

Innovative, quantitative 3D-Planungswerkzeuge für sichere Städte der Zukunft

ANDREAS STEIN¹ & MATTHIAS BACHMANN²

Zusammenfassung: Eine voranschreitende Urbanisierung, eine steigende Komplexität kritischer Infrastruktur und die Entstehung neuer Bedrohungen, beispielsweise durch Naturkatastrophen oder Terrorismus, erhöhen die Verwundbarkeit städtischer Gebiete (UNITED NATIONS 2011; LIN et al. 2007). Risiko- und Resilienzbewertungen im Zuge von Planungs-vorgängen werden aber häufig noch qualitativ auf der Basis von Fragebögen oder in kostenintensiven Einzelberatungen durch spezialisierte Experten durchgeführt. Insbesondere konzentriert sich die Analyse dabei auf einzelne besonders gefährdete Objekte ohne ausreichende Berücksichtigung des urbanen Gebietes. Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte und mit Stadtplanern der öffentlichen Hand und der Privatwirtschaft wird seit 2011 die VITRUV-Software als ein ziviles Risikoanalysewerkzeug entwickelt. Die sowohl auf empirischen Daten als auch auf physikalischen Modellen basierende Risikoanalyse hilft Stadtplanern und ihren Partnern wie z.B. Architekturbüros eine wissenschaftlich fundierte Sicherheitsbewertung mit vertretbarem Aufwand durchzuführen. Jedoch gehören solche Sicherheitsbewertungen nicht unbedingt zum Tagesgeschäft von Architekten oder Ingenieurbüros und wären daher sinnvoller bei Bedarf als externer Service anzubieten – insbesondere da eine wachsende Zahl von urbanen Geoinformationen und 3D-Stadtmodellen heutzutage bereits über Online-Portale verfügbar sind.

Daher arbeiten das Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung (IGD) und das Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut (EMI) in dem Projekt UrbanRiskPortal an dem gemeinsamen Ziel, den Zugang zu einer urbanen Risikobewertung für Stadtplaner und Architekten zu erleichtern. Für diesen Zweck wird die VITRUV-Software in einer vom Fraunhofer IGD entwickelten cloudbasierten service-orientierten Plattform zur Verfügung gestellt. Die Umsetzung in einer Cloud-Lösung ermöglicht bei Bedarf eine erhöhte Rechenleistung durch einen serverseitigen Rechencluster und genügt außerdem hohen Anforderungen an Verfügbarkeit und Ausfallsicherheit. Ein wichtiger Bestandteil der Umsetzung ist zudem die Gewährleistung einer hohen Sicherheit für die sicherheitsrelevanten Algorithmen, Daten und Ergebnisse. Eine grafische Benutzeroberfläche auf der Basis von 3D Stadtmodellen mit einer ansprechenden Visualisierung ermöglicht auch Planern ohne Expertenwissen eine intuitive Risikobewertung.

In den folgenden Abschnitten wird das Konzept einer Cloud-Lösung zur urbanen Risikoanalyse im Detail vorgestellt. Dabei ist die Anwendung so konzipiert, dass Expertise im Bereich von 3D-Stadtmodellen erforderlich ist, nicht aber im Bereich der Risikobewertung. In Abschnitt 1 werden die erforderlichen Daten betrachtet, wobei sowohl die Geometrie als auch die Attributierung Ansprüche erfüllen muss, um die Qualität der Analyse zu steigern. Darauf aufbauend wird in den nächsten beiden Abschnitten die eingesetzte Software vorgestellt: In Abschnitt 2 folgt das Risikoanalysewerkzeug VITRUV und in Abschnitt 3 die Software für die Aufbereitung und Verarbeitung der Geodaten. In Abschnitt 4 wird deren Zusammenspiel im UrbanRiskPortal erläutert, bevor das Paper mit einem Fazit abgeschlossen wird.

¹ Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD, Fraunhoferstraße 5, 64283 Darmstadt, E-Mail: andreas.stein@igd.fraunhofer.de

² Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut (EMI), Am Klingelberg 1, 79588 Efringen-Kirchen, E-Mail: bachmann@emi.fhg.de

1 Das 3D-Stadtmodell in der Cloud

Die Heterogenität und Qualität von Geodaten schwankt trotz zunehmender Standards sehr stark. Während sich CityGML als Datenformat in Deutschland durchzusetzen scheint gibt es weiterhin Städte und Kommunen, die 3D-Stadtmodelle in verschiedenen Formaten fortführen. Die daraus resultierenden Unterschiede in den Daten müssen vor einer weiteren Verarbeitung bereinigt werden. Die Hochschule für Technik in Stuttgart hat für die frühzeitige Erkennung von geometrischen Fehlern den CityDoctor entwickelt. Dabei handelt es sich um Methoden und Metriken zum Qualitätsmanagement von 3D-Stadtmodellen. Dieses System wird im UrbanRiskPortal eingesetzt um kritische geometrische Fehler vor der Analyse zu erkennen. Weiterhin ist das UrbanRiskPortal so konzipiert, dass es mit einer sehr geringen Detailierung der Daten arbeiten kann. So ist es möglich eine aussagekräftige Analyse auf Basis von Level of Detail (LoD) 1 durchzuführen. Weiterhin steigert zwar ein digitales Geländemodell die Qualität des Ergebnisses und wertet die Visualisierung auf, ist aber für die Durchführung nicht erforderlich.

