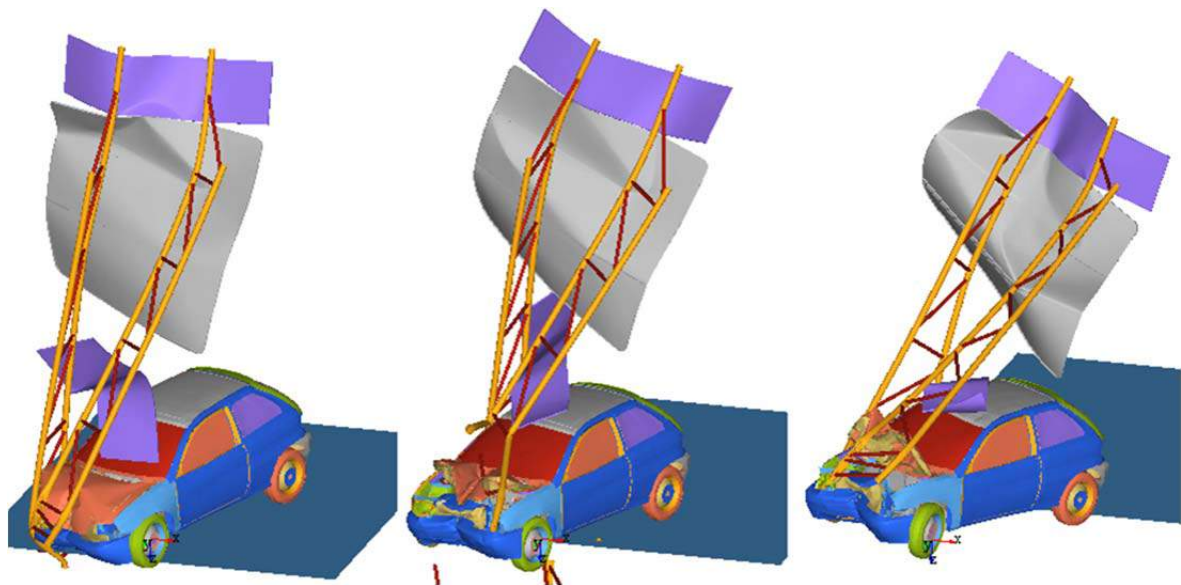


Risikomodell zur Analyse von Unfällen mit ortsfesten Hindernissen auf Autobahnen und Schnellstraßen (RISKANT)

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung 2011
(VIF2011)

07/2013



Impressum

Herausgeber und Programmverantwortung

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Renngasse 5
A - 1010 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
A - 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
A - 1010 Wien



Für den Inhalt verantwortlich

AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Donau-City-Straße 1
1220 Wien



Technische Universität Graz
Institut für Fahrzeugsicherheit (VSI)
Inffeldgasse 23/I
8010 Graz



Programmmanagement

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Bereich Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien



Risikomodell zur Analyse von Unfällen mit ortsfesten Hindernissen auf Autobahnen und Schnellstraßen (RISKANT)

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2011)

Autoren:

Priv.-Doz. DI Dr. Peter MAURER

DI Christian STEFAN

DI Rainer STÜTZ

DI Dr. Ernst TOMASCH

DI Peter LUTTENBERGER

DI Christoph KLEIN

Thomas PISTOTNIG

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Technische Universität Graz, Institut für Fahrzeugsicherheit (VSI)

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	10
1.1	Projektbeschreibung und Ziele.....	10
1.2	Grundsätzliche Überlegungen zum Projekt.....	11
2	Ausgangslage.....	13
2.1	Definition der Risikogruppe	17
2.2	Deskriptive Unfallanalyse	19
2.3	Analyse der Unfallskizzen der Statistik Austria	26
3	Modellierung von Abkommensunfällen.....	29
3.1	Methodische Vorgehensweise	31
3.1.1.	Generalisierte Lineare Modelle.....	32
3.1.2.	Regressionsmodelle für Zähldaten.....	33
3.1.3.	Schätzung des Überdispersionsparameters.....	34
3.1.4.	Modellwahl.....	34
3.1.5.	Variablenselektion.....	35
3.2	Datengrundlagen.....	35
3.2.1.	Unfalldaten.....	37
3.2.2.	RoadSTAR Daten.....	39
3.3	Modellwahl	44
3.4	Anwendungsbeispiele	51
3.4.1.	Abkommensmodell für Streckenabschnitte.....	51
3.4.2.	Abkommensmodell für Knoten.....	54
4	Risikobewertung von Anprallobjekten	57
4.1	Risikobewertung von Anprallobjekten	57
4.2	Definition der Lastenmatrix zur Simulation ortsfester Hindernisse.....	63
4.2.1.	Normative Anforderungen nach EN 1317.....	63
4.2.1.1	Abnahmekriterien für Anprallprüfungen	66

4.2.2.	Normative Anforderungen nach EN 12767.....	67
4.2.2.1	Anforderungen an den Prüfgegenstand.....	67
4.2.2.2	Versuchsfahrzeug.....	69
4.2.3.	Ermittlung der Lastmatrix für die FE Simulation.....	69
4.3	Simulationsmodelle.....	70
4.3.1.	Fahrzeugsimulationsmodell Geo Metro.....	70
4.3.2.	Anprall an Lichtmast.....	72
4.3.2.1	Simulationsmodell.....	72
4.3.2.2	Materialien im FE Modell.....	73
4.3.2.3	Simulationsmatrix.....	74
4.3.2.4	Simulationsergebnisse Lichtmast.....	75
4.3.2.5	Einschränkungen der Simulationsergebnisse.....	76
4.3.3.	Anprall an Verkehrszeichen auf I-Träger.....	77
4.3.3.1	Simulationsmodell.....	78
4.3.3.2	Materialien im FE Modell.....	79
4.3.3.3	Simulationsmatrix.....	80
4.3.3.4	Simulationsergebnisse VZ auf I-Träger.....	81
4.3.4.	Anprall an Rohrrahmensteher.....	84
4.3.4.1	Simulationsmodell.....	84
4.3.4.2	Materialien im FE Modell.....	85
4.3.4.3	Simulationsmatrix.....	86
4.3.4.4	Simulationsergebnisse Rohrrahmen.....	86
4.3.5.	Anprall an Gittersteherkonstruktion.....	89
4.3.5.1	Simulationsmodell.....	90
4.3.5.2	Materialien im FE Modell.....	90
4.3.5.3	Simulationsmatrix.....	91
4.3.5.4	Simulationsergebnisse Gittersteher.....	91

4.3.6.	Anprall an Baum.....	95
4.3.6.1	Materialien im FE Modell	97
4.3.6.2	Simulationsmatrix.....	97
4.3.6.3	Simulationsergebnisse Baumkollisionen.....	98
4.3.6.4	Einschränkungen	102
4.3.7.	Einschränkungen zu den Simulationen.....	103
4.3.8.	Schlussfolgerungen der Anprallsimulationen.....	106
4.4	Risikobewertung im Vergleich	109
4.4.1.	Überlegungen zu Abkommenswinkel und -geschwindigkeit.....	109
4.4.2.	Überlegungen zur Abkommensdistanz am Fahrbahnrand.....	114
4.4.2.1	Theoretische Überlegungen.....	114
4.4.2.2	Simulation von Abkommensunfällen	120
4.4.2.3	Simulationsmatrix.....	120
5	Absicherungsmassnahmen	124
5.1	Ausfahrtsbereich (Trenninselspitz).....	125
5.1.1.	Risikosituation.....	125
5.1.2.	Unfallzahlen.....	125
5.1.3.	Praxisbeispiele.....	126
5.1.4.	Maßnahmen.....	129
5.2	Bäume und Sträucher	132
5.2.1.	Risikosituation.....	132
5.2.2.	Unfallzahlen.....	133
5.2.3.	Praxisbeispiele.....	133
5.2.4.	Maßnahmen.....	135
5.3	Brückenfundamente und -pfeiler	138
5.3.1.	Risikosituation.....	138
5.3.2.	Unfallzahlen.....	138

