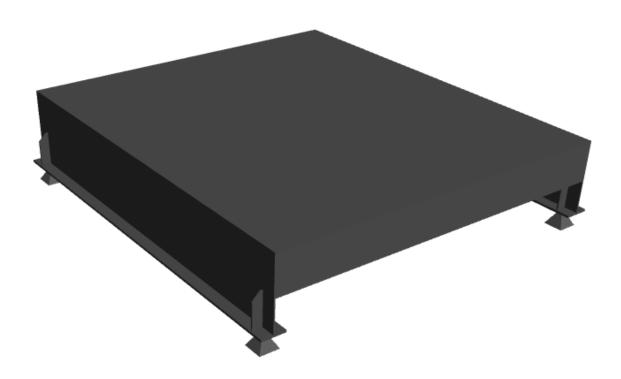


Abbildung 68 - Graphische Darstellung des IFC-Modell 3DModelRoadwayslab.ifc

Das Modell ist aus geometrischen Objekten aufgebaut, die durch den Entitätstyp IfcBuildingElementProxy klassifiziert sind. Dies liegt hauptsächlich daran, dass Objekte, wie z.B. die Auflager nicht mit dem Design-Modell modelliert werden können. Die meisten IFC-Viewer unterstützen Entitäten aus dem Structural Analysis Model nicht. Das Model dient deshalb, nur der Veranschaulichung des IFC-Modell VK150_Loads.ifc. Informationen wie z.B. Lasten oder Auflagerposition, die für die Tragwerksplaung relevant sind, sind nicht vermerkt.

Die Entitäten, die das Modell beinhaltet, sind in nachfolgender Liste zusammengefasst.

ID	Class Name	Parent Class	File1	Operations
1	IfcApplication	Ifc	1	html xml
2	IfcAxis2Placement3D	IfcPlacement	102	html xml
3	IfcBuilding	IfcSpatialStructureElement	1	html xml
4	IfcBuildingElementProxy	IfcBuildingElement	99	html xml
5	IfcBuildingStorey	IfcSpatialStructureElement	1	html xml
6	IfcCartesianPoint	IfcPoint	18406	html xml
7	IfcClosedShell	IfcConnectedFaceSet	99	html xml
8	IfcColourRgb	IfcColourSpecification	5	html xml
9	IfcConversionBasedUnit	IfcNamedUnit	1	html xml
10	IfcCurveStyle	IfcPresentationStyle	99	html xml
11	IfcDimensionalExponents	Ifc	1	html xml
12	IfcDirection	IfcGeometricRepresentationItem	202	html xml
13	IfcDraughtingPreDefinedColour	IfcPreDefinedColour	98	html xml
14	IfcDraughtingPreDefinedCurveFont	IfcPreDefinedCurveFont	99	html xml
15	IfcFace	IfcTopologicalRepresentationItem	3327	html xml
16	IfcFaceBound	IfcTopologicalRepresentationItem	77	html xml
17	IfcFaceOuterBound	IfcFaceBound	3327	html xml
18	IfcFacetedBrep	IfcManifoldSolidBrep	99	html xml
19	IfcGeometricRepresentationContext	IfcRepresentationContext	2	html xml
20	IfcGeometricRepresentationSubContext	IfcGeometricRepresentationContext	4	html xml
21	IfcLocalPlacement	IfcObjectPlacement	101	html xml
22	IfcMeasureWithUnit	Ifc	1	html xml
23	IfcOrganization	Ifc	1	html xml
24	IfcOwnerHistory	Ifc	1	html xml
25	IfcPerson	Ifc	1	html xml
26	IfcPersonAndOrganization	Ifc	1	html xml
27	IfcPolyLoop	IfcLoop	3404	html xml
28	IfcPresentationStyleAssignment	Ifc	99	html xml
29	IfcProductDefinitionShape	IfcProductRepresentation	99	html xml
30	IfcProject	IfcObject	1	html xml
31	IfcPropertySet	IfcPropertySetDefinition	99	html xml
32	IfcPropertySingleValue	IfcSimpleProperty	297	html xml
33	IfcRelAggregates	IfcRelDecomposes	2	html xml
34	IfcRelContainedInSpatialStructure	IfcRelConnects	1	html xml
35	IfcRelDefinesByProperties	IfcRelDefines	99	html xml
36	IfcShapeRepresentation	IfcShapeModel	99	html xml
	IfcSIUnit	IfcNamedUnit	5	html xml
38	IfcStyledItem	IfcRepresentationItem	99	html xml
39	IfcSurfaceStyle	IfcPresentationStyle	2	html xml
40	IfcSurfaceStyleRendering	IfcSurfaceStyleShading	2	html xml
	IfcUnitAssignment	Ifc	1	html xml
	Objects Number		30465	

Tabelle 3 - Entitäten des Modells 3DModelRoadwayslab.ifc

VK150_Loads.ifc repräsentiert das Modell 3DModelRoadwayslab.ifc und kann als Abbild des Modells aus Elementen des ST-4 angesehen werden. In nachfolgender Abbildung sind die Entitäten des IFC-Modells erfasst. Konstruktive Design-Elemente wie z.B. IfcSlab oder IfcWall existieren nicht, da das Modell für die Tragwerksanalyse konzipiert wurde. Dafür beinhaltet es Entitäten aus dem Structural Analysis Model.

