

# Normengerechte Auslegung von Lichtmasten bei PKW-Kollision mit Hilfe numerischer Simulationen

Prof. Dr. F. Kramer<sup>1)</sup>, S. Schick<sup>1)</sup>, Dr. I. Lepenies<sup>2)</sup>, Dr. M. Liebscher<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>HTW Dresden, Germany

<sup>2)</sup>Dynamore Dresden, Germany

## **Abstract:**

Der derzeit häufig versuchsorientierte Entwurf von Lichtmasten als Straßenrandbebauung und das Ermitteln der Insassensicherheitsstufe/Energieabsorptionskategorie ist durch die notwendige Anzahl von Versuchen zeitaufwändig und u.a. auch kostenintensiv. In diesem Beitrag erfolgt die Klassifikation von Lichtmasten auf Basis von numerischen Simulationsmodellen, die es erlauben die Anzahl notwendiger Crash-Tests zu reduzieren. Die Auswertung der numerischen Simulationen folgt dabei den Vorgaben der entsprechenden Normen.

Auf Basis des entwickelten Finite-Elemente-Modells werden die erforderlichen PKW-Mast-Simulationen durchgeführt und die zutreffende Klassifikation der beispielhaft untersuchten Lichtmasten ermittelt. Die durch die Normen definierten Bewertungsgrößen werden im Vergleich mit weiteren Bewertungsgrößen wie NIC bzw. HIC diskutiert.

## **Keywords:**

Lichtmast, PKW-Mast-Kollision, Insassensicherheit, Bauteilauslegung, LS-Dyna, Crash-Test

## 1 Einleitung

Lichtmasten als Straßenrandbebauung stellen bei der Kollision mit einem Fahrzeug ein Sicherheitsrisiko für die Fahrzeuginsassen dar. Das Sicherheitsrisiko wird nach [3] durch eine Klassifikation in Insassensicherheitsstufen bzw. Energieabsorptionskategorien quantifiziert. Zur Klassifikation der Lichtmasten werden derzeit aufwendige Versuche gemäß den Normen DIN EN 1317-1 und DIN EN 12767 durchgeführt. Entsprechend der ermittelten An- und Abprallgeschwindigkeiten des Fahrzeugs werden Lichtmasten in die Energieabsorptionskategorien hoch energieabsorbierend (HE), niedrig energieabsorbierend (LE) oder nicht energieabsorbierend (NE) eingestuft. Abhängig von den Kennwerten ASI und THIV [3] erfolgt die Bestimmung der Insassensicherheitsstufe 1 bis 4.

Der derzeit häufig versuchsorientierte Entwurf von Lichtmasten und das Ermitteln der Insassensicherheitsstufe/Energieabsorptionskategorie ist durch die notwendige Anzahl von Versuchen zeitaufwendig und u.a. auch kostenintensiv. In diesem Beitrag erfolgt die Klassifikation eines Lichtmastes auf Basis eines numerischen Simulationsmodells, das es erlaubt die Anzahl notwendiger Versuche zu reduzieren. Die Auswertung der numerischen Simulation folgt dabei den Vorgaben der o.g. Normen.

## 2 Normgerechte experimentelle Beurteilung der Insassensicherheit

Bisher wurden zur Einordnung der Lichtmasten hinsichtlich einer Insassensicherheitsstufe bzw. Energieabsorptionskategorie aufwendige Versuche gemäß den Normen DIN EN 1317-1 und DIN EN 12767 durchgeführt. Problematisch bei dieser Herangehensweise ist die nur bedingte Aussagefähigkeit der ASI- und THIV-Werte auf das Verletzungsrisiko der Insassen, da diese Kennzahlen basierend auf den Fahrzeuggeschwindigkeiten bzw. -beschleunigungen ermittelt werden [10]. Realistischere Insassenbeanspruchungen stellen vielmehr direkt am Dummy bestimmte Kennzahlen dar. Hierzu zählen u.a. der HIC- bzw. NIC-Wert [1,10].

Für die zu untersuchenden Anprallgeschwindigkeiten von 30, 50, 70 und 100 km/h sind sowohl eine Komplettkarosserie inkl. Sicherheitseinrichtungen (z.B. Airbag) als auch ein Mast vorzuhalten, welches die Anzahl an durchführbaren Versuchen aufgrund der hohen Kosten limitiert. Zur besseren und kostengünstigeren Beurteilung der Insassensicherheit bei einer Fahrzeug-Mast-Kollision wird im Folgenden die numerische Simulation des Versuches dargestellt.