Neben den geometrischen Anforderungen an die Daten ist eine korrekte Attributierung notwendig, um das Risiko einzelner Gebäude korrekt zu berechnen. Aus dem Standard CityGML kommen die drei Attribute class, function und usage. Das Attribut class beschreibt die Klassifikation der Objekte, beispielsweise Straße, Straßenbahn, Bahn, oder Platz. Das Attribut function enthält den Zweck des Objekts, wie Bundesstraße oder Kreisstraße, während das Attribut usage definiert, wie ein Objekt genutzt wird. Für diese Attribute existieren Codelisten, die zum Beispiel die verschiedenen Nutzungsarten mit einem dazugehörigen Code verknüpfen.

Weitere Eigenschaften wie Qualität der Fenster oder des Mauerwerks werden ebenfalls bei der Analyse berücksichtigt. Diese Eigenschaften können als Attribute im CityGML-Format abgelegt werden. Das System gibt bei nicht vorhandener Attributierung die Möglichkeit die Werte manuell auszuwählen oder nimmt einen Standardwert an. Durch eine so korrekt vorgenommene Attributierung und qualitätsgesicherte Geometrien kann eine aussagekräftige Risikobewertung für 3D-Stadtmodelle vorgenommen werden.

Eine alternative Lösung wäre die Entwicklung einer CityGML Application Domain Extension (ADE). In diesem Projekt wurde sich gegen die Entwicklung einer ADE entschieden, da die nötigen Eigenschaften und deren Werte auch als generisches CityGML-Attribut abgelegt werden können, was wiederum die Benutzbarkeit der Anwendung steigert. Durch die steigende Nutzung von 3D-Stadtmodellen in der Anwendungsentwicklung werden immer mehr Stadtmodelle als Open Data zur Verfügung gestellt. Während dadurch eine deutliche Steigerung von verfügbaren Anwendungen erreicht wird, birgt es für die Gesellschaft auch Gefahren. Menschen mit böswilligen Absichten könnten versuchen eine Risikoanalyse auf Basis von Open Data durchzuführen, um dadurch einen besonders verwundbaren Punkt im 3D-Stadtmodell zu finden.

Um das zu verhindern, wird die im Projekt entwickelte Software als Webservice betrieben. Die zugrundeliegenden Algorithmen der VITRUV-Software werden nicht nach außen gegeben, sondern laufen im Backend auf den Servern des Fraunhofer EMI.

2 Das Risikoanalyse-Tool für den Einsatz als Webservice

Die zivile Risikoanalyse-Software integriert Sicherheitsaspekte direkt in den städtischen Planungsprozess im Sinne einer resilienten und nachhaltigen Stadtplanung. Sie unterstützt bei der Identifikation und Beurteilung potenzieller Schwachstellen und bietet zudem gezielte Gegenmaßnahmen inklusive Kostenabschätzung.

VITRUV erfordert keinerlei Expertenwissen und unterstützt Planer und Entscheider auf zwei verschiedenen Ebenen. Zunächst hilft die empirische Risikoanalyse bei der Erkennung potenziell gefährdeter Punkte in der Stadt und bietet so eine schnelle wissenschaftlich fundierte Einschätzung der Gefährdungslage. Zweitens ermöglicht die physikalische Risikoanalyse basierend auf kurzzeitdynamischen Ingenieurmodellen und Strukturversagensbewertungen eine detaillierte Prognose möglicher Schäden. Mit Gegenmaßnahmen wie Gebäudeverstärkung, Sicherheitsglas oder Pollern ist es den Planern dann möglich die Sicherheit ihrer städtischen Gebiete bereits in der Planungsphase deutlich zu erhöhen. Schließlich schätzt VITRUV die Kosten und ermöglicht damit eine erste Kosten-Nutzen-Analyse.