ID	Class Name	Parent Class	File1	Operations
1	IfcApplication	Ifc	1	html[xml
2	• •	IfcPlacement	1	html xml
3	IfcAxis2Placement3D	IfcPlacement	1	html xml
4	IfcBoundaryFaceCondition	IfcBoundaryCondition	18	html xml
5	•	IfcBoundaryCondition	4	html xml
6	•	IfcSpatialStructureElement	1	html xml
7	_	IfcPoint	70	html xml
8	IfcCircleProfileDef	IfcParameterizedProfileDef	1	html xml
9	IfcDerivedUnit	Ifc	7	html xml
10		Ifc	15	html xml
			2	html xml
12		IfcTopologicalRepresentationItem		html xml
	_	IfcLoop	19	html xml
		IfcTopologicalRepresentationItem		html xml
		IfcFaceBound	23	html xml
		IfcProfileProperties	2	html xml
	IfcGeometricRepresentationContext	•	1	html xml
	·	IfcObjectPlacement	96	html xml
		Ifc	3	html xml
		Ifc	1	html xml
	-	IfcEdge	112	html xml
	-	Ifc	1	html xml
		Ifc	1	html xml
		Ifc	1	html xml
	_	IfcLoop	4	html xml
		IfcProductRepresentation	91	html xml
		Ifc	4	html xml
		IfcObject	1	html xml
	•	IfcParameterizedProfileDef	1	html xml
	•	IfcRelDecomposes	1	html xml
		IfcRelAssigns	19	html xml
		IfcRelAssociates	2	html xml
		IfcRelAssociates	2	html xml
		IfcRelConnects	4	html xml
	•	IfcRelConnects	138	html xml
		IfcRelConnects	1	html xml
	9	IfcNamedUnit	9	html xml
		IfcSystem	1	html xml
		IfcStructuralConnection	66	html xml
		IfcStructuralMember	2	html xml
		IfcGroup	18	html xml
	•	IfcStructuralLoadStatic	4	html xml
		IfcStructuralAction	4	html xml
		IfcStructuralConnection	4	html xml
		IfcStructuralConnection	1	html xml
		IfcStructuralMember	18	html xml
		IfcShapeModel	95	html xml
48		Ifc	1	html xml
	•	IfcVertex	52	html xml
43	Objects Number	HC V CI LCX	1027	Hallipilli
	Objects Nullibel		1027	

Tabelle 4 - Entitäten des Modells VK150_Loads.ifc

Die Platte, sowie Balken und Wände werden als Entität des Typs
IfcStructuralSurfaceMember modelliert, von denen es insgesamt 18 in der IFC-Datei gibt.
Die 4 Punktlager werden mit der Entität IfcSructuralPointConnection modelliert. Zusätzlich zu dem Model 3DModelRoadwayslab.ifc werden Flächenlasten erstellt, die auf das
Tragwerk einwirken. Bewehrungsstäbe wurden ebenfalls mit in ST-4 modelliert. Dabei lässt die Entität IfcStructuralCurveConnection als Bewehrungsstab nutzen.

7.3 VALIDIERUNG DES IFC-MODELLS MIT IFCDOC

Zur Validierung des IFC-Modells wird das Programm IfcDoc genutzt. Da es sich bei VK150_Loads.ifc um ein Modell handelt, das hauptsächlich Elemente des Structural Analysis Model beinhaltet, wird als anzuwendende Exchange Requirement der Austauschprozess zwischen Tragwerksplaner und numerischem Analyseprogramm gewählt.

Statisches Konzept	Validierung	Exchange
Statisches Konzept	validierung	Requirement
GUID	Erfolgreich	Obligatorisch
Name	Erfolgreich	Obligatorisch
Owner and Status Information	Fehlerhaft	Obligatorisch
Metric Project Units	Erfolgreich	Obligatorisch
Imperial Project Units	Nicht vorhanden	Obligatorisch
Aggregates Buildings	Erfolgreich	Obligatorisch
Aggregates Building Storeys	Nicht vorhanden	Optional
Aggregates Structural Analysis Models	Nicht vorhanden	Obligatorisch
Mechanical Concrete Material Properties	Nicht vorhanden	Optional
Mechanical Steel Material Properties	Nicht vorhanden	Optional
General Material Properties	Nicht vorhanden	Optional
Extended Material Properties	Nicht vorhanden	Optional
Structural Analysis Model Predefined Type	Erfolgreich	Obligatorisch
Loaded By Three Level Hierarchy	Fehlerhaft	Obligatorisch
Has Result	Nicht vorhanden	Optional
Structural Analysis Model Group Assignment	Nicht vorhanden	Obligatorisch
Structural Analysis Model Building Assignment	Erfolgreich	Obligatorisch

Structural Analysis Model Building Storey Assignment	Nicht vorhanden	Optional
Boundary Node Support Conditions	Erfolgreich	Optional
Boundary Edge Conditions	Nicht vorhanden	Optional
Boundary Face Conditions	Nicht vorhanden	Optional
Structural Object Placement	Fehlerhaft	Obligatorisch
Topological Straight Edge Representation	Erfolgreich	Optional
Topological Curve Edge Representation	Nicht vorhanden	Optional
Topological Face Representation Straight Edge	Nicht vorhanden	Optional
Topological Face Representation Curved Edge	Nicht vorhanden	Optional
Topological Vertex Representation	Erfolgreich	Optional
Curve Member Type	Erfolgreich	Optional
Surface Type	Erfolgreich	Optional
Thickness	Erfolgreich	Optional
Point Action Assignment	Nicht vorhanden	Optional
Linear Action Assignment	Nicht vorhanden	Optional
Planar Action Assignment	Erfolgreich	Optional
Structural Analysis Displacement	Nicht vorhanden	Optional
Structural Analysis Point Result	Nicht vorhanden	Optional
Curve Connection without Eccentricity Assignment	Fehlerhaft	Optional
Curve Connection with Eccentricity Assignment	Nicht vorhanden	Optional
Point Connection without Eccentricity Assignment	Fehlerhaft	Optional
Point Connection with Eccentricity Assignment	Nicht vorhanden	Optional
Surface Connection with Eccentricity Assignment	Fehlerhaft	Optional
Surface Connection without Eccentricity Assignment	Nicht vorhanden	Optional
Parametric Profil Name and Section Association	Erfolgreich	Optional
Material Name	Erfolgreich	Obligatorisch
Material Layer	Nicht vorhanden	Optional
Arbitrary Straight Edge Closed Profile Name and	Nicht vorhanden	Optional
Section Association	TAIGHT VOIHAHAGH	Οριιστίαι
Arbitrary Curved Edge Closed Profile Name and	Nicht vorhanden	Optional

Section Association		
Structural Profile Properties	Nicht vorhanden	Optional
Structural Steel Profile Properties	Nicht vorhanden	Optional
Single Force	Nicht vorhanden	Optional
Linear Force	Nicht vorhanden	Optional
Linear Force Varying	Nicht vorhanden	Optional
Planar Force	Erfolgreich	Optional
Planar Force Varying	Nicht vorhanden	Optional
PropertySet	Nicht vorhanden	Optional

Tabelle 5 - Validierte Konzepte von VK150_Loads.ifc

Bei bestimmten Konzepten sind relevante Entitäten zwar im Modell enthalten, allerdings treten bei einer vollständigen Validierung des Konzeptes Fehler auf, die auf nicht vorhandene Entitäten oder Verstöße von Constraints zurückzuführen sind. Teilweise wurden auch Entitäten, auf die sich bestimmte Konzepte beziehen, nicht in das Modell implementiert, obwohl es eine sinnvolle Erweiterung gewesen wäre. Auch für das Exchange Requirement obligatorische Konzepte werden dadurch nicht berücksichtigt.

