

# Objektorientierte sicherheitstechnische Planung von Hochbauprojekten mit Hilfe von Bauwerksinformationsmodellen

J. Melzner, J. Teizer, S. Zhang, H.-J. Bargstädt

**Zusammenfassung** Statistiken der Arbeitsunfälle zeigen, dass Arbeitnehmer auf Baustellen weltweit höheren Gefahren ausgesetzt sind als in anderen Industriezweigen. Absturzunfälle sind nach wie vor eine der häufigsten Unfallursachen, die schwere und tödliche Verletzungen verursachen. Die Präventionsmaßnahmen im Arbeitsschutz sind in den nationalen Arbeitsschutzgesetzgebungen verankert und stellen für international tätige Unternehmen eine Herausforderung dar. Dem hier vorgestellten Ansatz liegt die statistische Aufarbeitung von Unfallzahlen zu Grunde um festzustellen, ob die Unfallschwerpunkte auf Baustellen in den Vereinigten Staaten von Amerika und Deutschland vergleichbar sind. Im nächsten Schritt wurden die Richtlinien und Maßnahmen gegen Absturz auf Baustellen analysiert und mit vergleichbaren Regelwerken aus den USA verglichen. Aus den Richtlinien wurden die Regeln in Tabellenform abstrahiert. Auf Grundlage eines digitalen Bauwerksinformationsmodells (Building Information Model) werden die abgeleiteten Regeln mit einem automatischen regelbasierten System am Bauwerksmodell angewandt. Durch das am RAPIDS-Lab des Georgia Institut of Technology entwickelte System ist eine automatische Überprüfung von Bauwerksmodellen auf Grundlage

deutscher Absturzrichtlinien möglich. Die Fallstudie zeigt die Implementierung des Ansatzes am Beispiel eines Hochbauprojektes und die Potenziale der Verwendung von digitalen Bauwerksmodellen in der Arbeitsvorbereitung auf.

## Object-oriented safety planning of building construction by using Building Information Modeling

**Abstract** Worldwide occupational safety statistics show that the construction sectors in many countries experience one of the highest accident rates. Falls remain a major concern as they contribute to very serious injuries or even fatalities on construction projects. Since the standards and rules for protective safety equipment vary by country, increasing internationally operating companies are in need of tools that allow ubiquitous understanding and planning of safety regardless in which country they operate. The presented approach is based on statistical processing of the accident rates to determine whether the accident black spots are comparable in the United States and Germany. The next step was the analyze of the guidelines and measures to prevent falls at construction sites and compared with similar regulations from the U.S. OSHA guidelines. Rules have been abstracted from the guidelines in a table-based format. On the basis of a Building Information Model the derived rules are checked against the building model with an automatic rule-based system. The proposed safety rule-checking framework for fall protection was developed in the RAPIDS Construction Safety and Technology Laboratory in the School of Civil and Environmental Engineering at the Georgia Institute of Technology and allows the application of German fall protection guidelines. A case study implements the safety rule-checking platform on a high-rise building project and highlights the potential of using digital building models in work preparation.

## 1 Einleitung

### 1.1 Unfallschwerpunkte

Die jährlichen Unfallstatistiken auf Baustellen zeigen, dass Arbeiter in der Baubranche hohen Gefahren ausgesetzt sind. **Bild 1** zeigt den Vergleich der Unfallzahlen aus der Bauindustrie mit denen anderer Wirtschaftszweige [1]. Die Statistiken der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) verdeutlichen, dass die Unfallhäufigkeit im Baugewerbe im Durchschnitt doppelt so hoch ist wie in der übrigen Wirtschaft.

Ein Hauptunfallschwerpunkt auf Baustellen wird mit Abstürzen in Verbindung gebracht. Die Anzahl der meldepflichtigen Unfälle aus den letzten fünf Jahren zeigt einen konstant hohen Anteil an Absturzunfällen (**Bild 2**). Gemessen an Häufigkeit und Schwere gehören Absturzunfälle zu den bedeutendsten Unfallgruppen [2]. Obwohl die Raten geringfügig gesunken sind, verunglückten im Jahr 2011 immer noch 13.088 Arbeiter auf deutschen Baustellen durch einen

### Dipl. Ing. (FH) Jürgen Melzner MBA

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Bauhaus-Universität Weimar  
Professur Baubetrieb und Bauverfahren  
Marienstraße 7A, 99423 Weimar  
Tel.: +49 (0) 3643/58 45 85  
juergen.melzner@uni-weimar.de

### Associate Professor Jochen Teizer, Ph.D.

School of Civil and Environmental Engineering  
Georgia Institute of Technology  
790 Atlantic Dr. N.W., Atlanta GA, 30332-0355, USA  
Tel.: +1-404-894-8269  
teizer@gatech.edu  
Web: <http://www.rapids.gatech.edu>

### Sijie Zang B.Sc.

Ph.D. Student  
Georgia Institute of Technology  
Tel.: +01-404-894-8269  
annazhang@gatech.edu

### Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Bargstädt M.Sc.

Bauhaus-Universität Weimar  
Professur Baubetrieb und Bauverfahren  
Marienstraße 7A, 99423 Weimar  
Tel.: +49 (0) 3643/58 45 82  
hans-joachim.bargstaedt@uni-weimar.de  
<http://www.uni-weimar.de/cms/bauing/organisation/baubetrieb-und-bauverfahren.html>

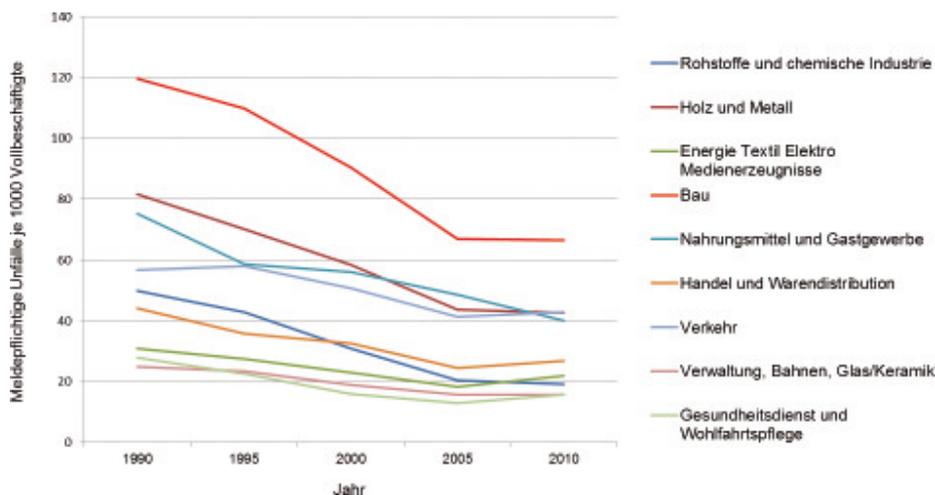


Bild 1. Meldepflichtige Unfälle je 1000 Vollbeschäftigte [1]  
Fig. 1. Reported accidents per 1000 full-time worker