2.1 Risikoanalysen

Eine städtische Umgebung besteht aus verschiedenen Objekten wie Gebäuden, Verkehrswegen, Verkehrsknotenpunkten und öffentlichen Plätzen. In dieser städtischen Umgebung gibt es für terroristische Bedrohungen verschiedene Szenarien wie beispielsweise Explosionsereignisse oder biochemische Kontamination. Dieser Artikel konzentriert sich auf Explosionsereignisse, die in verschiedene Bedrohungsklassen eingeteilt werden können - in der Größe von Rucksäcken über Koffer bis hin zu kleinen und großen Fahrzeugen. Die Frequenz $F(T_i, b_k)$ für ein Ereignis am Ort des Objektes b_k mit der Bedrohungsklasse T_i hat die Einheit Ereignisse / Jahr. Das Risiko R eines städtischen Objektes b_k für ein solches Ereignis der Bedrohungsklasse T_i ist als das Produkt der Ereignisfrequenz F mal der Konsequenz C des Ereignisses definiert:

$$R(T_i, \vec{b}_k) = F(T_i, \vec{b}_k) \cdot C(T_i, \vec{b}_k) \left[\frac{\text{consequences}}{\text{year}} \right] \quad (1)$$

Zur Schätzung der Konsequenzen gibt es zwei verschiedene Ansätze – einmal die empirischen Konsequenzen aufgrund historischer Daten und dann die physikalischen Konsequenzmodelle.

2.1.1 Empirische Risikoanalyse

Der Zweck der empirischen Risikoanalyse ist es besonders bedrohte Punkte (Hotspots) und Punkte hoher Verwundbarkeit (Schwachstellen) zu identifizieren. Die Häufigkeit des Auftretens für eine bestimmte Art von Bedrohung bezüglich einer Gebäudekategorie wird aufgrund empirischer Daten aus vergangenen Ereignissen ermittelt. Historische Daten für die Bedrohung durch intendierte Explosionsereignisse werden aus der hauseigenen Terror-Ereignis-Datenbank (TED) mit 80.000 Ereignissen weltweit entnommen (FISCHER et al. 2013). Teil des Datensatzes sind dabei auch die empirischen Konsequenzen wie die Anzahl betroffener Personen und die Anzahl der Personenschäden.

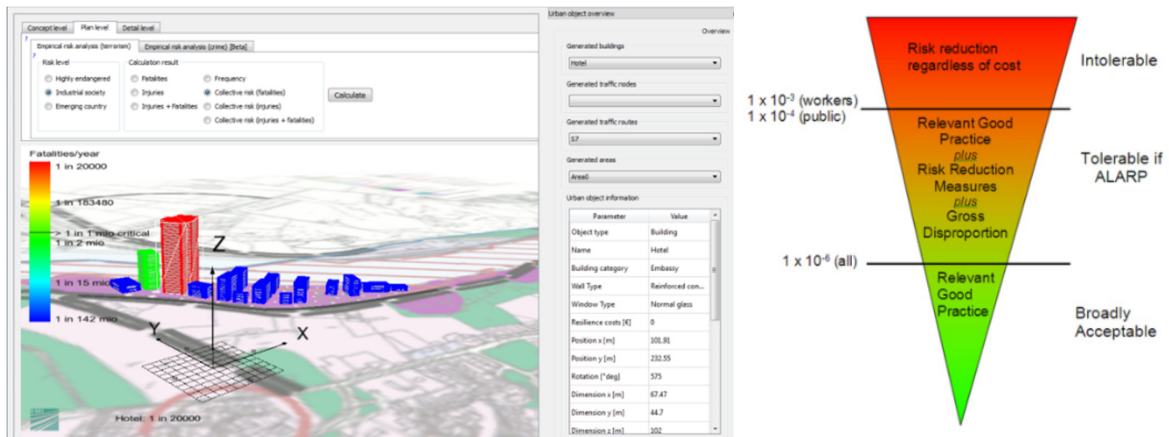


Abb. 1: Empirisches Risiko für Personenschäden in Gebäuden (links), Individuelle Risikolevel definiert durch den "UK Health & Safety Executive Report" von 2001 (rechts)

Abschließend berechnet VITRUV das kollektive Risiko nach (1) und unterstützt den Planer bei der Einschätzung, ob das Risiko kritisch oder akzeptabel ist mit Akzeptanzgrenzen. Der Vergleich zwischen dem kollektiven empirischen Risiko für Personenschäden in Abb. 1 (links) und den Akzeptanzgrenzen der britischen Health and Safety Exekutive (2001) (HSE 2014) in Abb. 1 (rechts), hilft bereits die Gefährdungslage für das betrachtete städtische Umfeld zu bewerten.

So identifiziert die empirische Risikoanalyse die kritischen Punkte im Stadtgebiet. Das ist allerdings nur der Ausgangspunkt für eine detaillierte physikalische Risikoanalyse und anschließende Optimierung des städtischen Gebietes. Die empirischen Konsequenzen betrachten nur einzelne Objekte. Expositionen durch benachbarte Objekte können mit diesem Ansatz nicht berücksichtigt werden.