7.4 KORREKTUR VON VALIDIERUNGSFEHLERN

Die Fehler, die bei der Validierung der einzelnen Konzepte auftraten, werden analysiert und für das Modell sind Korrekturvorschläge anzugeben.

7.4.1 Owner and Status Information

Da das Modell VK150_Loads.ifc lediglich für Testzwecke eingesetzt wird, sind Informationen bezüglich des Autors unvollständig ausgefüllt. Bei der Validierung wurde festgestellt, dass der Nachname des Autors nicht angegeben worden ist (siehe Abbildung).

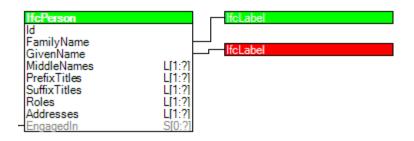


Abbildung 69 - Validierungsfehler von Owner and Status Information

Das statische Konzept VBL-156 Owner and Status Information, das in die MVD implementiert wurde, fordert, dass die Angabe des Nachnamens obligatorisch ist, um eine eindeutige Zurückführung auf den Autor im Falle einer Veröffentlichung zu ermöglichen (Lehtinen, 2000-2013). Der betreffende Code des STEP-Files lautet wie folgt:

```
#4 = IFCPERSON($, 'ali', $, $, $, $, $);
```

Die Zeile wird für eine korrekte Validierung umgeändert und ein Nachname hinzugefügt.

```
#4 = IFCPERSON($, 'ali', 'Nachname', $, $, $, $);
```

7.4.2 Loaded By Three Level Hierarchy

Das Konzept Loaded By Three Level Hierarchy ist darauf ausgelegt, dass die Gruppierung der mechanischen Aktivitäten über eine dreistufige Hierarchie abgehandelt wird. Somit beziehen sich eine Entität des Typs IfcStructuralLoadGroup über IfcRelAssignsToGroup auf eine andere Entität des Typs IfcStructuralLoadGroup und diese wiederum auf eine weitere IfcStructuralLoadGroup die sich letztendlich auf eine Entität des Subtyps IfcStructuralActivity bezieht. In dem Modell VK150_Loads.ifc sind die Entitäten IfcStructuralLoadGroup nur in einer zweistufigen Hierarchie strukturiert. Um bei der Validierung dem Konzept zu entsprechen, ist es ratsam eine zusätzliche Entität des Typs IfcStructuralLoadGroup als Platzhalter hinzuzufügen.

Ursprünglicher Code:

```
/* 0.5 MN / (0.32 m * 0.22 m) = 7.102 MN/m2 */
#4321 = IFCSTRUCTURALLOADPLANARFORCE('Vehicle',$,$,-7.102);
#4331 = IFCLOCALPLACEMENT($, #41);

#4341 = IFCSTRUCTURALPLANARACTION('3pZzagv8T0ofaeuInPZW_t',#2,'Planar action','Variable load at top surface
left',$,#4331,#4315,#4321,.GLOBAL_COORDS.,.F.,$,.TRUE_LENGTH.);

#4351 =
IFCRELCONNECTSSTRUCTURALACTIVITY('0LLXBt1cf8AxMv733Dw9PN',#2,$,$,#2051,#4341);

#4361 = IFCSTRUCTURALLOADGROUP('3gunlIPiL6SBKL9DuiLHqy',#2,'Variable loads',$,$,.LOAD_CASE.,.VARIABLE_Q.,.LIVE_LOAD_Q.,$,$);

#4362 =
IFCRELASSIGNSTOGROUP('1Zn4BKhdT3gROgscn19Nwc',#2,$,$,(#4341),$,#4361);

#4371 = IFCSTRUCTURALLOADGROUP('3IGBKMOa14H8VWkDYHTPMF',#2,'Variable loads serviceable',$,$,.LOAD_COMBINATION_GROUP.,.VARIABLE_Q.,.NOTDEFINED.,1.0,$);
```

```
#4372 =
IFCRELASSIGNSTOGROUP('0oal8j7HD7Nh09Wn0WMAIh', #2,$,$,(#4361),$,#4371);
#4381 = IFCSTRUCTURALLOADGROUP('2gyi5lADH0l0E43H_5JRCQ', #2,'Variable loads
ultimate',$,$,.LOAD_COMBINATION_GROUP.,.VARIABLE_Q.,.NOTDEFINED.,1.5,$);
#4382 =
IFCRELASSIGNSTOGROUP('12n1SWZMLDGfzAwKGR18vd', #2,$,$,(#4361),$,#4381);
```