## 3 Numerische Simulation der PKW-Mast-Kollision

Als Finite-Elemente-Programmsystem kam LS-Dyna zum Einsatz. Diese Software zeichnet sich durch Vielzahl an Modellierungsmöglichkeiten von Crash-Tests aus. Die Abbildung der hochgradig nichtlinearen physikalischen Vorgänge mit LS-Dyna hat sich in der Praxis vielfach bewährt. Speziell für stoßartige Kontaktprobleme eignet sich die Software, zumal neben der geometrischen Nichtlinearität auch das nichtlineare Materialverhalten abgebildet werden kann.

In der Diplomarbeit von S. Schick [11] wurde dieses Thema PKW-Mast-Kollision bearbeitet. Zur realitätsnahen Simulation wurden zunächst die Teilsysteme Boden, Boden-Mast-Kontakt, Mast-Fahrzeug-Kontakt kalibriert, verifiziert und validiert. Dies ist wichtig, da die mechanische Verhalten aller Subkomponenten einen Einfluss auf die Beschleunigung des Fahrzeuginsassen haben. Die Steifigkeiten bzw. Festigkeiten sind hierbei ausdrücklich nicht mit Sicherheitsfaktoren abzumindern, da sonst die Insassenbeanspruchungen unterschätzt werden. Die Schwierigkeit gegenüber einer herkömmlichen Bauteilbemessung liegt demnach in der realitätsnahen Abbildung des Komponentenverhaltens im Crash-Versuch.

Der kiesartige Boden ist durch spezifische Sieblinien nach DIN EN 12767 [3] geregelt. Aus Mangel an den sich daraus ergebenden mechanischen Materialeigenschaften wurden Oedometer-Versuche, welche an der TU Dresden [9] durchgeführt worden sind, simuliert. Basierend auf den im Oedometer-Versuch gemessenen Kraft-Verformungskurven für den Kiesboden wurden die Modellparameter für das Materialmodell \*MAT\_SOIL\_AND\_FOAM\_FAILURE (\*MAT\_014) bestimmt. Für die unterschiedlichen Verdichtungsgrade des Bodens wurden hierfür die Dichte, der Kompressions-/Schubmodul sowie die Versagensflächen des kohäsiven Materials ermittelt. Das nichtlineare Spannungs-Verzerrungs-Verhalten wurde durch Bestimmung der Relation von logarithmischer Volumendehnung zu dem hydro-statischen Druck erfasst. Das gewählte Bodenmodell ist in der Lage das charakteristische Verhalten des Bodens abzubilden (Bild 1).

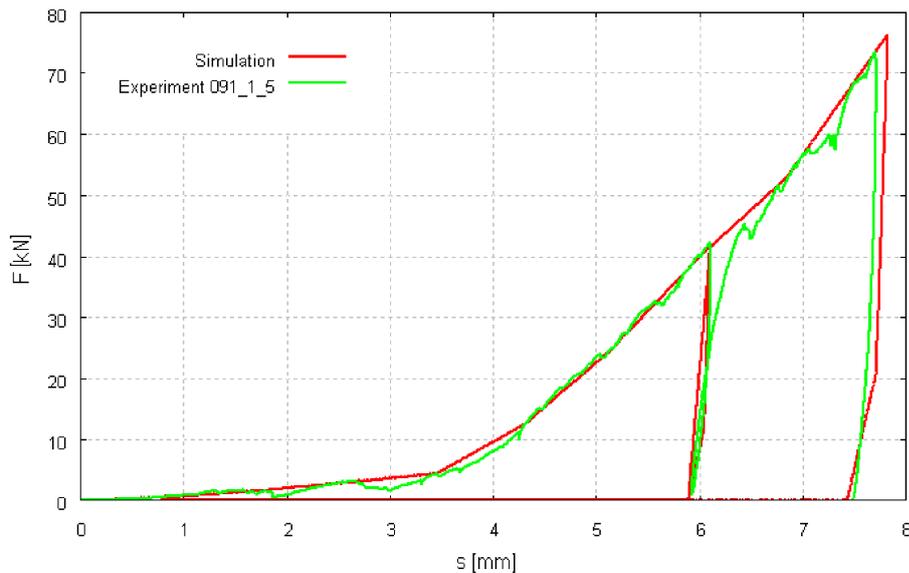


Bild 1: Bodenmaterial: Vergleich Simulation – Experiment [9]

Bei der Validierung des Boden-Mast-Kontaktes wurden von der Firma Europols Versuchsdaten zu einen Rammwagen-Versuch bereit gestellt. Der Vergleich von Simulation und Versuch bedingte eine geringe Rekalibrierung der Bodenparameter, da nicht identische Böden im Oedometer- und Rammwagen-Versuch benutzt wurden. Mit dem Programmsystem LS-Dyna konnte auch der Rammwagen-Versuch verifiziert werden (Bild 2).