2.1.2 Detaillierte physikalische Risikoanalyse

Um das Risiko und die Konsequenzen von Bedrohungsereignissen genau beurteilen zu können, ist eine detaillierte Repräsentation des Stadtgebiets nötig. Die empirische Analyse liefert eine sofortige empirische Bestimmung der am meisten gefährdeten Punkte (Hotspots) im Stadtgebiet, die jedoch noch keine Schlüsse über mögliche Konsequenzen zulässt. Die detaillierte Analyse ermöglicht dagegen eine genauere Prognose der möglichen Konsequenzen mit physikalischen Modellen (FISCHER et al. 2016), die zwischen mehreren Minuten und Stunden für die Berechnung benötigt. Die physikalischen Modelle führen somit in der Konsequenz zu besseren Risikovorhersagen. Außerdem werden neben der Nachbarschaft auch Schutz- und Verstärkungsmaßnahmen mit einbezogen. Der allgemeine Ansatz ist für eine große Anzahl von Konsequenzmodellen anwendbar. Zunächst wird dazu ein Raster von möglichen Bedrohungspositionen im Stadtgebiet erstellt. Die einzelnen Positionen werden dabei mit Hilfe einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion in Abhängigkeit von ihrem Abstand zu verschiedenen Objekten gewichtet. Die Gesamtsumme der Ereignisfrequenzen F über alle Bedrohungspositionen r wird dann durch (Gleichung 2) bestimmt.

$$F(\vec{b}_k, T_i^{threat}, A_j^{event}) = \iint_{A_j^{event}} f(\vec{b}_k, T_i^{threat}, \vec{r}) dr_x dr_y \quad (2)$$

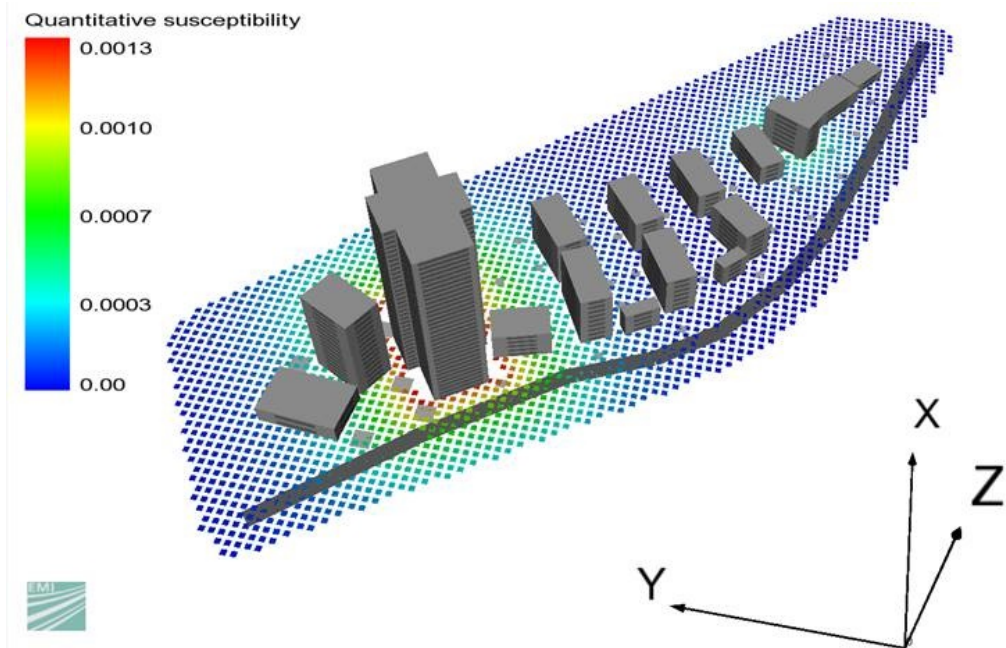


Abb. 2: Die Bedrohungspunkte erhalten Empfindlichkeitswerte in Abhängigkeit von ihrem Abstand zu umgebenden Objekten.

Die Verletzlichkeit V des Stadtgebiets ergibt sich aus der durchschnittlichen Summe aller Konsequenzen an den verschiedenen Ereignispositionen r_j nach (Gleichung 3).

$$V(H(T_i^{threat}; P), \vec{r}_o, T_n^{consequence}) = \frac{1}{n_{location}} \sum_{j=1}^{n_{location}} C(H(T_i^{threat}, r_j^{event}; P), \vec{r}_o, T_n^{consequence}) \quad (3)$$

Die konkreten Konsequenzen C des Explosionsereignisses werden dabei mithilfe verschiedener physikalischer Modelle für Strukturschäden, direkte und indirekte finanzielle Schäden sowie Personenschäden berechnet.