Korrektur:

```
/* 0.5 MN / (0.32 \text{ m} * 0.22 \text{ m}) = 7.102 \text{ MN/m2} */
#4321 = IFCSTRUCTURALLOADPLANARFORCE('Vehicle', $, $, -7.102);
#4331 = IFCLOCALPLACEMENT(\$, #41);
#4341 = IFCSTRUCTURALPLANARACTION('3pZzaqv8T0ofaeuInPZW t',#2,'Planar
action','Variable load at top surface
left', $, #4331, #4315, #4321, .GLOBAL COORDS., .F., $, .TRUE LENGTH.);
#4351 =
IFCRELCONNECTSSTRUCTURALACTIVITY('0LLXBt1cf8AxMv733Dw9PN', #2,$,$,#2051,#434
#4361 = IFCSTRUCTURALLOADGROUP('3qunlIPiL6SBKL9DuiLHqy',#2,'Variable
loads',$,$,.LOAD CASE.,.VARIABLE Q.,.LIVE LOAD Q.,$,$);
#4362 =
IFCRELASSIGNSTOGROUP('1Zn4BKhdT3gROgscn19Nwc', #2, $, $, (#4341), $, #4361);
#4371 = IFCSTRUCTURALLOADGROUP('3IGBKmOa14H8VWkDYHTPMF', #2,'Variable loads
serviceable', $, $, .LOAD COMBINATION GROUP.,.VARIABLE Q.,.NOTDEFINED., 1.0, $);
#4372 =
IFCRELASSIGNSTOGROUP('0oaL8j7HD7Nh09WnOWMAIh',#2,$,$,(#4361),$,#4371);
#4381 = IFCSTRUCTURALLOADGROUP('2qvi51ADH010E43H 5JRCO', #2, 'Variable loads
ultimate', $, $, .LOAD COMBINATION GROUP., .VARIABLE_Q., .NOTDEFINED., 1.5, $);
#4382 =
IFCRELASSIGNSTOGROUP('12n1SWZMLDGfzAwKGR18vd',#2,$,$,(#4361),$,#4381);
IFCSTRUCTURALLOADGROUP('3gyi5lADH0lOE43H 5JRCQ', #2, 'Dummy', $, $, .NOTDEFINED.
,$,$,$,$);
#4392 =
ifcrelassignstogroup('22n1swzmldgfzawkgr18vd',#2,$,$,(#4381),$,#4391);
```

7.4.3 Structural Object Placement

Gemäß des statischen Konzeptes VBL-202 Structural Object Placement, das in die MVD implementiert wurde, muss die Position jedes Objektes innerhalb von St-4, auf die gleiche Entität IfcLocalPlacement verweisen. Dies kann z.B. IfcLocalPlacement von IfcBuilding oder IfcBuildingStorey sein. Eine Verknüpfung dazu wird über das Attribut PlacementRelTo hergestellt. Bei der Validierung des Modells wurde erkannt, dass diese Verknüpfung nicht berücksichtigt wird (siehe Abbildung).

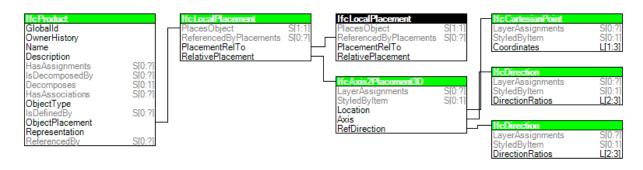


Abbildung 70 - Validierung von Structural Object Placement

Demzufolge muss der Code entsprechend umgeändert und das entspreche IfcLocalPlacement dem Attribut PlacementRelTo zugewiesen werden.

Ursprünglicher Code:

```
#9995 = IFCLOCALPLACEMENT($, #41);

#242 = IFCSTRUCTURALPOINTCONNECTION('346G8YKmD0hQZZJj1S5E8K', #2,
'SPC.242', $, $, #9701, #241, #9702);

#9701 = IFCLOCALPLACEMENT($, #41);
```

Korrektur:

```
#9995 = IFCLOCALPLACEMENT($,#41);

#242 = IFCSTRUCTURALPOINTCONNECTION('346G8YKmD0hQZZJj1S5E8K', #2,
'SPC.242', $, $, #9701, #241, #9702);

#9701 = IFCLOCALPLACEMENT(#9995, #41);
```

7.4.4 Generic Structural Connection Assignment

Bei der Deklaration der Entitäten vom Supertypen IfcStructuralConnection treten Validierungsfehler auf. Zum einen werden die Lagerbedingungen nur innerhalb der Entität durch das Attribut AppliedCondition bestimmt. Eine zusätzliche Deklaration, wie es über IfcRelConnectsStructuralMember der Fall sein kann, wird nicht vorgenommen. Auch eine Definition des Koordinatensystems, auf die sich die Entitäten beziehen sollen, fehlt. Dies würde über das Attribut ConditionCoordinateSystem festgelegt werden. Für eine Optimierung des Modells sollte diese Entitäten und Attribute implementiert werden.

Ursprünglicher Code:

```
#242 = IFCSTRUCTURALPOINTCONNECTION('346G8YKmD0hQZZJj1S5E8K', #2, 'SPC.242', $, $, #9701, #241, #9702);

#9701 = IFCLOCALPLACEMENT($, #41);

#9702 = IFCBOUNDARYNODECONDITION($, -1.0, -1.0, -1.0, -1.0, -1.0, -1.0);

#9703 = IFCRELCONNECTSSTRUCTURALMEMBER('2$$XF$Hb9EXvMozU5UYuwg', #2, $, $, #1303, #242, $, $, $, $);
```

Korrektur:

```
#41 = IFCAXIS2PLACEMENT3D(#42, #43, #9999);

#42 = IFCCARTESIANPOINT((0.E-1, 0.E-1, 0.E-1));

#43 = IFCDIRECTION((0.E-1, 0.E-1, 1.));

#9999 = IFCDIRECTION((1., 0., 0.));

#242 = IFCSTRUCTURALPOINTCONNECTION('346G8YKmD0hQZZJj1S5E8K', #2, 'SPC.242', $, $, #9701, #241, #9702);

#9701 = IFCLOCALPLACEMENT($, #41);

#9702 = IFCBOUNDARYNODECONDITION($, -1.0, -1.0, -1.0, -1.0, -1.0);

#9703 = IFCRELCONNECTSSTRUCTURALMEMBER('2$$XFsHb9EXvMozU5UYuwg', #2, $, $, #1303, #242, #9702, $, $, #41);
```

7.5 ÜBERTRAGUNG DES BEISPIELMODELLS IN ATENA

Basierend auf VK150_Loads.ifc wurde eine Datei im ATENA-Input-Format erstellt. Die Materialparameter werden nicht über entsprechende Entitäten des Typs IfcMaterialParameter übernommen, sondern über den Namen von IfcMaterial. So werden z.B. Parameter des Bewehrungsstahls über den Namen "S 355 (DIN 18800)" hergeleitet. Jede Entität des Typs IfcStructuralMember wird als GEOMETRY-Objekt in ATENA deklariert und die Topologie wird über die Befehle vertex, curve und surface von T3D bestimmt. Die

Belastungskräfte werden über MACRO_JOINT COORDINATES und eine anschließende Listengruppierung inklusive Festlegung der Kraftgröße definiert.