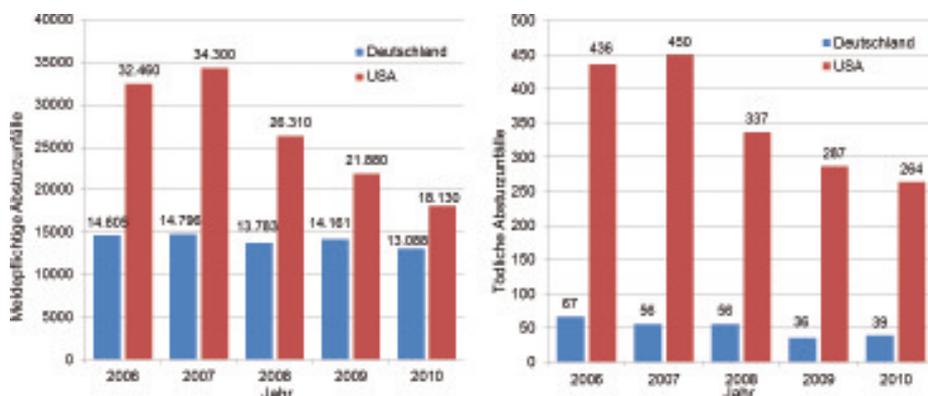


Bild 2. Anzahl der meldepflichtigen und tödlichen Unfälle im Zusammenhang mit Absturz auf Baustellen  
Quellen: U.S. Department of Labor Bureau of Labor Statistics und Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung  
Fig. 2. Reported fall-related accidents (left) and fatalities (right) in the German and U.S. construction industry



Bild 3. Absturzsicherungen in unterschiedlichen Bauphasen Bildquelle links: eigene Aufnahme; rechts: Peri GmbH  
Fig. 3. Applied Guardrails in different construction stages

Absturz. Die Anzahl der tödlichen Unfälle ist zwar tendenziell rückläufig, jedoch starben im letzten Jahr 39 Arbeiter durch Abstürze auf der Baustelle [3].

1.2 Arbeitssicherheit in der Arbeitsvorbereitung

Mit der Einführung der Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz auf Baustellen – Baustellenverordnung (BaustellV) in Deutschland wurde im Jahr 1998 die Baustellenrichtlinie der Europäischen Union (EG-Richtlinie 92/57/EWG) in deutsches Recht umgesetzt [4]. Zentrales Anliegen der Baustellenverordnung ist die ganzheitliche Betrachtung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes in al-

len Phasen der Projektabwicklung. Bereits ab der Entwurfsplanung soll sich der Bauherr der Unterstützung durch den Sicherheits- und Gesundheitsschutzkoordinator bei der Koordination sicherheitsrelevanter Maßnahmen bedienen. Dieser hat auch für die späteren Arbeiten an der baulichen Anlage eine Unterlage zu erstellen, die Angaben zur Gewährleistung von Arbeitssicherheit während der Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten im Lebenszyklus des Bauwerkes enthält.

In den Vereinigten Staaten von Amerika regelt die Occupational Safety and Health Administration (OSHA) die Mindestanforderungen an den Arbeitsschutz auf Baustellen und in anderen Branchen. Die OSHA-Richtlinie 1926.16 legt fest, dass für die Sicherheit auf der Baustelle grundsätzlich der Hauptauftragnehmer verantwortlich ist. Jeder Subunternehmer bleibt jedoch für die Sicherheit seiner eigenen Mitarbeiter in der Verantwortung. Diese verteilten Verantwortlichkeiten können zu Problemen in der Bauausführung führen. Während meist der Hauptauftragnehmer die gemeinsam von mehreren Unternehmen genutzten Sicherheitseinrichtungen, wie zum Beispiel Einrichtungen gegen den Absturz, bereit stellt, ist eine enge Absprache mit den Folgewerken notwendig. Es ist zu koordinieren, dass installierte Sicherheitseinrichtungen für die jeweiligen Arbeiten ausreichend sind und auch während der Bauausführung nicht aus bauablaufbedingten Gründen demontiert werden müssen. Besondere Aufmerksamkeit ist hier der Koordination zwischen den Rohbautätigkeiten und der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) zu schenken.

Die Grundsätze der Arbeitssicherheit besagen, dass kollektive Absturzsicherungen (z.B. Geländer) den übrigen vorzuziehen sind. Ist dies aus bauablaufbedingten Gründen nicht

möglich, so sind Auffangeinrichtungen (z.B. Schutznetze) zu installieren. Die Verwendung von persönlicher Schutzausrüstung (PSA) darf nur dann zum Einsatz kommen, wenn kollektive Absturzsicherungen und Auffangeinrichtungen unzureichend sind. Ausgehend davon sehen die nationalen Arbeitsschutzrichtlinien als effektive Maßnahmen gegen den Absturz das Abdecken der Durchbrüche und Vertiefungen als auch das Absperren der Gefahrenstellen mit Geländersystemen vor (Bild 5).

Die Ziele im Sinne der vorbeugenden Gefahrenabwehr sind dann erreicht, wenn Maßnahmen gegen Gefährdungen vorgenommen wurden, die nach rechtlichen Grundlagen not-

wendig und den gegebenen Verhältnissen angemessen sind [5].

Die Planung von sicherheitstechnischen Einrichtungen ist eine komplexe Aufgabe, bei der viele Randbedingungen zu berücksichtigen sind. Hinzu kommt, dass jedes Bauwerk ein Unikat darstellt und deshalb alle Planungen immer neu erstellt werden müssen. Die Praxis zeigt, dass die sicherheitstechnischen Planungen oft von der Arbeitsvorbereitung des Bauablaufs entkoppelt durchgeführt werden. Diese Teilung der Aufgaben verursacht sowohl technische als auch Koordinationsrisiken. Planungs- und Koordinierungsaufgaben im Bereich der Baustellensicherheit basieren auf der individuellen Begutachtung von Ausführungsplänen. Das bedeutet, dass ein Modell des fertigen Bauwerks analysiert wird. Diese Arbeitsweise birgt das Risiko, Zwischenzustände im Bauablauf und temporäre Einrichtungen nicht ausreichend zu berücksichtigen.

Der ganzheitliche Grundgedanke der Baustellenverordnung als auch die Tatsache, dass der bisherige Arbeitsablauf in der Arbeitsvorbereitung Gefahren durch Informationsverluste birgt, kann in Zukunft durch die Verwendung von Building Information Modeling zu einer verbesserten Sicherheitsplanung führen.

### 1.3 Building Information Modellig

Um den Sicherheitsstandard auf Baustellen zu verbessern, müssen sowohl die Festlegung der Sicherheitsmaßnahmen als auch die Vorbereitung und Bereitstellung der Sicherheitsausrüstung bereits in die frühen Projektphasen einbezogen werden. Der Informationsverlust durch wechselnde Planer im Arbeitsablauf kann durch das Verwenden eines durchgängigen Bauwerksinformationsmodells (Building Information Modell, BIM), das neben statischen und bauphysikalischen Betrachtungen auch für die Arbeitssicherheitsplanung herangezogen werden kann, vermieden werden [6]. Mit Bauwerksinformationsmodellen wird das Bauwerk in einem objektorientierten Kontext beschrieben. Auch wenn bereits in einem konventionellen zweidimensionalen Plan alle Informationen für die Errichtung des Gebäudes enthalten sind, können in Bauwerksinformationsmodelle weiterführende Daten für den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes integriert werden. In der Praxis gewinnt die Nutzung von objektorientierten Gebäudemodellen zunehmend an Bedeutung. Zum Beispiel, fordern Verwaltungsbehörden einiger Länder (u.a. USA, Finnland und Norwegen) den Einsatz von BIM-Standards.

Bauwerksinformationsmodelle sind eine vielversprechende Entwicklung im Bausektor und eignen sich durchaus auch zur Betrachtung von Arbeitssicherheitsbelangen [7].