Die Berechnung einer Druckstoßbelastung erfolgt, indem Druck-Zeit-Ladefunktionen mit empirischen Gleichungen, beispielsweise nach Kingery-Bulmash (KINGERY & BULMASH 1984) **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** für die Massen-Abstands-Beziehungen verwendet werden. Der Schaden für Personen und Gebäude kann mit Hilfe von Probit-Funktionen (BOWEN et al. 1968) und vereinfachten mechanischen Modellen, wie zum Beispiel dem Einmassenschwinger (EMS) prognostiziert werden (RIEDEL et al. 2010) **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Dabei werden die typischen Personendichten und Wiederaufbaukosten für alle Gebäudetypen und Nutzungsarten, sowie das Kollapsverhalten von erfahrenen Bauingenieuren bereitgestellt (MÜLLERS et al. 2015), wodurch quantitative Schadensaussagen zur Personengefährdung und zum Gebäudeschaden getroffen werden können.

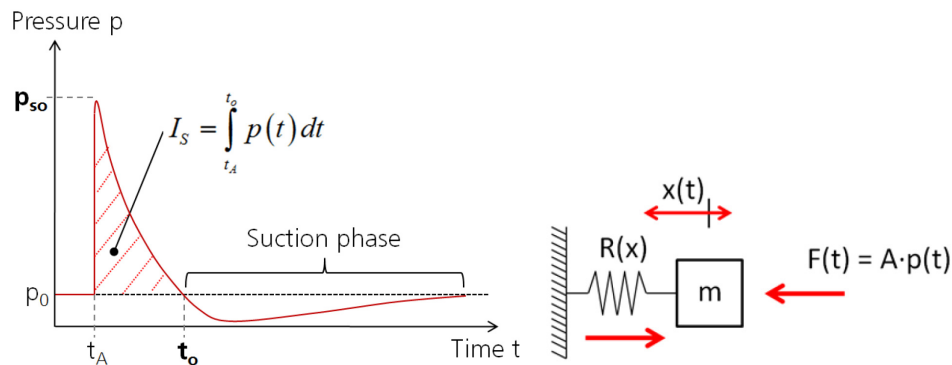


Abb. 3: Generalisierter Druck-Zeit-Verlauf während einer Explosion (links). Einmassenschwinger Modell zur vereinfachten Beschreibung des Strukturverhaltens unter Blastbelastung (rechts).

Das berechnete Ergebnis in Abb. , links unten, prognostiziert in 18% aller relevanten Ereignisse eine Zerstörung der (herkömmlichen) Verglasung des Hochhauses bis zur 8. Etage. Dieses lokale Einzelrisiko kann direkt mit den Einzelrisiken in Abb. 1 verglichen werden, wenn sie mit der Gesamt ereignisfrequenz für das Stadtgebiet aus (2) multipliziert werden.

Das lokale individuelle Risiko für Personenschäden erreicht neben dem Hochhaus im Freien 3% (Abb. links oben). Das Nachbarhaus auf der rechten Seite hat in seiner Umgebung immer noch ein vergleichbar hohes lokales Risiko, trotz seiner Verwendung als Wohngebäude.

Bezüglich des progressiven Kollaps ist das Hochhaus (Abb. rechts oben) voraussichtlich in 1 von 200 Ereignissen betroffen. Es verfügt über ein solides Tragwerk aufgrund seiner Größe und ist daher viel weniger Risiko ausgesetzt als das rot gefärbte Gebäude weiter rechts, für das fast jedes fünfte Ereignis zu einem Kollaps führen wird - ein Risiko, das es wert ist zu berücksichtigen.