5.3.3.	Praxisbeispiele.....	139
5.3.4.	Maßnahmen.....	141
5.4	Lärmschutzwände	142
5.4.1.	Risikosituation.....	142
5.4.2.	Unfallzahlen.....	142
5.4.3.	Praxisbeispiele.....	142
5.4.4.	Maßnahmen.....	143
6	Bewertungsverfahren für ortsfeste Hindernisse im ASFINAG-Netz	144
6.1	Definition von ASI-Matrizen nach Kollisionsobjekten	144
6.2	Berechnung des Kollisionsrisikos.....	146
6.3	Bewertung der spezifischen Risikosituation.....	147
	LITERATURVERZEICHNIS.....	151
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	155
	TABELLENVERZEICHNIS.....	158

ZUSAMMENFASSUNG

Bei einem Anprall gegen ein ortsfestes Hindernis durch Abkommen eines Fahrzeugs von der Fahrbahn ist in der Regel mit schwerwiegenden Verletzungen der Fahrzeuginsassen zu rechnen. Insbesondere beim Seitenanprall sind tiefe Intrusionen in den Fahrzeuginnenraum möglich. Im Mittelpunkt des Projekts RISKANT steht daher die Fragestellung, wie derartige Unfälle zukünftig verhindert bzw. in ihrer Unfallschwere reduziert werden können. Ziel des gegenständlichen Projekts ist es, ein Risikomodell zu erstellen, mit dessen Hilfe (orts-)spezifische Abkommenswahrscheinlichkeiten berechnet werden können. Ferner soll das Verletzungsrisiko bei Kollision mit verschiedenen ortsfesten Hindernissen evaluiert werden.

Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn stellen mit rd. 60% den Großteil der Abkommensunfälle am ASFINAG-Netz. Bei derartigen Unfällen waren in der Vergangenheit 43% aller Getöteten, 41% der Schwerverletzten und 30% der Leichtverletzten auf Autobahnen und Schnellstraßen zu beklagen.

Der überwiegende Teil (93%) der Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn „passiert“ auf der Kernfahrbahn, lediglich 7% (jeder 14. dementsprechende Unfall) ereignen sich auf Rampen. Aus diesem Grund und wegen fehlender (Exposure-)Daten wurden für die Modellbildung lediglich die Hauptfahrbahnen des österreichischen Autobahnnetzes herangezogen. Nichtsdestoweniger kann der gewählte Modellansatz auch zur Evaluierung von Schnellstraßen herangezogen werden. Zwecks Berechnung der Modellkoeffizienten müsste jedoch zuallererst die benötigte Datenbasis aufbereitet bzw. im Falle von Rampen überhaupt erst erhoben werden.

Zur Bestimmung der relativen Abkommenswahrscheinlichkeit von Streckenabschnitten bzw. Knotenpunkten wurden verschiedene Straßenparameter (z.B. Verkehrsstärke, Tempolimit, Griffigkeit, Kurvigkeit, Längs- und Querneigung) sowie historische Unfallzahlen erhoben und mittels unterschiedlicher Generalisierte Lineare Modelle gefittet. Ergebnis der Modellierung ist ein streckenspezifisches Abkommensrisiko, das für jede Straßenstelle bzw. -strecke in Abhängigkeit der genannten Parameter einen Erwartungswert für Abkommensunfällen berechnet. Zusätzlich zu den Charakteristika des Gefahrenraumes wurden aktuelle Unfallzahlen für eine weitere Verfeinerung (Gewichtung) der Modellergebnisse herangezogen.

Um Kollisionen mit unterschiedlichen ortsfesten Hindernissen bewerten zu können, wurde für ausgewählte Gefahrenstellen das Verletzungsrisiko bei einem (Frontal-)Anprall evaluiert. Für insgesamt fünf ortsfeste Hindernisse (Lichtmaste, Verkehrszeichen auf I-Träger, Rohrrahmensteher, Gittersteher sowie Bäume mit unterschiedlichen Durchmessern) wurde in einem ersten Schritt eine sogenannte Lastmatrix erstellt, in der wesentliche Rahmenbedingungen wie z.B. Anprallgeschwindigkeiten oder Anprallwinkel definiert sind.

In weiterer Folge wurde mittels Finite Elemente Simulation für jede der Risikosituationen ein ASI-Wert ermittelt, der aus den Beschleunigungssignalen des Fahrzeugs ermittelt und bei Crashtests zur Beurteilung der Anprallheftigkeit herangezogen wird. Der ASI dient u.a. auch als Bewertungskriterium für die passive Sicherheit von Tragkonstruktionen für die Straßenausstattung gemäß europäischer Norm EN 12767. Neben der Anprallheftigkeit wurden auch mögliche Intrusionen bei einem seitlichen Anprall untersucht.

Das ortsspezifische Kollisionsrisiko setzt sich nun aus der kombinierten Betrachtung von Abkommenswahrscheinlichkeit und situativen ASI-Wert zusammen. Auf dieser Basis lassen sich detaillierte Maßnahmen ableiten und Unfallreduktionspotentiale berechnen.

Im gegenständlichen Projekt konnte nicht für jede erdenkliche Risikosituation (unterschiedliche Anprallszenarien, Materialien, Seitenabstände zum Fahrbahnrand etc.) ein eigener ASI-Wert berechnet werden. Es ist daher von extremer Wichtigkeit, die bestehenden Modellannahmen zu ergänzen und weitere Simulationen durchzuführen, sodass in naher Zukunft ein vollständigeres Bild der Anprallkollisionen entsteht. Der Modellansatz wurde so gewählt, dass er auch für den Einsatz im untergeordneten Straßennetz (Landesstraßen B und L) geeignet ist.

1 EINLEITUNG

Unfälle durch Anfahren an ortsfeste Hindernisse (Bäume, Masten, Pfeiler etc.) zählen zu den schwersten Unfällen überhaupt und stehen daher im Blickpunkt der heimischen Verkehrspolitik. So strebt das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) im aktuellen Verkehrssicherheitsprogramm (VSP) an, dass „Strecken mit einer besonders hohen Dichte an Baumunfällen identifiziert und prioritär behandelt werden sollen“ [1]. Laut einer Sonderauswertung der Statistik Austria der Jahre 2001–2005 kommt jeder 17. getötete Straßenverkehrsteilnehmer bei einer Baumkollision ums Leben.

Bereits im Jahr 2007 wurde von der Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr (FSV) eine eigene Arbeitsgruppe (Operative Verkehrssicherheit) damit beauftragt, eine Richtlinie zum Schutz vor Unfällen mit ortsfesten Objekten zu erarbeiten. Aufgrund der massiven Kritik der Bundesländer am Ergebnis, wurde die entsprechende RVS (Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen) 02.02.41 jedoch nie in Kraft gesetzt. Ausschussmitglieder und Ländervertreter warten seither auf neue Forschungserkenntnisse bevor Initiativen bezüglich einer neuerlichen Umsetzung der RVS gesetzt werden.

Unfälle durch Abkommen von der Fahrbahn stellen knapp 40% aller Unfälle am ASFINAG-Netz, bei denen fast 50% der Toten am hochrangigen Straßennetz zu beklagen sind [2]. Jene Unfälle, bei denen keine Randabsicherungen vorhanden waren und zu Kollisionen mit Objekten neben der Fahrbahn führten, weisen ferner eine besonders hohe Unfallschwere auf [3]. Die ASFINAG fordert daher in ihrem Verkehrssicherheitsprogramm 2020 eine Strategie zur Entschärfung derartiger Unfallstellen [4].