Die Vorteile des Einsatzes von BIM für die Arbeitssicherheitsplanung können wie folgt zusammengefasst werden:

- Identifikation von Sicherheitsrisiken basierend auf einem Bauwerksmodell,
- bessere Kommunikation von Sicherheitsrisiken,
- Erkennen von speziellen Gefahrenstellen,
- 4D-Visualisierung von Arbeitsabläufen.

Nur wenige Forschungsaktivitäten weltweit waren bisher auf die Nutzung von Bauwerksinformationsmodellen bei der Planung von sicherheitstechnischen Einrichtungen gerichtet. Der Überblick über vorhandene Forschungsaktivitäten ermöglicht eine Einteilung der Ansätze in drei Kategorien.

#### 1. Manuelle digitale Werkzeuge zur Planung der Maßnahmen für die Baustellensicherheit

Unter dem Stichwort „Design for Safety (DFS)“ werden Sicherheitskonzepte vorgestellt, die bereits während der Planungsphase Aspekte der Arbeitssicherheit zur Beurteilung der Sicherheit unter Einbeziehung aller Beteiligten zulassen. In dieser Kategorie sind die „Design for Construction Safety Tool Box“ [8], das Tool „ToolSHed“ [9], und das „Australian Construction Hazard Assessment Implication Review (CHAIR) Tool“ [10] einzuordnen. Hinter diesen Ansätzen stehen jeweils Datenbanken, die durch Abfragen im Checklistenformat eine Gefährdungsanalyse ermöglichen.

2. *Verbesserung der Baustellensicherheit durch Visualisierung*  
Weiterführende Ansätze zielen darauf ab, mit Hilfe von Visualisierungstechniken Gefahrenstellen auf Baustellen in virtuellen Gebäudemodellen aufzuzeigen und sicherheitstechnische Einrichtungen darzustellen. 3D-Visualisierungen ermöglichen dem Nutzer, zukünftige Baustellen vorab zu analysieren, potenzielle Gefahrenstellen zu identifizieren und leicht verständlich zu kommunizieren. Durch diese Methode können, z.B. mit Hilfe von BIM, Gefahrenquellen durch die richtige Positionierung von Fassadengerüsten reduziert werden [11]. Jedoch ist es unumgänglich, den Terminplan der auszuführenden Prozesse mit in das Modell zu integrieren, um den dynamischen Charakter von Baustellen nachbilden zu können. Dieser Umstand wurde aufgegriffen und zum 3D-Modell der Faktor Zeit durch die Verlinkung von Gebäudemodell und Ausführungsterminplan integriert [12]. Diese Ansätze erweiterten zusätzlich zum Faktor Zeit das Modell um die erforderlichen Sicherheitseinrichtungen, wie z.B. Absturzeinrichtungen [13]. Dadurch können die Planer bereits in frühen Projektphasen bestimmen wo, wann und welche Sicherheitseinrichtungen benötigt werden. Der Nachteil der bisher beschriebenen Ansätze ist die manuelle Generierung der Präventionsmaßnahmen durch das Erstellen von neuen Objekten im Modell. Abhilfe schaffen automatische regelbasierte Abfragemethoden auf Grundlage von Bauwerksinformationsmodellen.

3. *Automatische Analyse von Bauwerksinformationsmodellen*  
Die neuesten Entwicklungen zeigen die Methoden zur Gefahrenanalyse mit regelbasierten Abfragen. Dabei werden Regeln definiert und auf die Objekte des Bauwerksmodells angewendet. Die bisher vorgestellten Forschungsansätze sind auf den Hauptunfallschwerpunkt auf Baustellen, die Absturzunfälle, fokussiert [14], [15], [16].

Die Literatur zeigt einige wenige Ansätze zur Verwendung von Building Information Modelling, um die Sicherheit auf Baustellen zu verbessern. Jedoch ist die Integration der sicherheitstechnischen Planung in ein digitales Gebäudemodell noch selten und relativ kompliziert.

Die Grenzen von aktuell angewendeten Werkzeugen für die Gefährdungsanalyse von Bauprojekten lassen sich wie folgt darstellen. Die Gefahren müssen stets manuell durch aktive Begutachtung des ausführenden Ingenieurs identifiziert werden. Darauf aufbauend können die Softwarelösungen bereits semi-automatisch den identifizierten Gefahrenstellen geeignete Schutzeinrichtungen zuweisen. Die aktuellen Forschungsansätze zeigen auf, dass die Gefahrenstellen und Schutzeinrichtungen im 3D-Modell visualisiert werden können und tragen dadurch entscheidend zur Verbesserung der Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten bei. Dabei spielen sowohl der Ausbildungsgrad als auch die Muttersprache der Anwender eine untergeordnete Rolle. Durch die

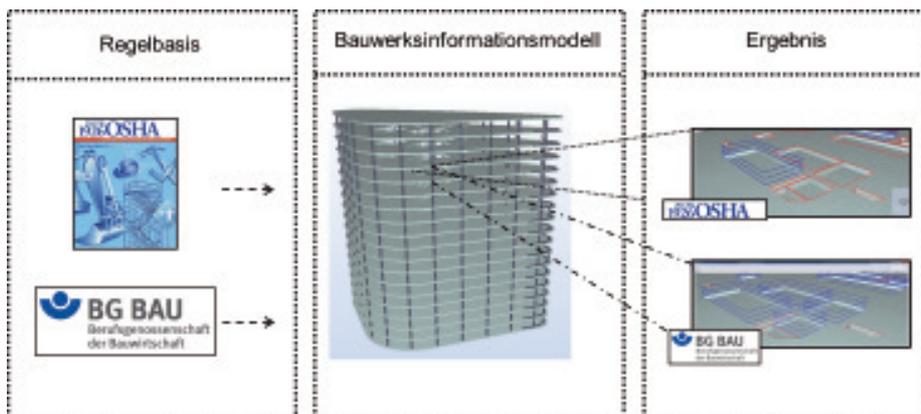


Bild 4. Schematische Darstellung der BIM-basierten Methode  
 Fig. 4. Schematic representation of the BIM-based method

Integration des Bauzeitenplans in das Bauwerksinformationsmodell lassen sich bereits potenzielle räumliche Konflikte beteiligter Gewerke darstellen.

## 2 Zielsetzung

### 2.1 Allgemein

Es ist allgemein anerkannt, dass die Sicherheit bei Arbeiten auf der Baustelle verbessert werden muss. Es liegt in der Natur der Bauablaufplanung, dass die Qualität der Planungsleistung im direkten Zusammenhang zur Erfahrung des planenden Ingenieurs steht. Deshalb können wissensbasierte Systeme zur Entscheidungsfindung die Planungsqualität verbessern, indem dem Planer Routineaufgaben im Planungsablauf durch das System abgenommen werden und der Fokus stärker auf die Lösung von Detailproblemen gelegt werden kann. Dies zeigen auch die Forschungsprojekte, bei denen mit Hilfe von Simulationstechnik die Arbeitsvorbereitung unterstützt wird [17], [18], [19].

Bei aller Softwareunterstützung im Planungsprozess sollte jedoch im Entscheidungsprozess immer der Mensch als letzter Entscheidungsträger in der Verantwortung stehen, ganz besonders dann, wenn es um die Sicherheit von Arbeitern geht. Deshalb führt die im Folgenden vorgeschlagene Methode die ingenieurtechnische Erfahrung des Planers, bewährte Praktiken und rechtliche Rahmenbedingungen in einer Wissensbasis zusammen und wendet diese auf ein Bauwerksinformationsmodell an.