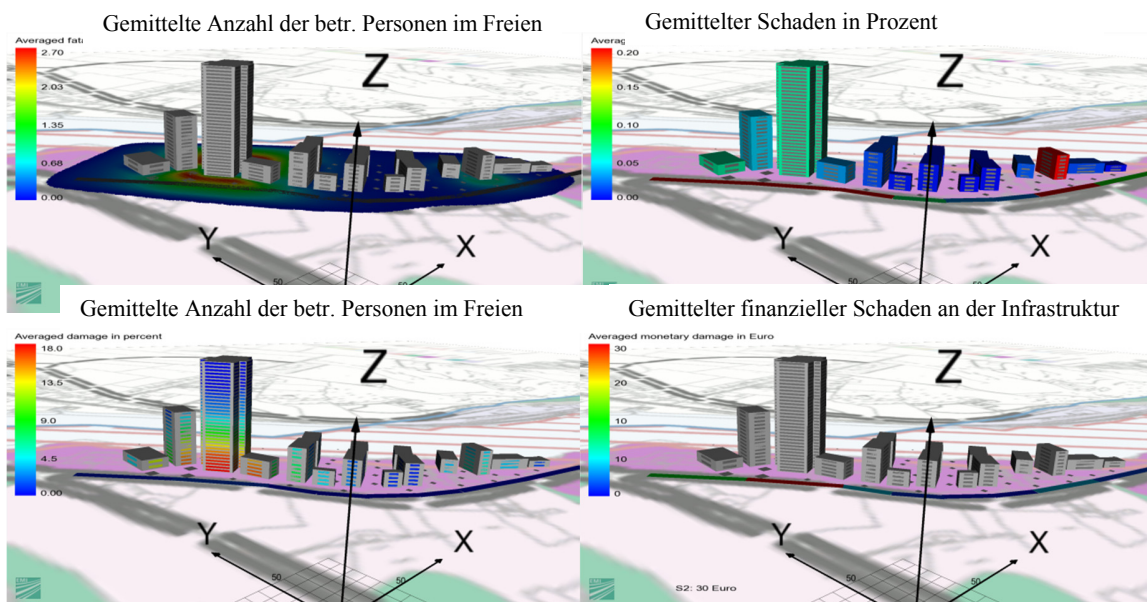


Abb. 4: Physikalische Konsequenzmodelle für die quantitative Risikoanalyse. Oben links: Personenschäden in Gebäuden nach einem angenommenen Anschlagsszenario. Oben rechts: Progressiver Einsturz von Gebäuden. Unten links: Fensterschäden. Unten rechts: Gemittelte finanzielle Schäden an der Infrastruktur.

Eine mögliche Verbesserungsmaßnahme in einer frühen Phase der Projektplanung ist eine Umgestaltung des urbanen Gebietes – also z.B. eine Verlegung von Gebäuden mit hoher Gefährdung in entsprechende zum Beispiel mit Pollern geschützte Areale. Des Weiteren kann die Konstruktion eines Gebäudes verstärkt werden. Dafür stehen verschiedene Optionen mit Kostenschätzungen zur Verfügung, wie z.B. duktiler Beton, Beton mit erhöhtem Bewehrungsgrad oder verstärktes Mauerwerk (STOLZ et al. 2014). Einige Verstärkungsmaßnahmen lassen sich auch auf bestehende Gebäude anwenden, wie zum Beispiel der Einsatz von Sicherheitsglas. Die kurzzeitdynamischen Berechnungsmodelle basieren auf Stoßrohr- und Sprengversuchen wie in Abb. dargestellt. In Abb. (rechts) ist die experimentelle Erprobung einer nachträglich installierten Schutzmaßnahme für Mauerwerk zu sehen. Das Produkt verhindert das Eindringen von Fragmenten ins Rauminnere und bietet damit ausgezeichneten Explosionsschutz.



Abb. 5: Experimentelle Stoßwellentests an normalem Glas (links) und Sicherheitsglas (Mitte). Experimentelle Erprobung einer Schutzmaßnahme für Mauerwerk (rechts).

Durch das UrbanRiskPortal wird das Expertenwissen von VITRUV für Stadtplaner und ihre Partner als Webservice zur Verfügung gestellt.

3 GeoToolbox

Bei der GeoToolbox³ handelt es sich um eine Sammlung von Werkzeugen zur Verarbeitung von Geodaten. Dabei sind die einzelnen Werkzeuge unabhängig voneinander oder in Kombination einsetzbar. Die Funktionalität geht dabei von einfachen Prozessen wie Informationen über einen Geodatensatz erfahren bis hin zu der automatischen Erstellung einer Plug-In freien Webvisualisierung. Alle Werkzeuge der GeoToolbox werden als Kommandozeilen-Tools bereitgestellt sowie als Web-Service zur Verfügung gestellt. Daher können sie ohne weitere Problem in das UrbanRiskPortal integriert werden. Dort finden sie zum einen Anwendung in der Aufbereitung der Geodaten und in der Erstellung einer Plug-In-freien Webvisualisierung.

³ www.igd.fraunhofer.de/geo

4 UrbanRiskPortal

Das UrbanRiskPortal vereint die Analyse- und Risikobewertungsfunktion der VITRUV-Software mit den Prozessierungsfunktionalitäten der GeoToolbox in einem Webportal. Der Anwender startet die Bedienung mit dem Upload des 3D-Stadtmodells. Dazu wird ein CityGML-Datensatz benötigt. Sobald der Datensatz hochgeladen wurde steht die Möglichkeit der 3D-Visualisierung des Datensatz zur Verfügung. Bevor die Analyse ausgewählt wird kann der Anwender Informationen über die Attributierung des Datensatzes beim sogenannten XML-Mapping vornehmen. Sollten Attribute in dem Datensatzes mit anderen Namen vorliegen, können in diesem Schritt die geforderten Attribute angegeben werden. Im letzten Schritt kann der Anwender die Analyse konfigurieren. Dabei hat er die Möglichkeit monetäre Schäden und Personenschäden zu betrachten. Nachdem die Analyse erfolgreich durchgeführt wurde kann der Nutzer erneut das 3D-Stadtmodell betrachten, wobei Gebäude entsprechend ihrer Gefährdungsstufe eingefärbt werden.