1.1 Projektbeschreibung und Ziele

Im Zuge des Projekts RISKANT soll ein Risikomodell zur Evaluierung von Unfällen mit ortsfesten Hindernissen erstellt werden. Mit diesem können Wirkungszusammenhänge genauer analysiert und zielgerichtete Maßnahmen abgeleitet werden. Ziel des Projekts ist es u.a., Eintrittswahrscheinlichkeiten für Unfälle an potentiellen Unfallstellen (Abkommensrisiko) zu berechnen und für ausgewählte ortsfeste Hindernisse mittels (Finite Elemente, FE) Simulation das Verletzungsrisiko bei einem Anprall gemäß EN 1317 bzw. EN 12767 zu eruieren.

Die grundsätzliche Forschungsfrage im Projekt RISKANT lautet wie folgt:

- Welche Parameter müssen Risikomodelle berücksichtigen, um die Unfallwahrscheinlichkeit eines Anpralls an ein ortsfestes Hindernis abzuschätzen?

Im Detail werden folgende Forschungsfragen beantwortet:

- Wie hoch ist der Anteil an Kollisionen mit ortsfesten Hindernissen?
- Welche Anlageverhältnisse begünstigen Unfälle mit ortsfesten Hindernissen (Einfluss der Infrastruktur auf das Unfallgeschehen) und ermöglichen somit die Prognose von Abkommensunfällen?
- Wo sind Schwerpunkte zu setzen und wie lassen sich Straßenabschnitte nach ihrer Sicherheit einfach kategorisieren?
- Nach welchen Kriterien kann die Gefährlichkeit von Hindernissen bewertet werden?
- Welche infrastrukturellen Maßnahmen tragen dazu bei, Unfälle mit ortsfesten Hindernissen zu verhindern bzw. deren Schwere zu reduzieren?

1.2 Grundsätzliche Überlegungen zum Projekt

Um Unfallereignisse und deren Auswirkungen – auch in volkswirtschaftlicher Hinsicht – besser verstehen und analysieren zu können, werden in der modernen Unfallforschung verstärkt Risikomodelle herangezogen. Unter Risiko versteht man die Kombination aus der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Ereignis auftritt, und dem Ausmaß des damit verbundenen Schadens (Konsequenz).

Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit x Ausmaß der Konsequenz

In den vergangenen Jahrzehnten wurden weltweit unterschiedliche Ansätze und Methoden zur Risikobewertung entwickelt (z.B. Functional Hazard Analysis, Engineering Safety Management, Fehlerbaumanalyse). In jüngster Zeit werden in der Unfallursachenforschung jedoch verstärkt sogenannte Generalisierte Lineare Modelle (GLM) verwendet, um technische Systeme und deren Risiken untersuchen und bewerten zu können [5]. GLM ersetzen dabei zusehends bisherige traditionelle Verfahren der Risikomodellierung, da diese exponentiell mit der Anzahl der Zustände und Ereignisse wachsen, sodass Abhängigkeiten (Interdependenzen) zwischen den Variablen und Unsicherheiten in Bezug auf

Systemkomponenten nur bedingt berücksichtigt werden können. So werden z.B. Fehlerbäume sehr schnell unübersichtlich groß - das eigentliche Ziel, das System und die Zusammenhänge im System übersichtlich zu modellieren, wird dabei nicht mehr erreicht.

Die Theorie der Generalisierten Lineare Modelle wurden 1972 von John Nelder und Robert Wedderburn [6] weiterentwickelt und eignen sich insbesondere zur Modellierung von Zähldaten von Verkehrsunfallereignissen. Während man bei „klassischen“ linearen Modellen annimmt, dass die Zielvariable normalverteilt ist, kann sie in GLM eine Verteilung aus der Klasse der Exponentialfamilie besitzen. Zahlreiche Untersuchungen auf dem Gebiet der Unfallforschung haben gezeigt, dass sich die Häufigkeit von Verkehrsunfällen oftmals mittels einer Poisson- bzw. negativen Binomial-Verteilung approximieren lässt.

Im Folgenden wird der Ablauf zur Erstellung eines Risikomodells für ortsfeste Hindernisse detailliert beschrieben. Das Projekt ist in sechs Arbeitspakete (AP) untergliedert, die in Abbildung 1 in ihrer zeitlichen Reihenfolge dargestellt sind.

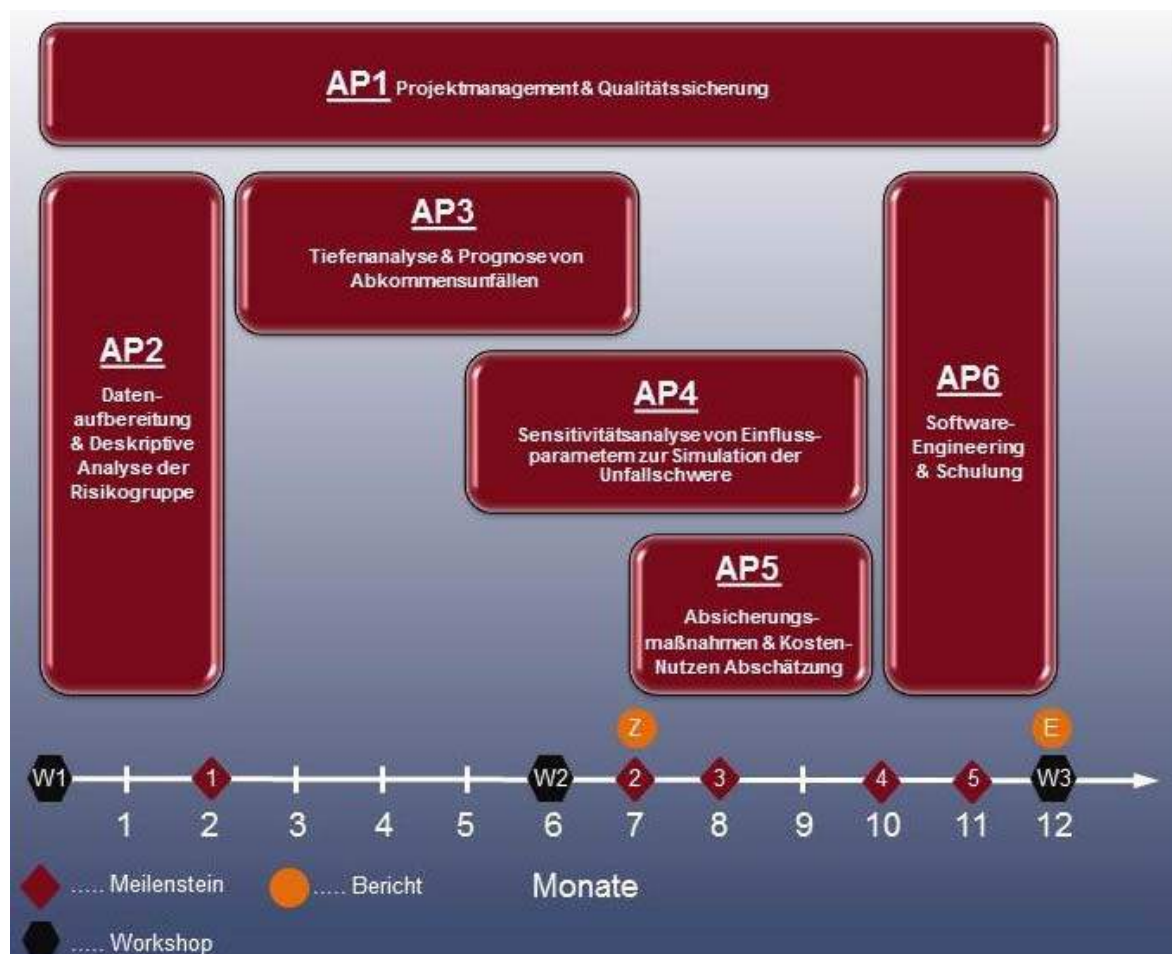


Abbildung 1: Darstellung der Arbeitspakete im zeitlichen Ablauf und Meilensteinplan