7.6 ERGÄNZUNGEN DES BEISPIELMODELLS

Bei der Validierung wird festgestellt, dass bestimmte Entitäten und Relationen zueinander in dem Beispielmodell nicht existieren und Konzepte nicht berücksichtigt sind. Um das Modell für einen Datenimport zu ATENA zu optimieren, werden nachfolgend Erweiterungsoptionen erläutert.

7.6.1 Aggregates Structural Analysis Models

Über das Konzept Aggregates Structural Analysis Models lässt sich feststellen, ob die Entität IfcStructuralAnalysisModel mit einem Gebäude, das über die Entität IfcBuilding modelliert wird, über IfcRelAggregates miteinander verknüpft ist. Zwar wird dies auch über IfcRelServicesBuilding bewerkstelligt. Allerdings wäre hierdurch nicht direkt in einer Entität einsehbar, welche Structural Analysis Modelle ein Gebäude besitzt. Durch eine zusätzliche Berücksichtigung des Konzepts Aggregates Structural Analysis Models kann außerdem die Wahrscheinlichkeit verringert werden, dass die entsprechenden Informationen im Austauschprozess verloren gehen, da die Informationen doppelt belegt sind. Eine Erweiterung des Beispielmodells sieht folgendermaßen aus:

#9990 = IFCRELAGGREGATES('4p4qX1nyv35wi7Fqi1XeTa', #2,\$,\$,#9994,(#44));

7.6.2 Materialparameter im Beispielmodell

Im Beispielmodell sind keine Materialparameter über eine Entität des Supertyps
IfcMaterialParameter definiert. Die einzige Information zum Material findet sich in der Entität
IfcMaterial, bei der der Materialname belegt ist. Basierend auf diesem Namen können
manche Programme, wie z.B. ATENA, Materialeigenschaften herleiten. Es kann allerdings
vorkommen, dass das Programm, den Materialnamen nicht in der Datenbank hinterlegt hat
oder Materialeigenschaften generell nicht aus dem Namen hergeleitet werden können. Für
eine sichere Übernahme der Materialinformationen bei einem Datenaustausch wird der
Einsatz von Entitäten des Typs IfcMaterialProperties und zur weiteren Ergänzung von
Property-Sets oder IfcExtendedMaterialProperties empfohlen.

Eine beispielhafte Erweiterung des Modells VK150_Loads.ifc sieht folgendermaßen aus.

Materialeigenschaften aus dem Input-File von ATENA:

```
// Material definition

MATERIAL ID 45 NAME "S 355 (DIN 18800)" TYPE "CC3DBiLinearSteelVonMises"

E 2.000000e+05

MU 3.000000e-01

RHO 7.850000e-03

ALPHA 1.200000e-05

YIELD 2.000000e+02

HARDENING 1.000000e+04

IDEALISATION 3D
```

Erweiterung des IFC-Modells:

```
#45 = IFCMATERIAL('S 355 (DIN 18800)');

#46 = IFCRELASSOCIATESMATERIAL('1mon5mmnx7fr4wmlxiKj$n', #2, $, $,
    (#1303),#45);

#444 = IFCMECHANICALSTEELMATERIALPROPERTIES(#45, $, 2.000000e+05, $,
    3.000000e-01, 1.200000e-05, 2.000000e+02, $, $, 1.000000e+04, $, $, $);

#445 = IFCGENERALMATERIALPROPERTIES(7.850000e-03, $, $);
```

7.6.3 Structural Analysis Group Assignment

Bei Verwendung von mehreren Structural Analysis Modellen ist es wichtig, dass alle Entitäten von ST-4 der entsprechenden Entität IfcStructuralAnalysisModel zugeordnet werden. Dies geschieht über IfcRelAssignsToGroup. Eine Erweiterung des Beispielmodells sieht wie folgt aus (in folgendem Beispiel wird nur IfcStructuralCurveConnection mit IfcStructuralAnalysisModel verknüpft):

```
#44 = IFCSTRUCTURALANALYSISMODEL('3hld1xnMb9fw5SHFcEetfh', #2, 'VK150 with loads', $, $, .LOADING_3D., $, (#5001, #5011, #5021, #5101, #5111, #5121), $);
#1051 = IFCSTRUCTURALCURVECONNECTION('34jmDOJOD7SBDlJMuTLI1$', #2, 'SCC.1051', $, $, #9817, #1050, $);
#1001 =
IFCRELASSIGNSTOGROUP('17eG10lmf6qxY2rRyTlyOf', #2, $, $, (#1051), $, #44);
```

8 AUFTRETENDE PROBLEME DER MVD

Bei der Erstellung der MVD müssen einige Probleme berücksichtigt werden, die aufgrund des Formats mvdXML, sowie den Austauschanforderungen zwischen ATENA und dem Structural Analysis Model auftreten können.

8.1 AUSTAUSCHPROBLEME ZWISCHEN STRUCTURAL ANALYSIS MODEL UND ATENA

Das Structural Analysis Model unterstützt nur statische Tragwerksberechnungen. Eine Deklaration dynamischer Prozesse kann nicht erfolgen.

Es können außerdem Interoperabilitätsprobleme bei Auflagerdaten auftreten, da die Auflager in beiden Domänen auf verschiedene Art und Weise modelliert werden. In ST-4 wird ein Auflager als Gelenk über die Entität IfcStructuralConnection definiert. Über das Attribut AppliedCondition werden die Lagerbedingungen festgelegt. In ATENA wird das Auflager als entgegengesetzte mechanische Kraft modelliert.

Vorspannkräfte können in ST-4 nicht als mechanische Aktivität über IfcStructuralLoad hinterlegt werden. Will man einem Element, das Spannstahl darstellen soll, eine Vorspannkraft zuweisen, so muss dies über ein Property-Set geschehen. Die Kraftrichtung orientiert sich an der Lage des Stahls.

Bewehrung ist als eigenständige Entität in ST-4 nicht repräsentiert. Ein Datenaustausch von Bewehrungsparametern kann nur über die Nutzung von IfcReinforcingElement oder über IfcStructuralConnection als Bewehrungsersatz vonstattengehen. Bei letzterer Methode müssen zusätzliche Property-Sets genutzt werden.