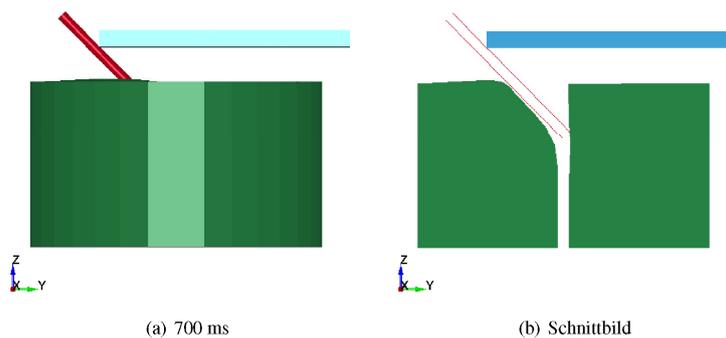


Bild 2: Rammwagenversuch: Vergleich Simulation – Experiment [13]

Im nächsten Schritt wurde der Mast-Fahrzeug-Kontakt modelliert. Für das Fahrzeugmodell, als weitere Teilkomponente der Gesamtsimulation, wurde ein FE-Modell von NCAC [12] verwendet. Die Vorgaben der Norm hinsichtlich der Masse und Geometrie des einzusetzenden Fahrzeugs wurden dabei erfüllt. Um sowohl die Schädigung des Fahrzeuges als auch das Versagen des Mastes realitätsnah abbilden zu können, wurde das Materialmodell \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY (\*MAT\_024) verwendet. Hierzu wurden sowohl für die

unterschiedlichen Stahlsorten die charakteristischen Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeiten modelliert als auch die von der Blechdicke abhängigen Grenzdehnungen verwendet.

Bei der Simulation zur Bestimmung der Insassensicherheit wurden die verifizierten und teilweise validierten Subsysteme zu einem Gesamtsystem kombiniert. Für die Zeitbereich 0 – 500 ms nach der Fahrzeug-Mast-Kollision wurden die Kennwerte ASI, THIV, NIC, HIC anhand der Simulationsergebnisse automatisiert ermittelt.