2 AUSGANGSLAGE

Bei einem Anprall gegen ein ortsfestes Hindernis durch Abkommen des Fahrzeugs von der Fahrbahn ist mit tiefen Intrusionen in den Fahrzeuginnenraum zu rechnen. Dabei kommt es oftmals zu schwerwiegenden Verletzungen der Fahrzeuginsassen. Im Mittelpunkt des Projekts RISKANT steht daher die Fragestellung, wie Unfälle mit Anprall an ein ortsfestes Hindernis zukünftig verhindert oder zumindest in ihrer Unfallschwere reduziert werden können. Eine Kollision mit einem Objekt am Fahrbahnrand setzt voraus, dass das Fahrzeug zuvor von der Fahrbahn abkommt. Es ist daher zu klären, welche Stellen und Strecken im hochrangigen Straßennetz ein besonders hohes Risiko hinsichtlich Abkommensunfälle aufweisen bzw. welche (Risiko-)Faktoren sich dafür hauptverantwortlich zeigen.

Unabhängig von der site-spezifischen Abkommenswahrscheinlichkeit sind allerdings auch jene ortsfesten Hindernisse zu untersuchen, die ein vermeintlich hohes Verletzungsrisiko aufweisen. Kenntnis über die Gefährlichkeit solcher – oftmals punktueller – Hindernisse ist für die Verkehrssicherheitsarbeit von entscheidender Bedeutung.

Aufgrund der vorgegebenen Aufgabenstellung, kann man das Unfallgeschehen auf jene Unfälle (mit Personenschaden) beschränken, die sich außerorts sowie auf Autobahnen und Schnellstraßen (AS-Netz) zugetragen haben (siehe Abbildung 2). Da in der österreichischen Verkehrsunfallstatistik (Unfallzählblatt) jedoch mehrere Möglichkeiten bestehen, Abkommensunfälle zu kodieren (z.B. über die Unfallumstände 33/34 und die Zuweisung eines entsprechenden Unfalltyps), ist zuallererst eine Aufbereitung der relevanten Daten notwendig.

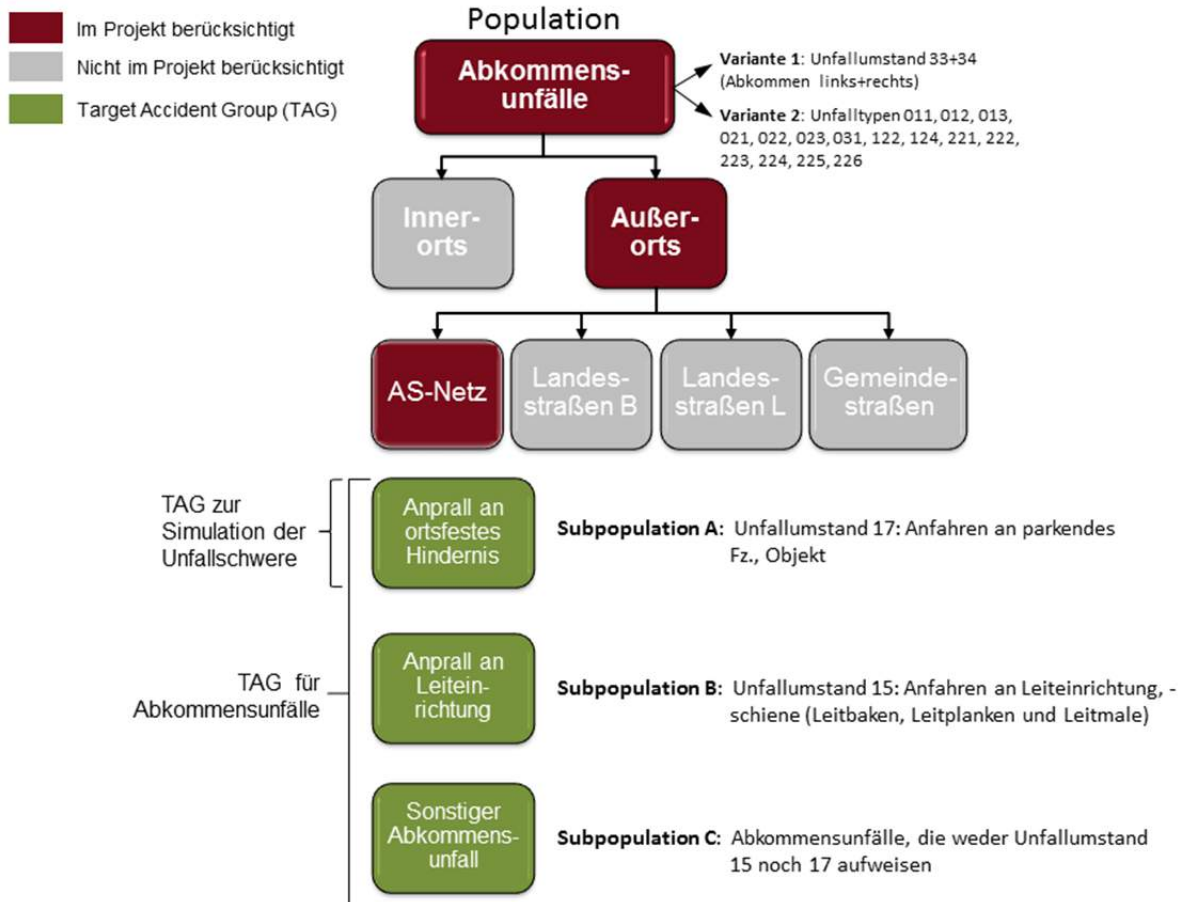


Abbildung 2: Überblick über potentielle Risikogruppen (Target Accident Groups, TAG) zwecks Modellierung von Abkommensunfällen

Ziel der Unfall(ursachen)forschung ist es, Mängel im Straßenumfeld, im Verkehrsablauf und im Verhalten des einzelnen Verkehrsteilnehmers ausfindig zu machen und potentielle Maßnahmen abzuleiten [7]. Die österreichische Unfallforschung bedient sich hierzu u.a. eines Systems standardisierter Unfallsituationen, sogenannter Unfalltypen, welche eine Kategorisierung des unfallkausalen Fahrverhaltens (Bewegungsablauf) darstellen. Jedem der insgesamt rd. 100 Unfalltypen werden dabei charakteristische Fahrmanöver sowie unfallbestimmende Anlageverhältnisse und verkehrsbedingte Ursachen zugeordnet. Aus den vorherrschenden Unfalltypen und gleichartigen Verkehrskonflikten ist es sodann möglich, potentielle Mängel im Straßen- und Verkehrsraum abzuleiten.