8.2 PROBLEME DURCH ATENA

ATENA ist für eine nicht-lineare Tragwerksanalyse konzipiert worden. Gemäß der Aufgabenstellung soll eine Unterstützung einer probabilistischen Analyse durch Property-Sets in IFC ermöglicht werden. Eine Verwendung dieser, ist in ATENA allerdings nicht möglich. Für eine probabilistische Analyse wurde von Červenka Consulting das Programm SARA entwickelt.

8.3 PROBLEME DES FORMATS MVDXML

Die Property-Sets die für den Datenaustausch zwischen IFC und ATENA erstellt wurden, können in einem IFC-Modell zusammen mit Property-Sets aus anderen Fachebenen

enthalten sein. In einer MVD sollten allerdings ausschließlich die Property-Sets berücksichtigt werden, die für den jeweiligen Datenaustausch relevant sind. Aus diesem Grund sind Constraints in der mvdXML-Datei einzuführen, die nur nach den Property-Sets mit bestimmten Namen filtern. Siehe hierzu nachfolgendes Beispiel:

```
<ConceptTemplate uuid="6cffd2ea-ff18-4fc9-a674-1b01af43a281"</pre>
name="Pset MaterialCementitious" applicableSchema="IFC4"
applicableEntity="IfcObject">
                                <Rules>
                                       <AttributeRule AttributeName="IsDefinedBy"</pre>
Cardinality="_asSchema">
                                              <EntityRules>
                                                    <EntityRule EntityName="IfcRelDefinesByProperties"</pre>
Cardinality="_asSchema">
                                                           <AttributeRules>
                                                                 <AttributeRule
AttributeName="RelatingPropertyDefinition" Cardinality=" asSchema">
                                                                       <EntityRules>
                                                                              <EntityRule EntityName="IfcPropertySet"</pre>
Cardinality=" asSchema">
                                                                                    <AttributeRules>
                                                                                          <a href="Name" Name" <a href="Name" Name" Name" <a href="Name" Name" Name" Name | Name
Cardinality=" asSchema">
                                                                                                <EntityRules>
                                                                                                       <EntityRule EntityName="IfcLabel"</pre>
Cardinality=" asSchema">
                                                                                                              <Constraints>
                                                                                                                    <Constraint
Expression="Value='Pset MaterialCementitious'" />
                                                                                                              </Constraints>
                                                                                                        </EntityRule>
                                                                                                  </EntityRules>
                                                                                           </AttributeRule>
                                                                                    </AttributeRules>
                                                                              </EntityRule>
                                                                        </EntityRules>
                                                                 </AttributeRule>
                                                           </AttributeRules>
                                                    </EntityRule>
                                              </EntityRules>
                                       </AttributeRule>
                                 </Rules>
                          </ConceptTemplate>
```

Das Konzept definiert ein Property-Set mit einem Constraint, das besagt, dass der Name "Pset_MaterialCementitious" sein muss. In mvdXML ist es leider nicht möglich, mehrere Constraints in einem Konzept zu definieren, die sich auf unterschiedliche Entitäten beziehen sollen. Wird die MVD zur Filterung von Entitäten genutzt, stellt dies kein Problem dar. Für eine Validierung ist dies allerdings problematisch, da das Konzept als validiert angesehen wird, sobald eine Entität die Bedingungen erfüllt.

Eine Fallunterscheidung wann ein Konzept obligatorisch ist und wann optional kann ebenfalls nicht in mvdXML deklariert werden. So sind Property-Sets, die sich auf Bewehrungsmaterial beziehen, obligatorisch, wenn eine Entität des Typs IfcReinforcingElement vorhanden ist. Ansonsten sind sie optional.

9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

9.1 ZUSAMMENFASSUNG DER DIPLOMARBEIT

Das Structural Analysis Model ist eine Erweiterung der IFC-Struktur zur Beschreibung von Tragwerksmodellen und der Einbindung der Tragwerksplanung in den Informationsprozess. Eine Nutzung dieser Informationen erfordert eine Importierung der Daten aus ST-4 in ein Tragwerksanalyse-Programm, sowie eine entsprechende Exportierung der Ergebnisse. Um diesen Datenaustausch zu optimieren, bietet es sich an, eine Model View Definition zu erstellen. Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es, eine MVD zu deklarieren, die alle wichtige Informationen des Austauschszenarios zwischen IFC-Modell und Tragwerksprogramm beinhaltet.

Als Tragwerksanalyse-Programm, an das die Informationen eines IFC-Modells übergeben werden sollen, wird ATENA genutzt.

Eine Überprüfung der Eingabeparameter von ST-4 und ATENA zeigt, dass für einen Datenaustausch bestimmte Informationen im IFC-Modell fehlen, die für eine Tragwerksanalyse in ATENA benötigt werden. Dies wären zum einen Materialparameter, die durch die Subtypen von IfcMaterialProperties nicht ausreichend abgedeckt werden. Zum anderen ist eine Beschreibung des verwendeten FEM-Netzes in IFC nicht möglich. Die fehlenden Parameter können mit Hilfe von Property-Sets in ein IFC-Modell implementiert werden.

Die MVD wird als mvdXML-Datei erstellt. Sie orientiert sich dabei an der bereits existierenden MVD Structural Analysis View. Die relevanten Entitäten, wie IfcStructuralAnalysisModel, Subtypen von IfcStructuralMember und IfcStructuralConnection, sowie IfcStructuralAction werden in der MVD berücksichtigt. Erweiternd werden Konzepte eingeführt, die die erstellten Property-Sets und Material Layer zur Modellierung von Objekten des Typs Macroelement Shell in ATENA unterstützen. Da in ST-4 keine Bewehrungselemente deklarierbar sind, müssen Entitäten des Typs IfcStructuralConnection als Ersatz verwendet werden. Entsprechend muss eine Verknüpfung mit IfcMaterial und

Subtypen von IfcReinforcingElement erfolgen. Da die Structural Analysis View das Austauschszenario zwischen Design-Modell und Tragwerksmodell nicht unterstützt, werden außerdem Variable Konzepte eingeführt, die die relevanten konstruktiven Elemente beschreiben.

Es werden zwei Exchange Requirements in der MVD erstellt, die zum einen den Datenaustausch zwischen Design-Modell und Tragwerksmodell und zum anderen zwischen Tragwerksmodell und Tragwerksanalyse-Software unterstützen.