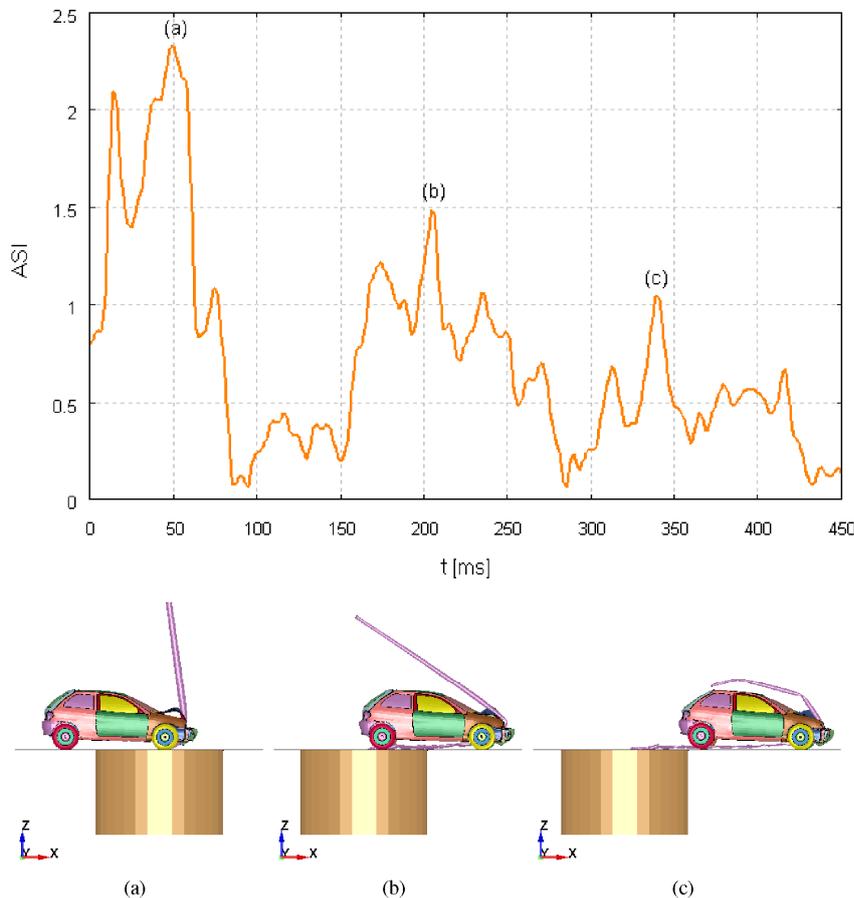


Bild 3: ASI-Werte bei PKW-Mast-Kollision: Geschwindigkeit 70 km/h, Mastwandstärke 1,5 mm

Bild 3 zeigt den zeitlichen Verlauf des ASI-Wertes nach der PKW-Mast-Kollision für die Geschwindigkeitsklasse 70 km/h, wobei für drei ausgewählte Zeitpunkte das jeweilige Verformungsbild angeben ist.

Zur genaueren Bestimmung der Insassenbeanspruchung wurden zusätzlich die HIC- und NIC-Werte ermittelt. Bild 4 zeigt exemplarisch für die Geschwindigkeitsklasse 50 km/h den am Dummy gemessenen Kopfbelastungswert von HIC = 39, wobei in Bild 5 ausgewählte Verformungsbilder für den Dummy dargestellt sind.

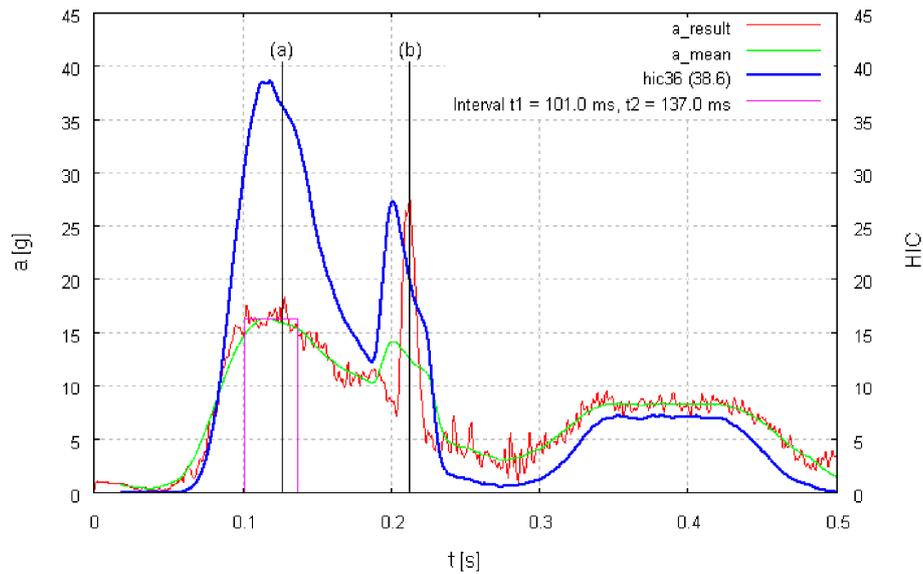


Bild 5: Kopfbeschleunigung und HIC-Wert für eine PKW-Mast-Kollision bei 50 km/h und einer Mastwandstärke von 1,5 mm

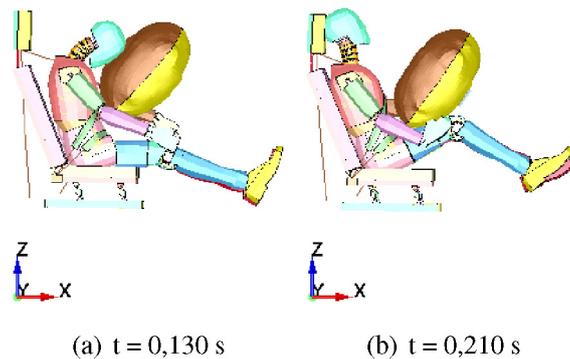


Bild 4: Bewegungszustand des Insassen zum Zeitpunkt der größten Kopfbeanspruchungen, vgl. Bild 4