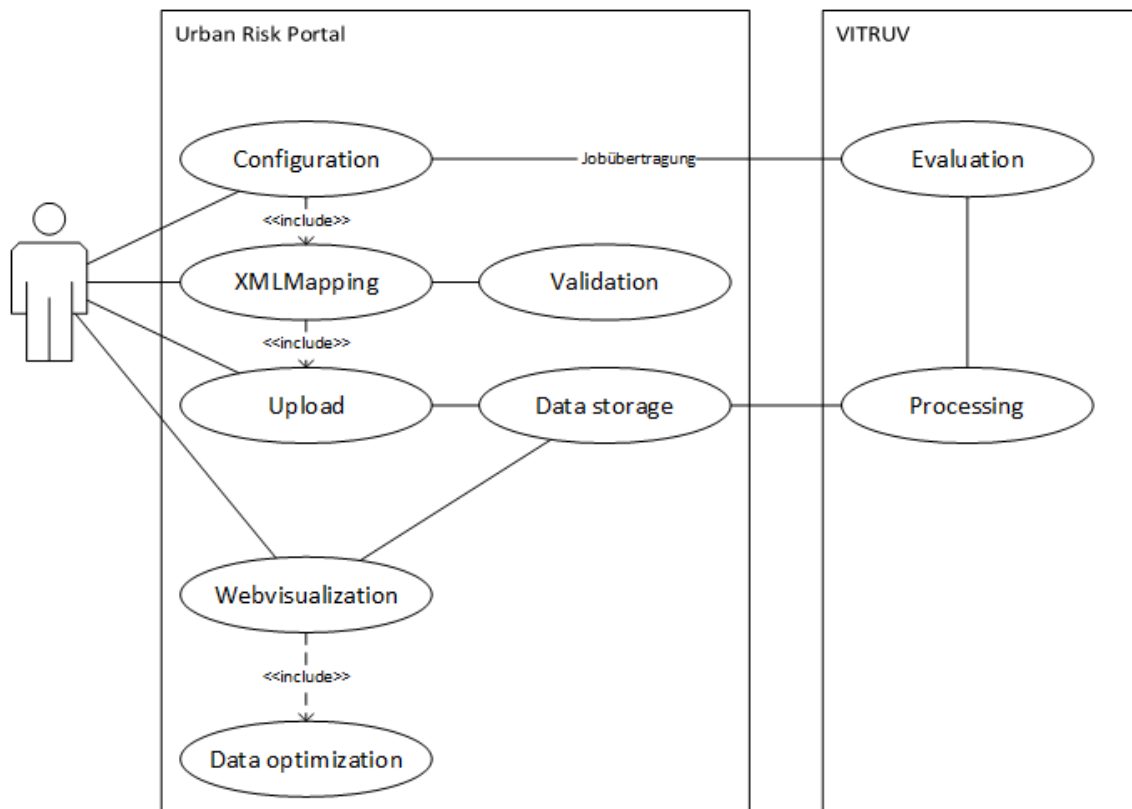


Abb. 6: Bedienung des UrbanRiskPortals aus Anwendersicht

4.2 3D Portrayal Service

Da die gesamte Benutzeroberfläche des UrbanRiskPortals webbasiert ist, ist eine entsprechende Ergebnisvisualisierung nötig. Da 3D-Stadtmodelle visualisiert werden sollen fiel die Entscheidung auf den 3D Portrayal Service (3DPS).

Mit Standards wie dem Web Map Service (WMS) ist es schon seit längerem Möglich 2D-Karten bereitzustellen, beziehungsweise in andere Applikationen einzubinden. Der 3D Portrayal Service

ist das Äquivalent des WMS für 3D-Geodaten. Er wurde entworfen um die Interoperabilität zu ermöglichen. Ein Entwurf von 3DPS wurde im Oktober 2015 veröffentlicht. Die Veröffentlichung der endgültigen Standards wird im Mai 2016⁴ erwartet. Der Standard unterstützt sowohl client- und serverseitiges Rendering und spezifiziert eine Schnittstelle um Daten von einem 3D-Geodaten-Server abzufragen und an einen Client zu übertragen.

Im Rahmen des Projekts wird der 3D Portrayal Service eingesetzt um eine ansprechende Visualisierung des 3D-Stadtmodells zu ermöglichen. Der Nutzer hat dabei die Möglichkeit das ursprüngliche Stadtmodell zu betrachten und direkt mit dem analysierten Stadtmodell zu vergleichen.

Das Ergebnis der Risikoanalysen wird farblich im 3D Stadtmodell dargestellt. Gebäude und Orte werden je nach Höhe der Gefährdungsstufe entsprechend eingefärbt.