Im Rahmen der Arbeitspakets 2 (Datenaufbereitung) wurde der Unfalldatenbestand der Statistik Austria der Jahre 2002–2011 nach folgenden (Selektions-)Kriterien gefiltert:

Tabelle 1: Kriterien zur Selektion von Abkommensunfällen

Selektionskriterium 1: Unfalltyp				und/ oder	Selektionskriterium 2: Unfallumstand	
011	Unfälle mit nur einem Beteiligten	Abkommen rechts auf der Geraden			33	Abkommen links
012		Abkommen rechts in Rechtskurve			34	Abkommen rechts
013		Abkommen rechts in Linkskurve				
021		Abkommen links auf der Geraden				
022		Abkommen links in Rechtskurve				
023		Abkommen links in Linkskurve				
031		Abkommen bei Kreuzung, Fahr- bahnverzweigung oder Ausfahrt				
122	Unfälle im Richtungs- verkehr	Wechsel des Fahr- streifens nach rechts mit Abkom- men rechts				
124		Wechsel des Fahr- streifens nach links mit Abkommen links				
221	Unfälle im Begegnungs- verkehr	Abkommen rechts auf der Geraden				
222		Abkommen rechts in Rechtskurve				
223		Abkommen rechts in Linkskurve				
224		Abkommen links auf der Geraden				
225		Abkommen links in Rechtskurve				
226		Abkommen links in Linkskurve				

Quelle: RVS 02.02.21 [7]

Das Ergebnis dieser Datenselektion ist Abbildung 3 zu entnehmen. Es zeigt sich, dass rd. 90% der Abkommensunfälle auf Autobahnen und Schnellstraßen auf lediglich acht Unfalltypen (011, 021, 131, 191, 022, 013, 012, 141) zurückzuführen sind.

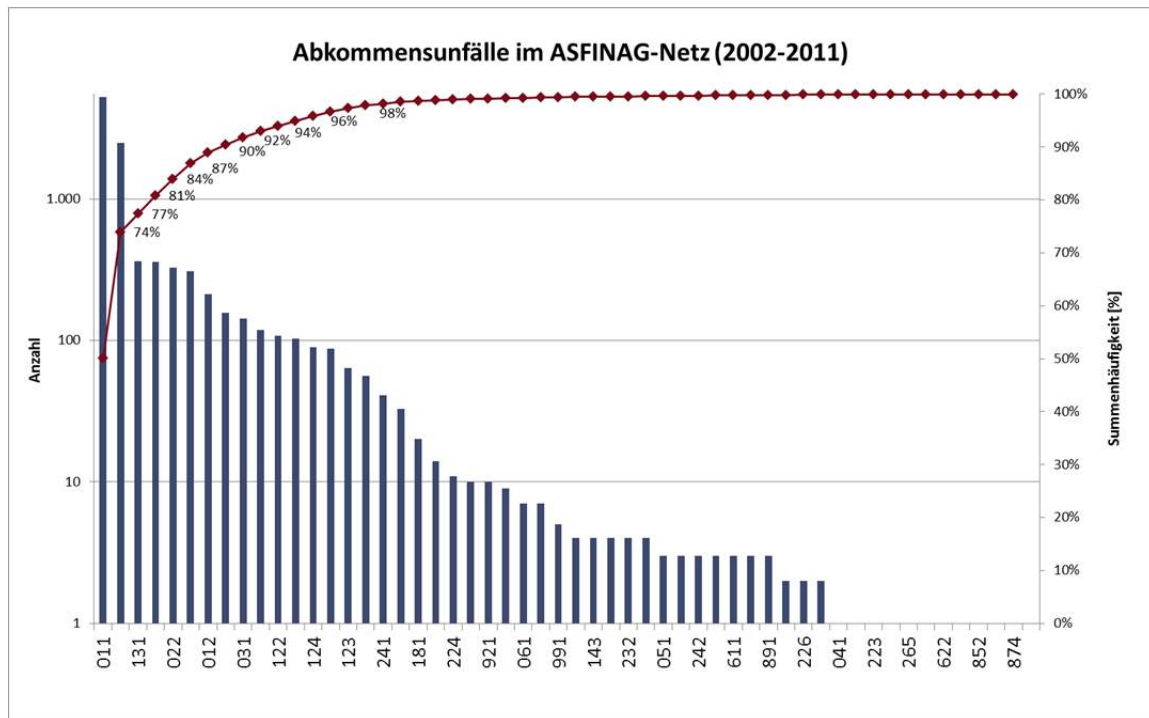


Abbildung 3: Verteilung der Abkommensunfälle im AS-Netz nach Unfalltypen

Analysiert man die Ergebnisse der Auswertungen im Detail, fallen einige – auf den ersten Blick – unerklärliche Resultate auf. Zum Beispiel der hohe Anteil der Unfälle mit dem Unfalltyp 131 (Auffahren auf fahrendes Fahrzeug auf der Geraden), 191 (Sonstige Unfälle im Richtungsverkehr) oder 141 (Auffahren auf verkehrsbedingt stehendes Fahrzeug auf der Geraden), welche auf den ersten Blick wenig mit Abkommensunfällen zu tun haben. Aufgrund der hohen absoluten und relativen Häufigkeiten dieser Unfalltypen kann es sich hierbei jedoch nicht um vereinzelte Kodierungsfehler seitens der Exekutive handeln, sondern muss einen anderen – systematischen – Hintergrund haben.

Generell werden Abkommensunfälle in primäre und sekundäre Abkommensunfälle unterschieden. Primäre Abkommensunfälle sind solche, bei denen ein Verkehrsteilnehmer in unmittelbarer Folge eines Unfallumstandes (z.B. überhöhte Geschwindigkeit, Müdigkeit, Fahren unter Alkoholeinfluss) und/oder einer unterlassenen Handlung (Bremsen, Lenken,

Ausweichen etc.) von der Fahrbahn abkommt. Hierzu zählen insbesondere die Untergruppen 01-03¹ der Unfalltypenobergruppe 0 (Unfall mit nur einem Beteiligten) [7].

Bei den meisten Unfällen im Straßenverkehr sind mehrere Verkehrsteilnehmer involviert. Kommt im Zuge einer Kollision zweier oder mehrerer Fahrzeuge zumindest ein Unfallbeteiligter von der Fahrbahn ab, spricht man in der Unfallforschung von einem sekundären Abkommensunfall. Die Wucht der Primärkollision bzw. ein nachfolgendes Lenkmanöver – z.B. „Frontalzusammenstoß“ (Unfallumstand 31) oder „Kollision seitlich“ (Unfallumstand 37) – führt dazu, dass eines oder mehrere Fahrzeuge von der Fahrbahn geschleudert werden und in weiterer Folge im Straßengraben landen und/oder mit einem Hindernis am Fahrbahnrand kollidieren.

Aus diesem Blickwinkel betrachtet ist nun nachvollziehbar, wie es zu der großen Anzahl von Abkommensunfällen mit den Unfalltypen 131 bzw. 191 kommen kann. Exekutivbeamte, die derartige Unfälle aufnehmen, tragen im Unfallzählblatt den Unfallumstand „Abkommen links“ bzw. „Abkommen rechts“ ein, wenn ein Fahrzeug von der Fahrbahn abkommt, auch wenn der eigentliche Unfallumstand ganz ein anderer war.

Es ist daher in weiterer Folge zu klären, ob nur die primären oder auch die sekundären Abkommensunfälle im Rahmen des Projekts RISKANT zu analysieren sind. Diese Frage wird in Kapitel 2.1 ausführlich beantwortet.

2.1 Definition der Risikogruppe

Verkehrsunfälle entstehen in Folge des Auftretens eines oder mehrerer Risikofaktoren (Verkehrsaufkommen, Geschwindigkeit, Tageszeit, Alkoholkonsum etc.). Der Unfalltyp wird somit von den Risikofaktoren beeinflusst und bestimmt. Unfälle unter Alkoholeinfluss treten z.B. gehäuft an Wochenenden und dann wiederum v.a. in den Nacht- bzw. Morgenstunden auf (sog. Diskounfälle). Im Rahmen des Kapitels 2.1 wird untersucht, welche „Attribute“ Abkommensunfälle aufweisen, die sie von anderen Unfällen unterscheiden. Es wird daher nach jener Risikogruppe (im Englischen: Target Accident Group, TAG) gesucht, die im Rahmen der gegenständlichen Untersuchung den weiteren Analysen zugrunde gelegt wird.