Besondere Aufmerksamkeit wird in diesem Aufsatz der Hervorhebung von Vorteilen einer BIM-basierten Sicherheitsplanung geschenkt. Der vorgestellte Ansatz ermöglicht international tätigen Unternehmen die Adaption der nationalen Richtlinien in das System und deren Anwendung. Darüber hinaus werden detaillierte Materialbedarfslisten bereits in frühen Projektphasen automatisch erzeugt. Als wichtigster Bestandteil wird weiterhin gezeigt, wo, wann und welche Sicherheitseinrichtungen während des Bauablaufs benötigt werden, um Arbeiter vor Absturzgefahren zu schützen.

### 2.2 Die Notwendigkeit eines prozessintegrierten Planungswerkzeugs

Wie bereits erläutert, kann die Planung von sicherheitstechnischen Einrichtungen eine mühsame und zeitaufwendige Aufgabe darstellen. Bei großen Bauwerken haben solche Aufgaben einen iterativen Charakter, da Regelgeschosse oftmals ähnliche Grundrundrisse aufweisen. Bei großen Bau-

projekten sind Plansätze von über 1000 Pläneinheiten keine Seltenheit. Das räumliche Vorstellungsvermögen des Ingenieurs obliegt der gedanklichen Zusammenführung der Ausführungspläne unterschiedlicher Gewerke, um sich einen ganzheitlichen Überblick über die räumlichen Situationen auf der Baustelle zu verschaffen. Der dynamische Charakter der Baustellenbedingungen erschwert den Planungsprozess zusätzlich. Es zeigt sich weiterhin, dass es unangemessen ist, Bauprojekte anhand von Modellen und Informationen bezüglich der Sicherheit zu analysieren, die das Objekt bereits im fer-

tiggestellten Zustand repräsentieren.

Wissenschaftliche Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verwendung von Bauwerksinformationsmodellen als zentrales Element der Bauprojektplanung erhebliches Potenzial aufweist und bereits in Anwendung ist [20].

## 3 Methodik

### 3.1 Überblick

Der Forschungsansatz ist auf eine automatische Generierung von Absturzsicherungsmaßnahmen auf der Grundlage eines objektorientierten Bauwerksmodells gerichtet. Dieser Ansatz ermöglicht es bereits in den frühen Planungsphasen, die Sicherheitseinrichtungen auf Baustellen sehr detailliert zu planen und zu analysieren. Der hier verwendete Ansatz der regelbasierten Überprüfung eines Bauwerksmodells wurde erstmals von Eastman et al. vorgestellt [21]. Darauf aufbauend wurde am „RAPIDS Construction Safety and Technology Laboratory“ am „Georgia Institute of Technology“ eine Applikation zur automatischen regelbasierten Sicherheitsplanung (safety rule-based checking engine) entwickelt [14]. Der regelbasierte Algorithmus beinhaltet vier Schritte (Bild 4):

1) Vorgaben bezüglich des Arbeitsschutzes sind gewöhnlich textbasiert in Richtlinien und Normen beschrieben. Um diese textbasierten Arbeitsschutzbestimmungen im System anwenden zu können, müssen diese im ersten Schritt maschinenlesbar interpretiert werden. Zum Beispiel, müssen die in Richtlinien beschriebenen Vorschriften mit Standardobjekten (z.B. Decken, Öffnungen) im Bauwerksmodell verknüpft werden.

2) Um eine verlässliche und fehlerfreie Regelabfrage durchführen zu können, ist es erforderlich, dass das objektorientierte Modell nach strengen Vorgaben modelliert wurde. Wichtige Daten, die im Modell enthalten sein müssen, sind Name, Typ, Attribute, Beziehungen und weitere Metadaten.

3) Die Ausführung der Regelabfrage stellt die Verbindung zwischen der Regelbasis und dem vorbereiteten Bauwerksinformationsmodell dar. Bei diesem Prozess werden die vordefinierten Regelsätze über die Attribute der Objekte im Bauwerksinformationsmodell miteinander verknüpft. Dies geschieht, indem die eingangs beschriebenen Regeln auf das Gebäudemodell angewendet werden. Dabei werden Bauteile identifiziert und die dafür vorgesehenen Regeln angewendet. Die Regelausführung wird in zwei Schritten vollzogen. Das Modell wird automatisch überprüft und die Si-

cherheitseinrichtungen werden gemäß den Standarteinstellungen angewendet. Danach kann der Nutzer auf Grundlage der eigenen Erfahrung individuelle Änderungen vornehmen, wenn Gründe für eine wirtschaftlichere Alternative vorliegen sollten.

4) Die Ergebnisse des regelbasierten Ansatzes können auf zwei unterschiedliche Weisen ausgegeben werden. Die angewendeten Präventionsmaßnahmen können im 3D-Modell visualisiert werden. Auf Grundlage der Visualisierung kann durch die Sicherheitsfachkraft der ausführenden Firma oder durch den Sicherheits- und Gesundheitsschutz-Koordinator (SiGeKo) auf der Baustelle eine visuelle Überprüfung vorgenommen werden. Darüber hinaus zeigen Berichte im Tabellenformat detaillierte Informationen darüber, welche Lösungen für jede identifizierte Gefahrensituation angewendet werden. Über die Berichte werden detaillierte Stücklisten für die benötigten sicherheitstechnischen Einrichtungen erzeugt. Durch eine Verknüpfung mit dem Bauablaufplan ist weiterhin eine 4D-Animation der Sicherheitseinrichtungen möglich und in der Folge eine optimierte Baustellenlogistik erreicht.

Es sei darauf hingewiesen, dass der vorgestellte Ansatz ein Hilfsmittel zur Entscheidungsunterstützung ist und dadurch nicht die Erfahrung von Ingenieuren ersetzt werden kann. Jedoch kann der Entscheidungsfindungsprozess durch die vorher beschriebenen Informationen verbessert werden.

**3.2 Regelinterpretation**  
Die Richtlinien für Absturzsicherungsmaßnahmen werden national geregelt, so dass in verschiedenen Ländern unterschiedliche Maßnahmen zu ergreifen sind. Die bewährtesten Maßnahmen um Abstürze auf der Baustelle zu verhindern, sind das Anbringen von Geländersystemen und das Abdecken von kleineren Durchbrüchen. Aus diesem Grund wurden zuerst die Arbeitsschutzrichtlinien aus den USA und Deutschland gegenübergestellt. Der Arbeitsschutz ist in den USA der „Occupational Safety and Health Administration (OSHA)“ unterstellt, die Mindeststandards für den Arbeitsschutz vorgibt. Für diese US-Regelungen wurde in den deutschen Unfallverhütungsvorschriften für Bauarbeiten nach äquivalenten Bestimmungen gesucht. Die textbasierten Vorschriften wurden in Tabellenform transformiert, um Regeln daraus zu generieren.