5 Fazit

Durch die Kombination der hier beschriebenen Tools und Technologien ist es erstmals möglich eine Kombination von 3D-Stadtmodellen und quantitativer Risikoanalyse mit kurzzeitdynamischen Ingenieursmodellen zur Einschätzung der Gefährdungssituation im städtischen Gesamtkontext durchzuführen. Die ausfallsichere Bearbeitung von rechenintensiven Anfragen wird durch eine darunterliegende Cloud-Infrastruktur gewährleistet.

Die Risikoanalyse wird als Webdienst konzipiert, um so als „*Expertise on demand*“ ohne hohe, fixe Lizenzkosten dem Kunden zur Verfügung zu stehen. Die sicherheitsrelevanten und Know-How-intensiven Analyseverfahren bleiben in der sicheren Hand von Fraunhofer. Es wurde Wert auf einen intuitiven und einfachen Zugang über ein Web-Portal gelegt, damit Risikobewertungen auch von Anwendern durchgeführt werden können, die keine ausgewiesene Expertise in der Risikoanalyse haben.

Die konzipierte Systemarchitektur ermöglicht schnelle und effiziente Anpassungen an die jeweiligen Anforderungen zur Analyse und Visualisierung unterschiedlicher Szenarien.

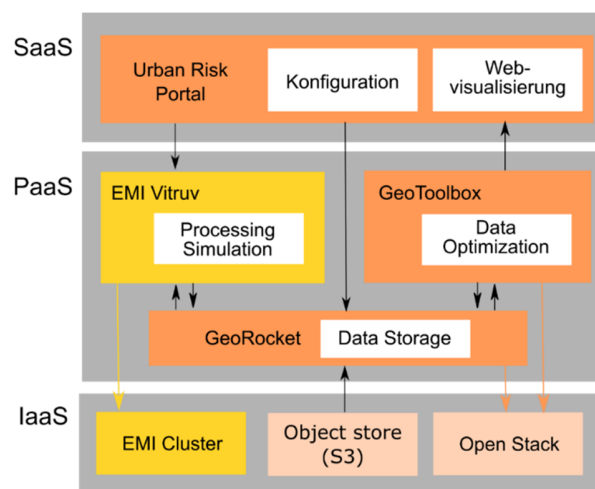


Abb. 7: 1 Die Komponenten des UrbanRiskPortals im Zusammenspiel

⁴ <http://www.opengeospatial.org/pressroom/pressreleases/2311/>

5 Literaturverzeichnis

- BOWEN, I, FLETCHER, E. & RICHMOND, D.R., 1968: Estimate of man's tolerance to direct effects of air blast. Headquarters Defense Atomic Support Agency, 37 p.
- FISCHER, K., SIEBOLD, U., VOGELBACHER, G., HÄRING, I. & RIEDEL, W., 2013: Empirical analysis of security critical events in urban areas. *Bautechnik*, **91**(4), 262-273.
- FISCHER, K., VOGELBACHER, G., HÄRING, I., RIEDEL, W. & HIERMAIER, S., 2016: Susceptibility, vulnerability and averaged risk analysis for resilience enhancement of urban areas. *International Journal of Protective Structures*, **7** (1), 45-76.
- HSE, 2014: UK Health & Safety Executive (HSE) Report. http://www.hse.gov.uk/foi/internal-ops/hid_circs/permissioning/spc_perm_37/
- KINGERY, C.N. & BULMASH, G., 1984: Airblast parameters from TNT spherical air bursts and hemispherical surface bursts. Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland, US.
- LIN, C., LIOU, D. & WU, K., 2007: Opportunities and challenges created by terrorism. *Technological Forecasting & Social Change*, **74**, 148-164.
- MÜLLERS, I., FISCHER, K. & NAWABI, A., 2015: Design against Explosions and Subsequent Progressive Collapse. *Structural Engineering International*, **25** (3), 319-325.
- RIEDEL, W., THOMA, K., MAYRHOFER, C., STOLZ A., 2010: Engineering and Numerical Tools for Explosion Protection of Reinforced Concrete. *International Journal of Protective Structures*, Multi-Science Publishing, **1**, 85-101.
- ROLLER, C. & STOLZ, A., 2014: A holistic protection portfolio for urban infrastructure. *Future Security - 9th Security Research Conference 2014*.
- STOLZ, A., FISCHER, K., ROLLER, C. & HAUSER, S., 2014: Dynamic bearing capacity of ductile concrete plates under blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, **69**, Elsevier, 25-38.
- UNITED NATIONS, 2011: World Urbanization Prospects, the 2011 Revision. Department of Economic and Social Affairs, http://esa.un.org/unup/CD-ROM/WUP2011-F02-Proportion_Urban.xls.