Der Grundgedanke bei der Definition einer TAG ist, dass (Verkehrssicherheits-)Maßnahmen im Regelfall auf einen bestimmten „Benutzerkreis“ zugeschnitten sind und daher

¹Untergruppe 01: Abkommen rechts; Untergruppe 02: Abkommen links; Untergruppe 03: Abkommen bei Kreuzung, Fahrbahnverzweigung oder Ausfahrt.

– hinsichtlich verschiedener Risikogruppen – auch unterschiedlich wirken. Als plakatives Beispiel sollen verstärkte Radarkontrollen seitens der Exekutive an einem Streckenabschnitt dienen, auf dem es in der Vergangenheit gehäuft zu Unfällen aufgrund von überhöhter Geschwindigkeit gekommen ist. Diese Maßnahme zielt vordringlich darauf ab, Schnellfahrer (Target Accident Group) habhaft zu werden (generalpräventive Wirkung), um Fahrer zu veranlassen, sich an das verordnete Geschwindigkeitslimit zu halten. Andere Risikogruppen, wie z.B. Lenker unter Drogeneinfluss, bleiben von dieser Maßnahme hingegen unbeeinflusst.

Wie man Tabelle 2 entnehmen kann, haben sich in den Jahren 2002–2011 auf Österreichs Autobahnen und Schnellstraßen rd. 24.000 Unfälle mit Personenschaden (UPS) ereignet, bei denen mehr als 1.000 Personen tödlich verunglückten sowie rd. 10.000 Verkehrsteilnehmer schwer und weitere 26.000 leicht verletzt wurden.

Tabelle 2: Unfallgeschehen auf Autobahnen und Schnellstraßen (2002–2011)

Autobahnen und Schnellstraßen	Unfälle GESAMT	Abkommensunfälle	davon ...	
			Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn	Sonstige Abkommensunfälle
Unfälle mit Personenschaden	23.879	10.430 (43,7%)	8.819	1.611
Getötete	1.035	611 (59,0%)	449	162
Schwerverletzte ²	9.758	5.053 (51,8%)	4.001	1.052
Leichtverletzte	26.738	10.142 (37,9%)	8.110	2.032

Quelle: Statistik Austria, Auswertungen der Unfallstatistiken 2002–2011

Analysiert man das Unfallgeschehen nach verschiedenen Unfalltypen zeigt sich, dass fast die Hälfte der UPS (44%) Abkommensunfälle waren. Diese zeichnen sich auch für mehr als die Hälfte der Getöteten (59%) und Schwerverletzten (52%) im AS-Netz verantwortlich. Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn stellen dabei den Großteil (85%) der Abkommensunfälle dar. Bei derartigen Unfällen sind 43% aller Getöteten, 41% der Schwerverletzten und 30% der Leichtverletzten zu beklagen (siehe Abbildung 4).

²Entsprechend der Vorgaben der österreichischen Unfallkostenrechnung [8] werden die Nicht-erkennbaren Grades Verletzte (NEG) im Verhältnis 9:1 auf die Schwer- bzw.- Leichtverletzte aufgeteilt.

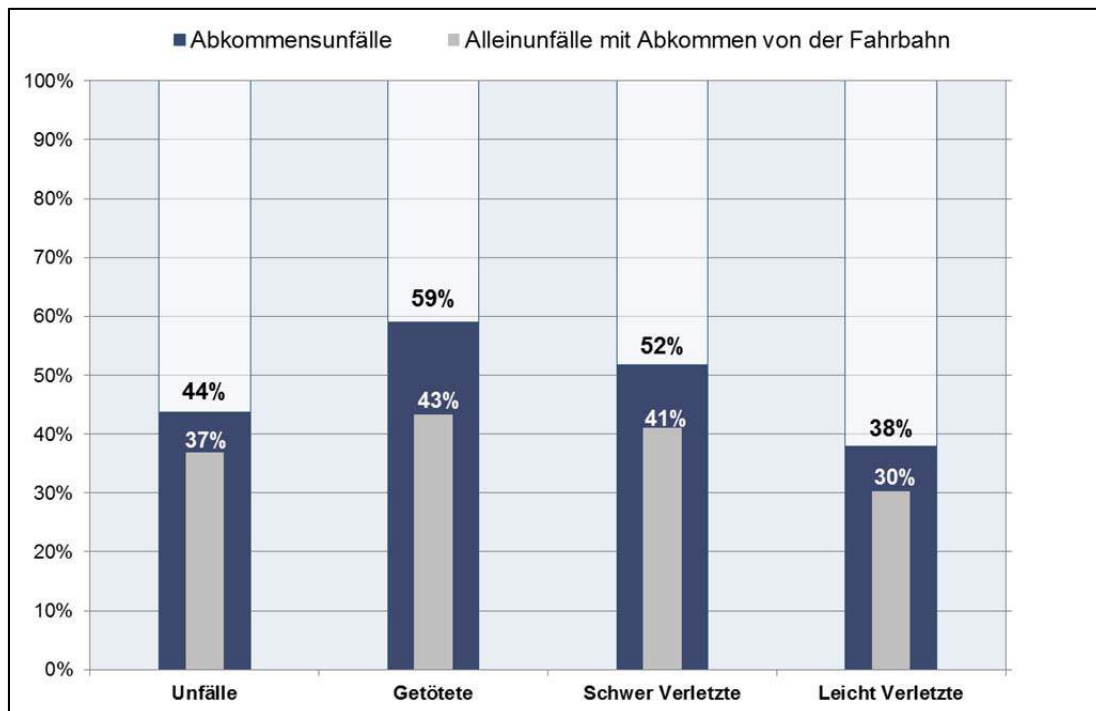


Abbildung 4: Anteil der Abkommensunfälle und Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn am gesamten Unfallgeschehen auf Autobahnen und Schnellstraßen (2002–2011)

Aufgrund der hohen Anteile am Unfallgeschehen werden im gegenständlichen Projekt Unfälle der Unfalltypenobergruppe 0 (Unfälle mit nur einem Beteiligten) in Kombination mit dem Merkmal „Abkommen von der Fahrbahn“ untersucht und den nachfolgenden Modellierungen und Simulationen zugrunde gelegt.

Diese Obergruppe hat eine Summenhäufigkeit bei Abkommensunfällen von 85%. Die übrigen Abkommensunfälle lassen sich sonstigen Unfällen im Richtungs- bzw. Begegnungsverkehr mit Abkommen von der Fahrbahn zuordnen.

2.2 Deskriptive Unfallanalyse

Im Folgenden wird die Risikogruppe „Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn“ mithilfe allgemeinen statistischer Verfahren näher beschrieben, um Hinweise für die Wahl der zu berücksichtigenden Variablen im Abkommensmodell (siehe Kapitel 3) zu erhalten. Die sogenannte deskriptive Statistik hat zum Ziel, empirische Daten durch Tabellen, Kennzahlen und Grafiken übersichtlich darzustellen und zu ordnen. Aussagen von deskriptiven Statistiken beziehen sich stets auf die jeweils untersuchte Stichprobe; im gegenständlichen Fall sind dies alle Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn der Jahre 2002–2011.

Wie man Tabelle 3 entnehmen kann, kommt es bei Alleinunfällen mit Abkommen von der Fahrbahn nur in den seltensten Fällen (3,6% bzw. jedem 28. Target Accident) zu einer Kollision mit einem ortsfesten Hindernis. Hierunter versteht man Objekte im unmittelbaren Straßenumfeld, wie z.B. Bäume, (Licht-)Masten, (Brücken-)Pfeiler, Verkehrszeichen, die sich in einem „kraftschlüssigen“ Verhältnis (Fundament, Wurzeln etc.) mit dem Boden befinden.