Die MVD wird zur Validierung eines IFC-Beispielmodells genutzt. Dabei wird festgestellt, dass in dem Modell Entitäten zur Beschreibung des Materials fehlen und die Entitäten aus ST-4 nicht IfcStructuralAnalysisModel zugewiesen wurden. Das Beispielmodell wird entsprechend erweitert und Validierungsfehler werden behoben.

9.2 AUSBLICK

Statik-Programme wie die von SOFiSTiK unterstützen bereits den Im- und Export von IFC-Modellen. Die Selektion der Parameter, die für die Tragwerksplanung relevant sind, geschieht über programminterne Filtermethoden und nicht über eine MVD im mvdXML-Format. Die Austauschbedingungen sind somit nicht vom Benutzer einsehbar und können nicht bearbeitet werden.

Durch den Einsatz einer mvdXML-Datei im Bereich der Tragwerksplanung lässt sich diese Problematik lösen. Der Benutzer erhält die Möglichkeit die Parameter, die beim Datenaustausch teilnehmen, zu bestimmen. Außerdem ist ein Im- und Export von mvdXML-Dateien unabhängig vom anzuwendenden Programm möglich. Die vorliegende MVD wurde zwar für einen Datenaustausch mit ATENA optimiert, allerdings kann das Schema einfach verändert bzw. erweitert werden und für andere Software nutzbar sein. In der gegenwärtigen Entwicklungssituation werden MVD's lediglich zur Validierung von IFC-Modellen für einen bevorstehenden Datenexport eingesetzt. Als Validierungsprogramme werden z.B. ifcDoc oder etwaige Testserver genutzt. Sie können in Zukunft aber auch für Schnittstellen zwischen IFC und Statik-Software genutzt werden. Es ist diesbezüglich ein Programm zu entwickeln, dass die MVD einliest und anschließend mittels Filtermethoden ein Sub-Modell erstellt. Dieses kann daraufhin für Tragwerksanalysen genutzt werden.

Für eine geeignete Verwendung im Bereich der Tragwerksanalyse sind jedoch auch Erweiterungen der IFC-Struktur vonnöten. Viele Programme beziehen Bewehrungselemente in die FEM-Modelle ein. Allerdings ist in ST-4 noch keine Bewehrung implementiert. Zwar

existieren in IFC Entitäten wie IfcReinforcingElement, allerdings sind diese nicht für einen Gebrauch in statischen Berechnungen ausgelegt. Auch die Tragwerksanalyse von Spannbeton gestaltet sich ohne eine angemessene Modellierung des Spannstahls in ST-4 als problematisch.

Die IFC-Struktur muss nicht zwingend um neue Materialparameter erweitert werden, da deren Verwendung sich bei Statik-Software unterscheidet und durch Property-Sets hinzugefügt werden können. Eine umfangreichere Auswahl an Parametern die in der IFC-Struktur bereits vorhanden sind, wäre dennoch vorteilhaft.

Weiterhin problematisch gestaltet sich die Verwendung von IFC-Modellen für Tragwerksanalysen mit dynamischen Einwirkungen. Auch FEM-Netze können standardmäßig nicht modelliert werden. Ein Ansatz einer Erweiterung der IFC-Struktur ist mit ST-7 erstellt worden. Allerdings wurde sie nie fertiggestellt oder veröffentlicht.

10 LITERATURVERZEICHNIS

Bazant Zdenek P. [et al.] MICROPLANE MODEL M4 FOR CONCRETE. I: FORMULATION WITH WORK-CONJUGATE DEVIATORIC STRESS [Report]. - [s.l.]: Journal of Engineering Mechanics, 2000.

buildingSMART http://www.buildingsmart.de/bim-know-how/standards [Online] // http://www.buildingsmart.de/bim-know-how/standards. - buildingSMART. - 21. September 2015. - http://www.buildingsmart.de/bim-know-how/standards.

buildingSMART http://www.buildingsmart-tech.org [Online] // http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-releases. - 2015 йил. - 2015 йил 4-Juni. - http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-releases.

buildingSMART IFC2x Edition 3 Technical Corrigendum 1 [Online] // IFC2x Edition 3 Technical Corrigendum 1. - buildingSMART, 2007. - 7. November 2015. - http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC2x3/TC1/html/.

buildingSMART MVD Overview summary [Online] // BuildingSmart. - BuildingSmart, 2015. - 2015. - http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/mvd-overview.

CADFEM-wiki http://www.esocaet.com/wikiplus/index.php/FEM_Handrechnung_4_1 [Online] // http://www.esocaet.com/wikiplus/index.php/FEM_Handrechnung_4_1. - esocaet, 13. April 2014. - 8. November 2015. -

http://www.esocaet.com/wikiplus/index.php/FEM_Handrechnung_4_1.

Cervenka Consulting http://www.cervenka.cz/products/atena/ [Online] // http://www.cervenka.cz/products/atena/. - Cervenka Consulting, 2015. - 7. Juli 2015. - http://www.cervenka.cz/products/atena/.

Červenka Vladimir und Červenka Jan User's Manual for ATENA 3D Version 5.1.1 [Bericht]. - Prag: Červenka Consulting, 2014.

Červenka Vladimír, Červenka Jan und Jendele Libor ATENA Program Documentation Part 1 Theory [Bericht]. - Prag : [s.n.], 2014.

Chipman Tim, Liebich Thomas und Weise Matthias mvdXML specification 1.0 [Bericht]. - 2012.

CIMNE http://www.gidhome.com/ [Online] // http://www.gidhome.com/. - CIMNE International Center for Numerical Methods in Engineering, 2015 йил. - 2015 йил 24-Juni. - http://www.gidhome.com/.

Hietanen Jiri IFC Model View Definition Format [Bericht]. - 2008.

http://cib.bau.tu-dresden.de/icss/structural-papers/meetings/structural_papers.html
http://cib.bau.tu-dresden.de/icss/structural-papers/meetings/structural_papers.html [Online] //
http://cib.bau.tu-dresden.de/icss/structural-papers/meetings/structural_papers.html. - 2015
йил 4-Juni.