**3.2 Regelinterpretation**

Die Richtlinien für Absturzsicherungsmaßnahmen werden national geregelt, so dass in verschiedenen Ländern unterschiedliche Maßnahmen zu ergreifen sind. Die bewährtesten Maßnahmen um Abstürze auf der Baustelle zu verhindern, sind das Anbringen von Geländersystemen und das Abdecken von kleineren Durchbrüchen. Aus diesem Grund wurden zuerst die Arbeitsschutzrichtlinien aus den USA und Deutschland gegenübergestellt. Der Arbeitsschutz ist in den USA der „Occupational Safety and Health Administration (OSHA)“ unterstellt, die Mindeststandards für den Arbeitsschutz vorgibt. Für diese US-Regelungen wurde in den deutschen Unfallverhütungsvorschriften für Bauarbeiten nach äquivalenten Bestimmungen gesucht. Die textbasierten Vorschriften wurden in Tabellenform transformiert, um Regeln daraus zu generieren.

Die in diesem Ansatz verwendete Methode enthält drei Regelsätze um Absturzgefahren auf der Grundlage ihrer Geometrie zu identifizieren. Die beiden ersten Regeln werden in der später dargestellten Fallstudie angewendet. Bei dieser Fallstudie werden automatische Absturzsicherungen für freie Deckenkanten generiert.

Für drei Standardgefahrensituationen auf Rohbaubaustellen wurden die Arbeitsschutzrichtlinien analysiert und implementiert. Dieses sind Durchbrüche in Decken, ungeschützte Deckenkanten und Öffnungen in Außenwänden, wie es zum Beispiel bei bodentiefen Fenstern der Fall ist.

Regel 1 behandelt Deckendurchbrüche. Gemäß OSHA-Richtlinie 1910.25 (a) müssen Arbeiter gegen das Durchfallen und Eintreten in Durchbrüche geschützt werden. Dabei werden Durchbrüche definiert als Öffnungen, die in ihrer

Tab. 1. Regelinterpretation für Deckendurchbrüche

Tab. 1. Rule interpretation for the example of a hole in a slab

OSHA Standard		BG-BAU	
< 0.05 m	keine Maßnahmen erforderlich		
0.05 m < x < 1 m	Abdeckung notwendig	< 3.00 m	Abdeckung notwendig
sonst	Geländer notwendig	sonst	Geländer notwendig

Tab. 2. Regelinterpretation für Öffnungen in Außenwände

Tab. 2. Rule interpretation – hole in an exterior wall

OSHA Standard		BG-BAU	
Absturzhöhe < 1.80 m	keine Maßnahmen erforderlich	Absturzhöhe < 1.00 m	Keine Maßnahmen erforderlich
Absturzhöhe > 1.80 m	Geländer notwendig	Absturzhöhe > 1.00 m	Geländer notwendig

kleinsten Abmessung größer sind als 5,1 cm. Durchbrüche mit einem Öffnungsmaß bis zu einem Meter müssen abgedeckt sein, kleinere Durchbrüche können unberücksichtigt bleiben. Bei Durchbrüchen > 1 m ist ein Geländersystem anzubringen. Die deutschen Unfallverhütungsvorschriften für Bauarbeiten definieren Durchbrüche hingegen als „Öffnungen mit einem Flächenmaß ≤ 9 m<sup>2</sup> oder geradlinig begrenzte Öffnungen, bei denen eine Kante ≤ 3 m lang ist“ [22]. Die sicherheitstechnischen Anforderungen sind demnach erfüllt, wenn die Durchbrüche geschützt sind oder mit nicht verschiebbaren Abdeckungen versehen werden. In der deutschen Berufsgenossenschaftlichen Unfallverhütungsvorschrift werden zu ergreifende Schutzmaßnahmen weniger explizit definiert als in den OSHA-Richtlinien. Deshalb werden, wie es sich in der Praxis bewährt hat, zum Schutz vor Durchbrüche über 3 m Kantenlänge Geländersysteme eingesetzt. Die tabellenbasierte Interpretation der Arbeitsschutzbestimmungen ist für beide Länder in **Tabelle 1** angegeben.

In Regel 2 werden ungeschützte Deckenkanten vom System erkannt. Gemäß den OSHA-Richtlinien (§1926.501(b)(1)) sind alle Mitarbeiter, die in der Nähe von Absturzkanten arbeiten, die eine Höhe von mehr als einen Meter bis zur nächsten Ebene aufweisen, durch Geländer, Fallschutznetze oder persönliche Schutzausrüstung zu schützen. Die dementsprechende deutsche Regel BGV C22 §12 wird in Regel 3 erläutert.

Die dritte implementierte Regel erfasst Gefährdungen, die aus Öffnungen in Außenwänden hervorgehen. Gemäß OSHA-Richtlinie §1926.501 (b) (14) muss jeder Arbeiter, der in der Nähe von Wandöffnungen arbeitet, die eine Höhe von mehr als einem Meter bis zur nächsten Ebene aufweisen und deren Brüstung niedriger als einen Meter über der Arbeitsebene liegt, durch ein Geländer geschützt zu werden. Die dementsprechende deutsche Regel ist die BGV C22 § 12 (1). Danach müssen Absturzsicherungen vorhanden sein, wenn bei Wandöffnungen die Absturzhöhe mehr als 1,0 m beträgt. Die Ergebnisse aus Regel 3 sind in **Tabelle 2** dargestellt.

**3.3 Regelausführung**

Der entwickelte Algorithmus zur Absturzsicherung ist in der folgenden Weise aufgebaut. Zunächst werden Objekte über das Attribut Typ, z. B. eine Decke oder ein Dach das diese Eigenschaft trägt, identifiziert. Dadurch erhält das Regelaus-

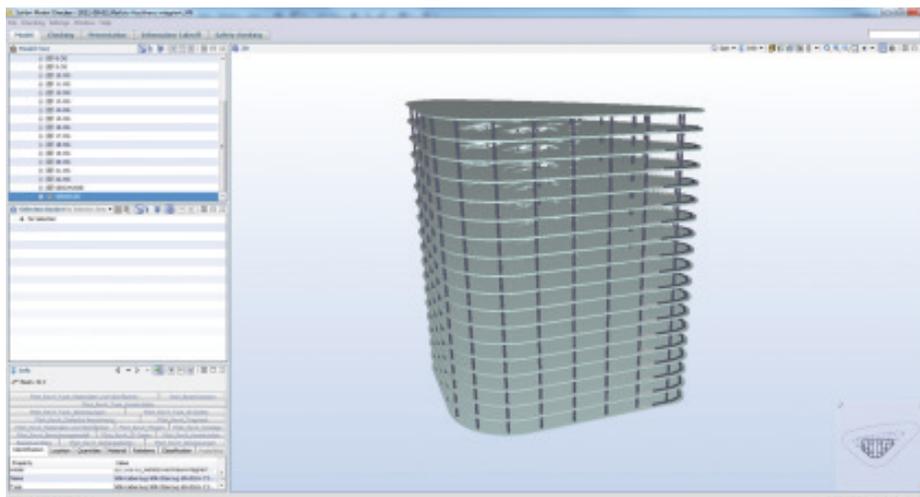


Bild 5. Bauwerksinformationsmodell (BIM) des Beispielhochhauses  
 Fig. 5. Building Information Model (BIM) of the example tower building

führungssystem die geometrischen Eigenschaften des Objektes. Enthält das Objekt einen Durchbruch, so wird dieser vom Algorithmus zuerst erkannt und behandelt. Im Weiteren werden alle Außenwände aus dem Objekt Decke identifiziert, die Öffnungen aufweisen. Falls Deckenkanten nicht von Außenwänden umfasst sind, werden die freien Deckenkanten vom System erkannt und in Regel 2 angewendet. Sobald die Regeln angewendet wurden, werden die Ergebnisse im Bauwerksinformationsmodell visualisiert und vom Nutzer können die angewendeten Schutzeinrichtungen auf der virtuellen Baustelle überprüft werden.