Obwohl nur knapp 4% der Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn in einer Kollision mit einem ortsfesten Hindernis münden, sind hierbei mehr als 11% (51 Personen im Zeitraum 2002-2011) der bei Abkommensunfällen Getöteten zu beklagen. Rein zahlenmäßig kommen zwar mehr Verkehrsteilnehmer (208 Personen) durch Anprall an Leitschienen ums Leben, diese Größe relativiert sich jedoch, wenn man berücksichtigt, dass 40% der Abkommensunfälle letztendlich in einem Anprall an Leiteinrichtungen münden. Laut ASFINAG sind bereits rd. 60% des AS-Netzes mit Fahrzeugrückhaltesystemen³ (seitliche Randabsicherungen etc.) ausgestattet

Der weitaus größte Anteil an Alleinunfällen entstammt jedoch der Gruppe „Sonstige Abkommensunfälle“. Hierbei handelt es sich um eine Restgröße, d.h. es werden jene Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn, die nicht den Unfallumstand 15 (Anfahren an Leiteinrichtung, -schiene) oder 17 (Anfahren an parkendes Fahrzeug, Objekt) aufweisen, dieser Gruppe zugeordnet.

Tabelle 3: Analyse der Risikogruppe nach Anprallobjekten

Autobahnen und Schnellstraßen	Alleinfälle mit Abkommen von der Fahrbahn	davon ...		
		Anprall an ortsfestes Hindernis	Anprall an Leiteinrichtung	Sonstiger Abkommensunfall
Unfälle mit Personenschaden	8.819 (100%)	316 (3,6%)	3.569 (40,5%)	4.934 (55,9%)
Getötete	449 (100%)	51 (11,4%)	208 (46,3%)	190 (42,3%)
Schwerverletzte	4.001 (100%)	164 (4,1%)	1.598 (39,9%)	2.239 (56,0%)
Leichtverletzte	8.110 (100%)	249 (3,1%)	3.308 (40,8%)	4.553 (56,1%)

Quelle: Statistik Austria, Auswertungen der Unfallstatistiken 2002–2011

Obwohl ortsfeste Hindernisse/Objekte nur einen geringen Anteil der Target Accident Group ausmachen, weisen sie im Verhältnis dazu einen überproportional hohen Anteil an

³FRS entsprechend der EN 1317 in weiterer Folge für Leitschienen und Betonleitwände verwendet.

den Getöteten (11,4%) bzw. Schwerverletzten (4,1%) auf. Dieser Umstand deckt sich mit den Ergebnissen zahlreicher nationaler und internationaler Studien [9], [10], [11], die ortsfesten Hindernissen aufgrund der hohen Steifigkeit der verwendeten Materialien sowie der zumeist hohen Massen ein besonders hohes Verletzungsrisiko attestieren. So treten Intrusionen in die Fahrgastzelle, insbesondere bei Seitenkollisionen besonders häufig auf.

Aus diesem Grund werden vielerorts ortsfeste Hindernisse mittels sogenannter Fahrzeugrückhaltesysteme (Leitschienen, Anpralldämpfer, Terminals etc.) abgesichert, da die Unfallfolgen (Verletzungsschweren) im Regelfall wesentlich geringer ausfallen. Bei Anprall an eine Leiteinrichtung liegt z.B. das Getötetenrisiko um ein Drittel niedriger als bei Kollisionen mit einem ortsfesten Hindernis (siehe Abbildung 5). Während bei letzteren im (langjährigen) Schnitt 11% der Unfallbeteiligten tödlich verunglückten, sind es bei FRS auf Autobahnen und Schnellstraßen „lediglich“ 4%. Das FRS soll das Fahrzeug am Abkommen hindern und so eine Kollision mit einem potentiell gefährlicheren Objekt vermeiden. Dadurch soll eine geringere Verletzungsschwere der Insassen erreicht werden, welche beim Anprall an ein ortsfestes Hindernis unter Umständen tödlich verunglücken. Diese Tendenz ist aufgrund Abbildung 5 ersichtlich.

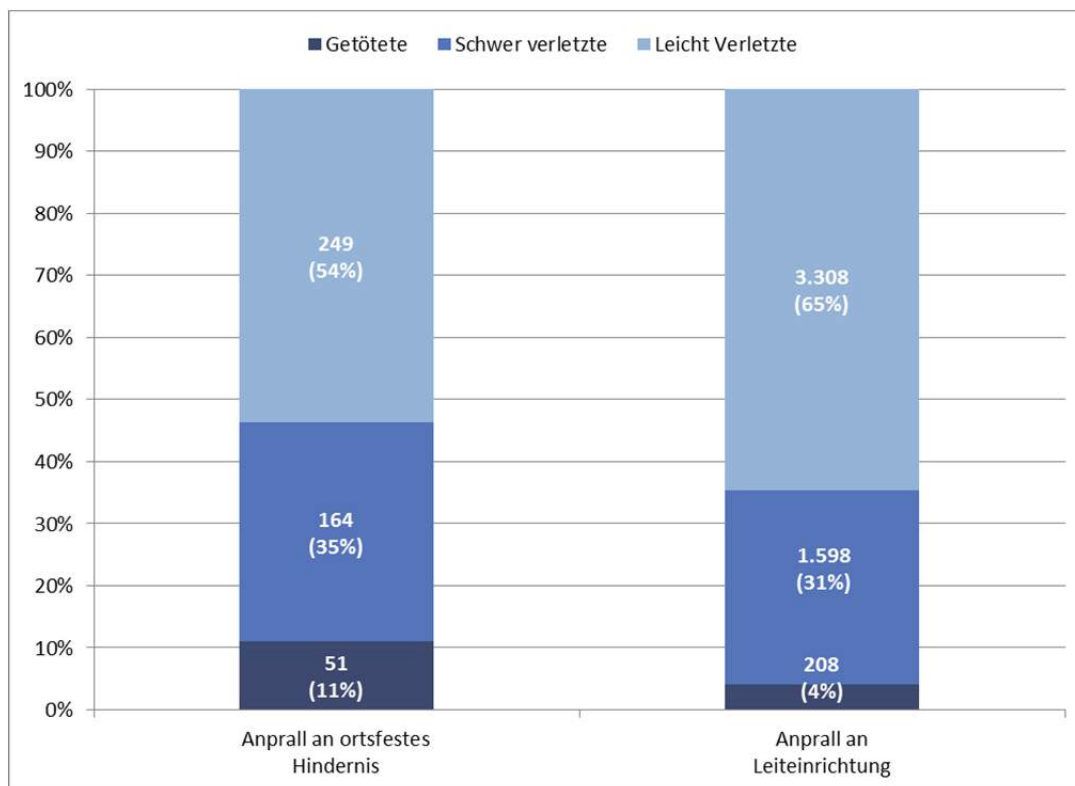


Abbildung 5: Vergleich der Verletzungsschweren beim Anprall an ortsfeste Hindernisse und Leiteinrichtungen

Der Großteil der Abkommensunfälle (62%) ereignet sich auf trockener, weitere 28% auf nasser Fahrbahn (siehe Abbildung 6). Der restliche Anteil „passiert“ auf Schnee/ Matsch und sonstigen Fahrbahnverhältnissen. Vergleicht man diese Werte mit jenen aller übrigen Unfälle auf Autobahnen und Schnellstraßen (Kontrollgruppe), fällt auf, dass sich proportional mehr Abkommensunfälle aufgrund widriger Straßenverhältnisse (nasse Fahrbahn, Schnee und Matsch, Sonstiges) ereignen als in der entsprechenden Vergleichsgruppe. Bei nasser Fahrbahn spielt die Griffigkeit der Fahrbahndecke eine besonders wichtige Rolle. Aus diesem Grund wird die Variable „Griffigkeit“ im Abkommensmodell gesondert analysiert.