Für die vier Geschwindigkeitsklassen wurden zuerst zwei unterschiedliche Wandstärken des Mastes hinsichtlich der Einordnung in eine Insassensicherheitsstufe untersucht, vgl. Bilder 6 und 7. Aufgrund der Möglichkeit eines Komplettversagens des Mastes (Abreißen des Mastes) und der daraus resultierenden geringeren Verzögerung von Fahrzeug und Insasse (größere Abprallgeschwindigkeit) konnte kein einfacher Zusammenhang zwischen Maststärke und Insassensicherheitsstufe gefunden werden. Eine Einordnung eines Mastes in eine Insassensicherheitsstufe bedarf demnach einer eigenen Simulation, bei der die spezifischen Geometrie- und Materialeigenschaften berücksichtigt werden.

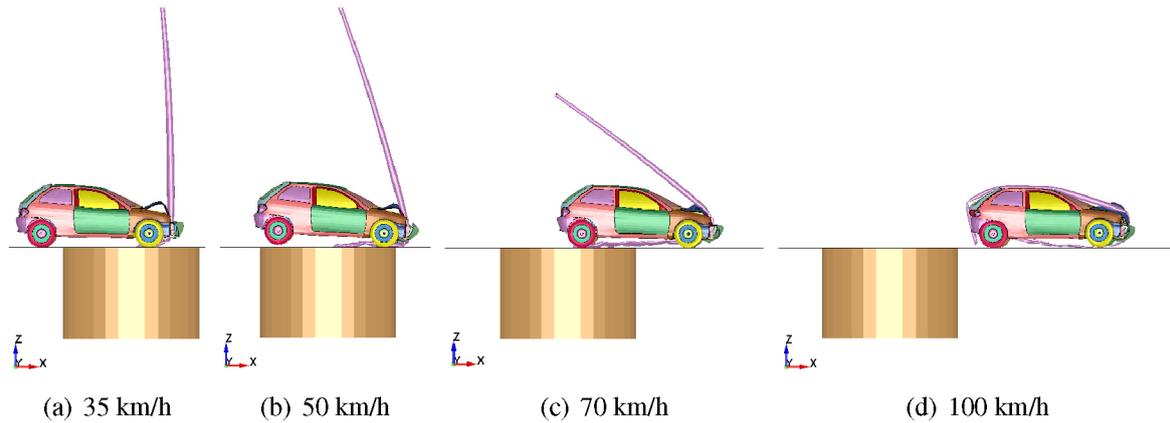


Bild 6: PKW-Mast-Kollisionen bei einer Mast-Wandstärke von 1,5 mm

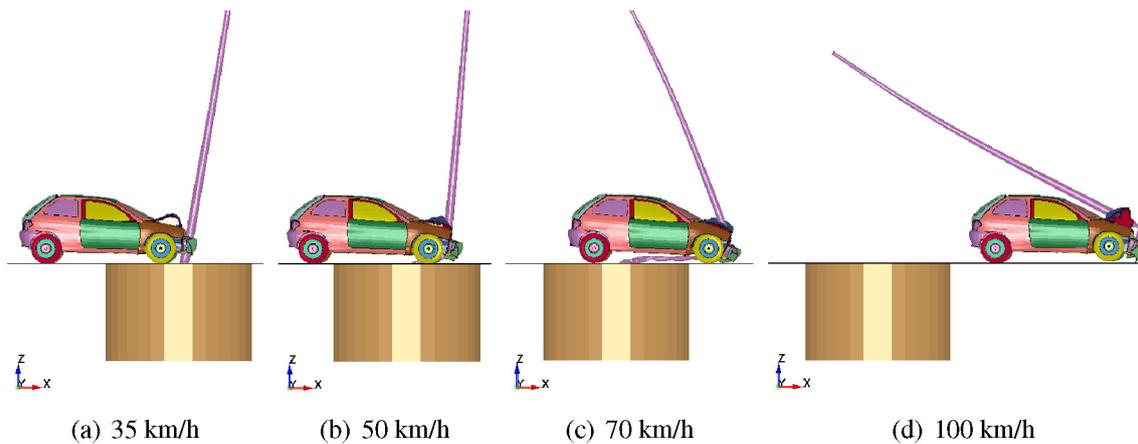


Bild 7: PKW-Mast-Kollisionen bei einer Mast-Wandstärke von 3,0 mm

Weiterhin wurde auch der Einfluss von idealisierten plastischen Materialmodellen auf das Energieabsorptionsvermögen und somit auf die Insassensicherheit betrachtet. Wie zu erwarten, ist für die Ermittlung der Insassensicherheit die Stahl-Verfestigung zu berücksichtigen, obwohl bei der Bauteilauslegung häufig nur ein ideal elasto-plastisches Materialmodell Anwendung findet. Die Modellierung einer Verfestigung von Stahl führt zu einer größeren Energieabsorption des Mastes beim Fahrzeug-Mast-Kontakt. Dies führt - durch die größere Verzögerung des Fahrzeugs - auch zu einem höheren Verletzungsrisiko des Insassen, was wiederum die Insassensicherheit beeinflusst.

#### 4 Zusammenfassung

Die PKW-Mast-Kollision zur Bestimmung der Insassensicherheit kann realitätsnah mittels einer numerischen Simulation abgebildet werden. Mit dem Programmsystem LS-Dyna wurden realitätsnahe Simulationen für den Fahrzeug-Mast-Crash durchgeführt, wobei ein Schwerpunkt auf verifizierte und validierte Subsysteme gelegt worden ist. Für die Einordnung eines Mastes in eine Insassensicherheitsstufe ist jeweils eine spezielle Simulation durchzuführen, bei der die jeweiligen Materialeigenschaften bzw. die spezielle Mastgeometrie und -verankerung zu berücksichtigen sind. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine numerische Simulation zur maßgeblichen Reduktion der Entwicklungskosten eines Mastes nicht nur geeignet ist, sondern vielmehr unverzichtbar erscheint. Die Möglichkeiten, in einer frühen Entwicklungsphase durch Sensitivitätsanalysen im Rahmen einer Mastoptimierung die Material- und Entwicklungskosten zu reduzieren, sind vielversprechend.