Lehtinen Sakari http://www.blis-project.org/IAI-

MVD/reporting/showConcept.php?CREF=MVC-844 [Online] // http://www.blis-project.org/IAI-MVD/reporting/showConcept.php?CREF=MVC-844. - BLIS Consortium (www.blis-project.org), 2000-2013. - 11. Oktober 2015. - http://www.blis-project.org/IAI-MVD/reporting/showConcept.php?CREF=MVC-844.

Lehtinen Sakari http://www.buildingsmart-tech.org/downloads/view-definitions/structural-analysis-view/StructuralAnalysisView_IFC2x3_Binding.pdf [Online] // http://www.buildingsmart-tech.org/downloads/view-definitions/structural-analysis-view/StructuralAnalysisView_IFC2x3_Binding.pdf. - BuildingSmart, 2008. - 16. August 2015. - http://www.buildingsmart-tech.org/downloads/view-definitions/structural-analysis-view/StructuralAnalysisView_IFC2x3_Binding.pdf.

Lehtinen Sakari und Hietanen Jiri http://www.buildingsmart-tech.org/downloads/view-definitions/structural-analysis-view/StructuralAnalysisView_Overview.pdf [Online] // http://www.buildingsmart-tech.org/downloads/view-definitions/structural-analysis-view/StructuralAnalysisView_Overview.pdf. - Tampere University of Technology, 2007-2008. - 31. Juli 2015. - http://www.buildingsmart-tech.org/downloads/view-definitions/structural-analysis-view/StructuralAnalysisView_Overview.pdf.

Liebich T. [et al.] http://www.buildingsmart-tech.org/downloads/accompanying-documents/formats/mvdxml-documentation/ [Online] // http://www.buildingsmart-tech.org. - BuildingSmart, 19. 06 2011. - 07. 02 2015. - http://www.buildingsmart-tech.org/downloads/accompanying-documents/formats/mvdxml-documentation/.

Liebich Thomas [et al.] D+ Information Delivery Manual Work Within HESMOS [Bericht]. - 2013.

Mansperger Tobias, Cervenka Jan und Ismail Ali SE-LAB - D5-1 Validation Procedure Report [Bericht]. - [s.l.]: eurostars, 2014.

Nielsen Anne Kathrine and Madsen Søren Structural modelling and analysis using BIM tools [Report]. - Aalborg: Aalborg University, 2010.

Scherer Raimar J. und Schapke Sven-Eric Informationssysteme im Bauwesen 1: Modelle, Methoden und Prozesse [Buch]. - [s.l.]: Springer-Verlag, 2014. - ISBN/ISSN: 3642408834 / 9783642408830.

SOFiSTiK http://www.sofistik.de/newsletter/sofistik-newsletter-042010/#c2427 [Online] // http://www.sofistik.de/newsletter/sofistik-newsletter-042010/#c2427. - SOFiSTiK, April 2010. - 22. September 2015. - http://www.sofistik.de/newsletter/sofistik-newsletter-042010/#c2427.

SOFiSTiK http://www.sofistik.de/newsletter/sofistik-newsletter-122008/#c1999 [Online] // http://www.sofistik.de/newsletter/sofistik-newsletter-122008/#c1999. - SOFiSTiK, Dezember 2008. - 22. September 2015. - http://www.sofistik.de/newsletter/sofistik-newsletter-122008/#c1999.

SolidWorks

https://www.solidline.de/fileadmin/user_upload/content/Referenzen_Ratgeber/Simulation/Die_nicht-lineare_Analyse.pdf [Online] //

https://www.solidline.de/fileadmin/user_upload/content/Referenzen_Ratgeber/Simulation/Die_nicht-lineare_Analyse.pdf. - SolidWorks. - 3. November 2015. -

https://www.solidline.de/fileadmin/user_upload/content/Referenzen_Ratgeber/Simulation/Die_nicht-lineare_Analyse.pdf.

Suermann Patrick C. und Issa Raja R.A. The US National Building Information Modeling Standard [Buch]. - 2010.

Thum Andrea http://scienceblogs.de/andererseits/2010/08/17/statistik-fur-anfanger-der-ttest/ [Online] // http://scienceblogs.de/andererseits/2010/08/17/statistik-fur-anfanger-der-ttest/. - 17. August 2010. - 5. November 2015. -

http://scienceblogs.de/andererseits/2010/08/17/statistik-fur-anfanger-der-ttest/.

Voigt Jana http://www.uni-

siegen.de/fokos/organisation/images/goris_voigt_sicherheit_von_bauwerken.pdf [Online] // http://www.uni-

siegen.de/fokos/organisation/images/goris_voigt_sicherheit_von_bauwerken.pdf. - Universität Siegen, 12. Februar 2012. - 5. November 2015. - http://www.unisiegen.de/fokos/organisation/images/goris_voigt_sicherheit_von_bauwerken.pdf.

Weise Matthias [et al.] Structural Analysis Extension of the IFC Modelling Framework [Report]. - [s.l.]: e-journal ITcon, 2003.

Wikipedia https://de.wikipedia.org/wiki/Elbebr%C3%BCcke_Wittenberge_(Stra%C3%9Fe) [Online] // https://de.wikipedia.org/wiki/Elbebr%C3%BCcke_Wittenberge_(Stra%C3%9Fe). - 20. März 2015. - 29. Oktober 2015. -

 $https:/\!/de.wikipedia.org/wiki/Elbebr\%C3\%BCcke_Wittenberge_(Stra\%C3\%9Fe).$

Wikipedia https://de.wikipedia.org/wiki/Finite-Elemente-Methode [Online] // https://de.wikipedia.org/wiki/Finite-Elemente-Methode. - Wikipedia, 28. Juni 2015. - 13. August 2015. - https://de.wikipedia.org/wiki/Finite-Elemente-Methode.

Wix Jeffrey http://projects.buildingsmartalliance.org/files/?artifact_id=1606 [Online] // http://projects.buildingsmartalliance.org. - BuildingSmart. - 07. 02 2015. - http://projects.buildingsmartalliance.org/files/?artifact_id=1606.

Zarli Alain und Scherer Raimar eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: ECPPM 2008 [Buch]. - London: Taylor & Francis Group, 2008. - 13-978-0-203-88332-7.

ANHANG