#### 4 Implementierung

##### 4.1 Fallbeispiel

Die in den vorangegangenen Kapiteln erarbeiteten Grundlagen wurden in einem automatischen regelbasierten System implementiert, welches als Plug-In für vorhandene BIM Software angewendet wird. Als Beispielprojekt wurde ein Bürogebäude mit asymmetrischem Grundriss gewählt. Das Beispielhochhaus besteht aus 18 Regelgeschossen und weist eine Fläche von 75.000 m<sup>2</sup> auf (Bild 5). Das Gebäudemodell enthält die Industrie Foundation Class (IFC) Gebäudeobjekte, Wände, Stützen, Öffnungen und Decken. Das Beispielprojekt stellt den Rohbau des Gebäudes mit sowohl rechteckigen als auch polygonalen Deckenformen und Durchbrüchen dar.

Das Modell wurde mit einer kommerziellen BIM-Software erstellt, mit der IFC-Schnittstelle exportiert und darauf die regelbasierte Modellüberprüfung angewandt. Die deutschen Vorschriften für die oben beschriebenen Fälle wurden in die Applikation implementiert und vergleichend zur US-Vorschrift am Gebäudemodell angewendet.

Auf das Bauwerksinformationsmodell wurden im Folgenden die Regeln für das Detektieren von Durchbrüchen in Deckenplatten und freien Deckenkanten durchgeführt. Zu Beginn wurde das Modell auf Grundlage der US-Vorschriften überprüft und wurden die Ergebnisse visualisiert. Anschließend wurde das identische Modell mit den Regeln der deutschen Arbeitsschutzbestimmungen überprüft.

Sowohl die Visualisierung der Ergebnisse als auch der Massenauszug zeigen, welche Auswirkungen die Anwendung der unterschiedlichen Richtlinien auf die Planung der Si-

cherheitstechnischen Einrichtungen haben.

#### 5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die qualitativen und quantitativen Vorteile durch die Nutzung des automatischen regelbasierten Systems am Bauwerksmodell diskutiert.

##### 5.1 Weiterentwicklung des Workflow-Managements

Die Gestaltung der Abläufe der Arbeitsprozesse nimmt eine immer wichtigere Stellung im Bauprozessmanagement ein. Als Gründe hierfür sind die Einführung des Lean-Gedankens in die Bauabläufe, die Wissensrepräsentation von Mitarbeitern,

Know-how und die ganzheitliche IT-gestützte Projektabwicklung zu nennen [17]. Diese Ansätze veranlassen eine Sensibilisierung für die detaillierte Arbeitsablaufplanung in Bauwesen. Hinzu kommt, dass durch die Komplexität und Beschleunigung der Geschäftsprozesse in Bauprojekten die Informationsverteilung gewährleistet sein muss. Daher ist die Bereitstellung der aktuellen Projektdaten ein Schlüsselfaktor für eine erfolgreiche Bauabwicklung. Bereits mehrfach hat sich der BIM-basierte Ansatz für diese verteilte Planungsaufgabe und Informationsbereitstellung unter Beweis gestellt. Der vorgestellte BIM-basierte Ansatz für eine automatische Sicherheitsplanung von Baustellen fügt sich in diese veränderten Arbeitsabläufe ein und fördert den kontinuierlichen Datenfluss über die verschiedenen Projektphasen hinweg. Traditionell erstellen Architekten 2D-Zeichnungen in ihrer Werksplanung, wobei bei dieser Arbeitsweise die Auswirkungen von Design-Entscheidungen auf die Arbeitsabläufe und die sicherheitstechnischen Anforderungen noch nicht oder nur schwer evaluiert werden können. Auf Grundlage der fertiggestellten Pläne werden in der Arbeitsvorbereitung die Entscheidungen für die Wahl von Präventionsmaßnahmen für die gegebenen Bedingungen getroffen. Jedoch zeigt die Praxis, dass die Entscheidungen oft ad-hoc erst auf der Baustelle getroffen werden und deshalb nicht auf der Grundlage einer detaillierten Planung basieren. Daraus folgen oftmals falsche oder in falschen Mengen bestellte temporäre Baustellensicherungsmaßnahmen, wie Schutzgeländer und Schutzgerüste.

Die einmal im System generierten sicherheitsrelevanten Daten können mehrfach für unterschiedliche Zwecke, wie z.B. Massenermittlung oder Mitarbeiterunterweisung, verwendet, aktualisiert und ausgetauscht werden. Das integrierte Informationssystem kann den Arbeitsaufwand für die Planung der Maßnahmen zur Erzielung von Arbeitssicherheit auf der Baustelle vermindern bei einem gleichzeitig höheren Detailierungsgrad [23]. Obwohl sich das vorgestellte regelbasierte System noch im Entwicklungsstadium befindet, erfordert es bei Planungsänderungen einen relativ geringen Aufwand. Ein weiterer Vorteil der vorgestellten Methode ist die Zeitreduktion in der Ausführungsplanung durch den hohen Automatisierungsgrad des Verfahrens. Hingegen erfordert es bei einer traditionellen Planung einen großen Personaleinsatz, um die Auswirkungen von Pla-

nungsänderungen auf angegliederte Gewerke anzupassen. Die Ergebnisse der regelbasierten Sicherheitsplanung am Beispielprojekt sind bei einem akkurat modellierten Bauwerksinformationsmodell bereits in wenigen Minuten in einem hohen Detaillierungsgrad verfügbar.

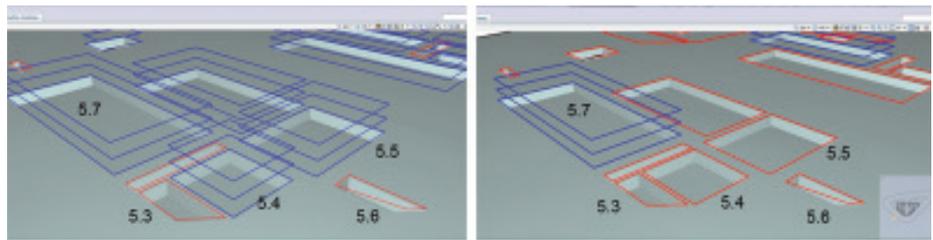
### 5.2 Flexibilität im Planungsprozess

Weder ein Bauzeitenplan noch eine Kalkulation können ohne einen detaillierten Massenauszug vorgenommen werden. Obwohl bereits einige Softwareanbieter eine modellbasierte Massenermittlung ihren Kalkulationen zu Grunde legen, werden in den vorhandenen Lösungen meist nur die permanenten Baukonstruktionen berücksichtigt. Temporäre Baustelleneinrichtungen werden in der Regel in Zeichnungen oder 3D-Planungen nicht beachtet. Die automatische Integration der Sicherheitseinrichtungen mindert das Risiko in der Kalkulation, diese Positionen nicht zu berücksichtigen.

Das auf Baustellen eingesetzte Material und die angewandten Verfahren sind oft von nationalen Regularien und Normen abhängig. Die immer weiter voranschreitende Internationalisierung des Baumarcktes steigert den Bedarf an flexibel an die nationalen Gegebenheiten anpassbaren Planungswerkzeugen, die für den Anwender transparent und gut nachvollziehbar sind. Die folgende Analyse zeigt die Auswirkungen, die länderspezifische Vorschriften und Regeln im Planungsprozess und für die Sicherheit am Bau haben.