---

**5 Literatur**

- [1] CICHOS, D. ; VOGEL, D. de ; OTTO, M. ; SCHAAR, O. ; ZÖLSCH, S.: Crash-Analyse Beschreibung der Kriterien / Arbeitskreis Messdatenverarbeitung Fahrzeugsicherheit. 2005. – Forschungsbericht
- [2] DIN EN 10025–2: „Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 2: Technisch Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle“, Deutsche Fassung EN 10025–2: 2004
- [3] DIN EN 12767: „Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen für die Straßenausstattung – Anforderungen und Prüfverfahren“, Deutsche Fassung EN 12767: 2007
- [4] DIN EN 1317–1: „Rückhaltesysteme an Straßen – Teil 1: Terminologie und allgemeine Kriterien für Prüfverfahren“, Deutsche Fassung EN 1317–1: 1998
- [5] DIN EN 1317–1: „Rückhaltesysteme an Straßen – Teil 1: Terminologie und allgemeine Kriterien für Prüfverfahren“, Deutsche Fassung prEN 1317–1: 2007
- [6] DIN EN 40–1: „Lichtmaste – Teil 1: Definitionen und Benennungen; Dreisprachige Fassung EN40–1: 1991
- [7] DIN EN 40–2: Lichtmaste – Teil 2: Allgemeine Anforderungen und Maße“, Deutsche Fassung EN 40-2: 2004
- [8] LS–DYNA „KEYWORD USER’S MANUAL“, Volume I. Livermore Software Technology Corporation, May 2007
- [9] NACKE, E.: „Numerische Untersuchung des mechanischen Verhaltens von Schottersäulen in weichen Böden“, Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Diplomarbeit, 2009
- [10] KRAMER, F.: „Gutachten zur Sicherheit von Masten“ / SAFE Dresden. Forschungsbericht, 2009
- [11] SCHICK, S.: „Auslegung von Lichtmasten mit Hilfe der numerischen Simulation von PKW-Pfahl-Kollisionen“, HTW Dresden, Fakultät Maschinenbau/Verfahrenstechnik, Diplomarbeit, 2010
- [12] National Crash Analysis Center. <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>, 05.10.2009
- [13] COO, P.J.A.; LANG, J.P.M.; SCHIPPERS, R.J.: Influence of in situ conditions of standard soil on the passive safety performance of lighting columns and safety barrier posts / TNO Science and Industry, Forschungsbericht. 2008.