### 5.3 Ergebnis der regel-basierten Sicherheitsanalyse

Der automatisch generierte Massenauszug zeigt im Detail, wo, wann, welche und wie viel der Sicherheitseinrichtungen benötigt werden. **Bild 6** zeigt einen Ausschnitt aus dem Modell, anhand dessen die Regeln ausgeführt wurden. Die drei parallelen Linien stellen ein Geländersystem dar. Die einfache Line ist eine Abdeckung. Das Bild zeigt deutlich die Unterschiede, die sich durch das Anwenden von länderspezifischen Regelsätzen ergeben. Auf Grundlage der OSHA-Richtlinien werden mehr Geländer notwendig als bei Anwendung der BG BAU-Vorschriften. Stürze durch Bodenöffnungen oder Vertiefungen können ernsthafte Verletzungen zur Folge haben oder tödlich enden. Das vorgestellte automatische regelbasierte Sicherheitsplanungswerkzeug identifiziert alle Öffnungen in Decken, die eine Gefahrensituation darstellen. Das System schlägt auf Grundlage von voreingestellten Attributen eine Präventionsmaßnahme vor. Die vorgeschlagene Maßnahme kann jedoch vom Nutzer individuell aus persönlichen Erfahrungen



**Bild 6.** 3D-Ansicht der automatisch generierten Absturzsicherungsmethoden. Links nach OSHA-Richtlinien und rechts nach Vorschriften der BG BAU

**Fig. 6.** 3D view of fall protection systems (guardrail and covers) according to OSHA guidelines (left) and the German standard (right)

**Tab. 3.** Auszug aus dem Berichtswesen der Gefährdungserkennung

**Tab. 3.** Extract from the reporting of the hazard identification

Stockwerk	Grundfläche	Fläche der Öffnungen			
5	1.369,85 m <sup>2</sup>	121,98 m <sup>2</sup>			
Öffnungsnummer	Fläche in m <sup>2</sup>	Breite in m	Länge in m	US Standard	Deutscher Standard
5.3	1,20	1,96	0,62	Abdeckung	Abdeckung
5.4	3,91	2,06	1,90	Geländersystem	Abdeckung
5.5	8,16	3,25	2,51	Geländersystem	Abdeckung
5.6	0,92	1,79	0,52	Abdeckung	Abdeckung
5.7	21,32	6,88	3,10	Geländersystem	Geländersystem

**Tab. 4.** Anzahl der identifizierten Gefahrenstellen pro Geschoss

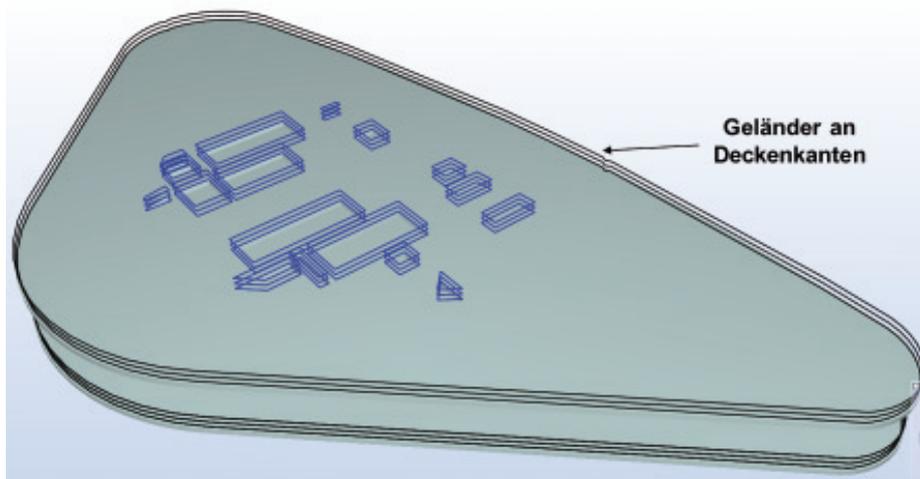
**Tab. 4.** Number of identified hazards per floor

	US Standard		BG-BAU	
	Menge	Abmessung	Menge	Abmessung
Durchbrüche*	7	8,44 m <sup>2</sup>	17	79,35 m <sup>2</sup>
Ungeschützte Deckenkannten	12	144,21 m	2	39,92 m

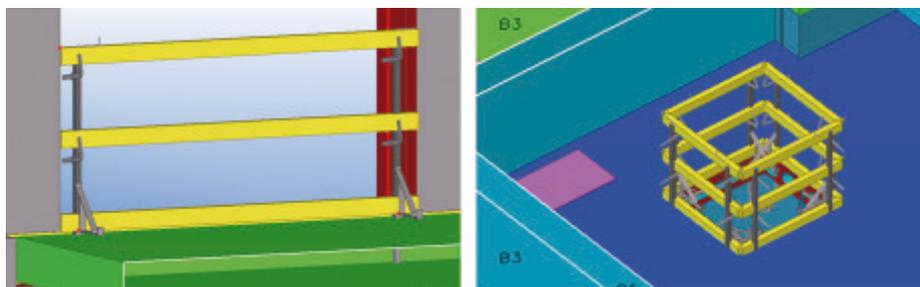
\*Gemäß Definition in Tabelle 1

angepasst werden. Detaillierte Berichte geben Auskunft über alle Gefahrenstellen und die angewandten Sicherheitsmaßnahmen. **Tabelle 3** zeigt einen Auszug aus dem Bericht für das fünfte Stockwerk. Der Bericht enthält Angaben zur jeweiligen Geschossfläche und der Gesamtfläche der vorhandenen Öffnungen. Jede Öffnung erhält eine laufende Nummer und wird mit ihren Abmaßen gelistet. Zum Beispiel weist Öffnung 5.4 eine Fläche von 3,91 m<sup>2</sup>, bei einer Breite von 2,06 m und einer Länge von 1,90 m auf. Darüber hinaus wird die angewandte Präventionsmaßnahme entsprechend der länderspezifischen Norm wiedergegeben.

Die Gesamtzahl der auf einem Regelgeschoss erkannten Gefahren ist in **Tabelle 4** dargestellt. Bei Anwendung des US-Standards sind auf jeder Etage sieben Durchbrüche, nach Deutschen Standards 17 Durchbrüche erfasst worden. Die Gesamtmenge an Abdeckungen sind nach deutscher Anwendung ungefähr 10 mal so viel wie im Beispiel der US-Va-



**Bild 7. Automatisch generierte Geländersysteme an den ungeschützten Deckenkanten**  
Fig. 7. Applied guardrail systems on unprotected slab edges



**Bild 8. Detaillierte Ansicht der automatisch generierten 3D-Objekte**  
Fig. 8. Detailed view of the automatically generated 3D objects

riante. Einzig auf Grundlage dieser Daten lassen sich schon Beeinträchtigungen auf den Bauablauf interpretieren, da Abdeckungen auf Durchbrüchen wesentlich schneller angebracht werden können als Geländersysteme die nach US-Standard bereits ab 1 m Kantenlänge vorgeschrieben sind. Der Bericht über die benötigten Arbeitsschutzeinrichtungen zeigt darüber hinaus die Notwendigkeit von 157 lfm Geländersystemen an den ungeschützten Deckenkanten pro Etage auf (Bild 7). Weitere Informationen die bereitgestellt werden, sind die Entfernung zur nächstgelegenen Ebene und weitere Details.

#### 5.4 Visualisierung der Ergebnisse

Der wichtigste Bestandteil der proaktiven Sicherheitsplanung ist das Erkennen der potenziellen Gefahrenstellen. Bei Verhaltensforschungen wurde festgestellt, dass virtuelle Lernumgebungen die Ausbildung im Arbeitsschutz verbessern. 3D- und 4D-Gebäudemodelle können realistische Visualisierungen des Bauwerks und der Baustellenumgebung darstellen und dadurch einen wichtigen Beitrag im Entscheidungsprozess für die Arbeitssicherheit leisten. Mit der vom System vorgeschlagenen Präventionsmaßnahme können Sicherheitsingenieure die erkannten Gefahren beurteilen, bewerten und daraus die wirtschaftlichste Variante auswählen. Die Visualisierungen dienen weiterhin zur Kommunikation als bildliche Arbeitsanweisungen, wo und wie Schutzeinrichtungen anzubringen sind (Bild 8).

#### 6 Fazit

Der vorgestellte Forschungsansatz stellt ein automatisches regelbasiertes Sicherheitsplanungswerkzeug für die Aufdeckung und Verhütung von Absturzgefährdungen dar. Es wurde aufgezeigt, dass die BIM-basierte Regelabfrage auf unterschiedliche nationale Regelwerke anpassbar ist und in dem angewendeten Beispiel alle Absturzgefahren identifizieren konnte. Es wurde aufgezeigt, dass nationale Vorschriften für den Arbeitsschutz Auswirkungen auf den Baubetrieb haben und dass durch eine modellbasierte Planung Vorteile im Planungsablauf entstehen.

Die Anwendung des vorgestellten Forschungsansatzes verbessert den Arbeitsablauf in der Planung der Arbeitssicherheit auf unterschiedliche Weise. Informationsverluste durch Systembrüche werden durch das Arbeiten an einem Modell verringert. Der Zeitaufwand für die Erstellung der Planung und der Aufwand bei Planänderungen werden reduziert und Materiallisten stehen bereits zu einem frühen Planungszeitpunkt in hoher Genauigkeit zur Verfügung.

Die aufgezeigte Methode ist jedoch einigen Einschränkungen unterzogen. Bevor sie eingesetzt werden kann, müssen mühsam die textbasierten Vorschriften in ein maschinenlesbares Format überführt werden. Dieser Prozess kann zeitaufwändig sein, muss jedoch nur einmalig durchgeführt werden. Darüber hinaus repräsentiert das Bauwerksinformationsmodell den statischen Zustand des fertiggestellten Gebäudes. Jedoch resultiert eine Vielzahl von Gefahren aus Zwischenzuständen, die verfahrens- oder konstruktionsbedingt entstehen.

Die vorgestellte Methode leistet einen Beitrag dazu, den Ingenieur von Routinetätigkeiten zu entlasten und ihm zu ermöglichen, sich auf ausgewählte Gefahrensituationen zu konzentrieren.

#### Literatur

- [1] DGUV – Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: DGUV-Statistiken für die Praxis 2010. Aktuelle Zahlen und Zeitreihen aus der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. Paderborn: Bonifatius Verlag, 2011.
- [2] Schüler, T., Röbenack, K.-D., Steinmetzger, R.: Untersuchung von Absturzunfällen bei Hochbauarbeiten und Empfehlungen von Maßnahmen zu deren Verhütung – Forschung Fb 922 – Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 2001
- [3] DGUV – Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: Statistische Daten Referat Statistik – Makrodaten, Arbeits- und Schülerunfälle. 2010.
- [4] BaustellIV Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz auf Baustellen (BaustellIV – BaustellIV), 10.06.1998, Überarbeitung vom 01.01.2003)

- [5] Girmscheid, G.: Angebots- und Ausführungsmanagement – Leitfaden für Bauunternehmen: Erfolgsorientierte Unternehmensführung vom Angebot bis zur Ausführung. 2. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2010.
- [6] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K.: BIM handbook. A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors, Wiley, Hoboken, NJ. 2011
- [7] Sulankivi, K., Kähkönen, K., Mäkelä, T., Kiviniemi, M.: 4D-BIM for Construction Safety Planning. CIB 2010 World Congress, Manchester UK. 2010.
- [8] Gambatese, J., Hinze, J.W. and Haas, C.T.: Tool to Design for Construction Worker Safety. In: *Journal of Architectural Engineering* 3, Nr. 1: 32. 1997.
- [9] Cooke, T., Lingard, H., Blismas, N. and Stranieri, A.: ToolSheDTM: The development and evaluation of a decision support tool for health and safety in construction design, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 4: 336 – 351. 2008.
- [10] WorkCover: CHAIR safety in design tool, New South Wales, Australia, (2001).
- [11] Kim, H., Ahn, H.: Temporary Facility Planning of a Construction Project Using BIM (Building Information Modeling). In: *Proceedings of the 2011 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering*. 2011.
- [12] Chantawit, D., Hadikusumo, B.H.W., Charoenggam, C. and Rowlinson, S.: 4dcad-safety: Visualizing project scheduling and safety planning. *Construction Innovation: Information, Process, Management*, 5(2): 99–114. 2005.
- [13] Kiviniemi, M., Sulankivi, K., Kähkönen, K., Mäkelä, T. and Merivirta, M.: BIM-based safety management and communication for building construction. VTT, 2011.
- [14] Zhang, S., Teizer, J., Lee, J. K., Eastman, C. and Venugopal, M.: Building information modeling (BIM) and safety: Automatic safety checking of construction models and schedules. *Automation in Construction*. 29: 183–195. 2013.
- [15] Qi, J., Issa, R.R., Hinze, J.W. and Olbina, S.: Integration of safety in design through the use of building information modeling. In: *Proceedings of the 2011 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering*: 698–705. 2011.
- [16] Benjaoran, V. and Bhokha, S.: An integrated safety management with construction management using 4D CAD model. In: *Safety Science* 48, Nr. 3: 395–403. 2010.
- [17] Kugler, M., Kordi, B., Franz, V.: Simulation zur Unterstützung der Arbeitsvorbereitung im Hochbau. In: *Bauingenieur*, September 2012, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2012.
- [18] Berner, F., Habenicht, I., Kochkine, V., Spieckermann, S., Väth, C.: Simulation in der Fertigungsplanung von Bauwerken, In: *Bauingenieur*, Februar 2013, Springer VDI-Verlag, Düsseldorf, 2013, S. 89–97.
- [19] Mikulakova, E., König, M., Tauscher, E., Beucke, K. (2010): Knowledge-based schedule generation and evaluation. In: *Advanced Engineering Informatics*, 24/2010, Elsevier, S. 389–403.
- [20] Hartmann, T., Gao, J. and Fischer, M.: Areas of application for 3d and 4d models on construction projects. *Journal of construction engineering and management*, 134(10), 776–85. 2008.
- [21] Eastman, C., Lee, J., Jeong, Y., Lee, J.: Automatic rule-based checking of building designs, *Automation in Construction*, vol. 18, no. 8. Seiten 1011–1033. 2009.
- [22] Berufsgenossenschaftliche Unfallverhütungsvorschrift „Bauarbeiten“: BGV C22, Stand Dezember 2011.
- [23] Melzner, J., Zhang, S., Teizer, J., Bargstädt, H.-J. A case study on automated safety compliance checking to assist fall protection design and planning in building information models, *Journal of Construction Management and Economics*. 2013, dx.doi.org/10.1080/01446193.2013.780662