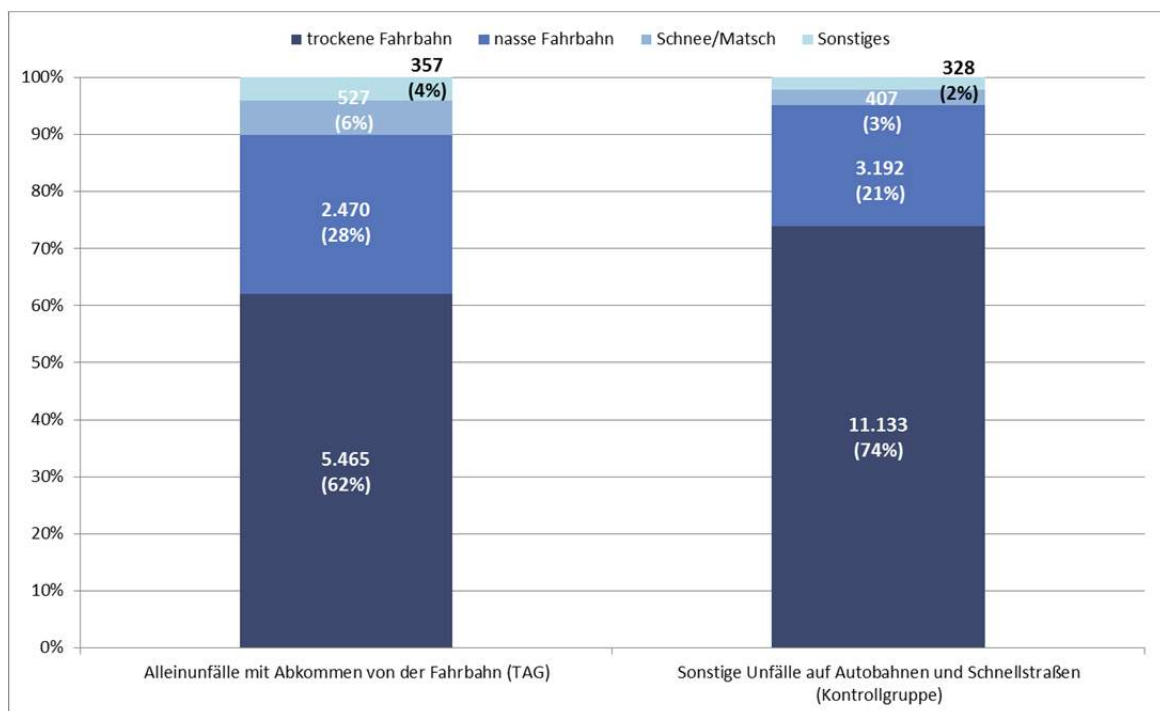


Abbildung 6: Analyse der Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn sowie sonstige Unfälle auf Autobahnen und Schnellstraßen nach Straßenzustand

In der nachfolgenden Abbildung 7 wird die Verteilung der Längsneigungen im gesamten AS-Netz mit den Neigungsverhältnissen bei Alleinunfällen mit Abkommen von der Fahrbahn (TAG) verglichen. Zwecks einer einfacheren Interpretation der Ergebnisse erfolgt eine Klassifikation der Längsneigungen nach folgenden drei Kategorien:

- Ebene Strecke: 0–2%
- Mittlere Steigung/Gefälle: 2–4%
- Starke Steigung/Gefälle: > 4%

Auf ebenen Strecken sowie in Bereichen mit einem mittleren Gefälle sind (im Vergleich zum Gesamtnetz) erhöhte Anteile an Unfällen der Target Accident Group zu beobachten. Umgekehrt lassen sich geringere TAG-Anteile – als erwartet – auf Strecken mit einer mittleren Steigung zwischen 2-4% feststellen. LEE und MANNERING konnten in einer Studie [10] einen signifikanten Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die Wahrscheinlichkeit des Zustandekommens von Abkommensunfällen feststellen. Erhöhte Anteile an Abkommensunfällen bei Gefällen sind demnach darauf zurückzuführen, dass Fahrzeuglenker aufgrund nicht getätigter bzw. zu geringer Bremsvorgänge oftmals schneller fahren, als auf dem jeweiligen Streckenabschnitt zulässig ist. In Kombination mit widrigen Straßenverhältnissen (z.B. regennasse Fahrbahn) und/oder geringen Griffigkeitswerten führt dies zu längeren Bremswegen und einem erhöhtem Abkommensrisiko.

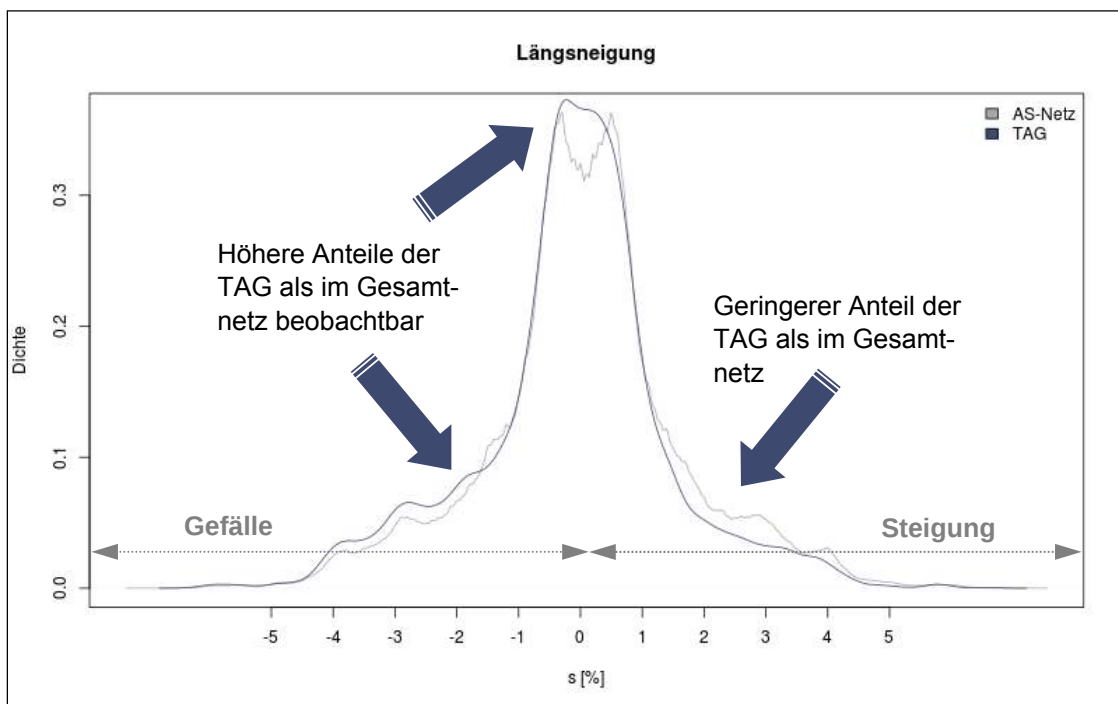


Abbildung 7: Analyse der Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn (Risikogruppe) auf Autobahnen und Schnellstraßen nach Längsneigung

Abkommensunfälle von der Fahrbahn werden u.a. auch mit der Kurvigkeit des betreffenden Streckabschnitts in Zusammenhang gebracht [9]. Aus diesem Grund wurden im Rahmen der deskriptiven Unfallanalyse auch die Kurvenradien der betroffenen Unfallstellen eingehend analysiert. Wie man Abbildung 8 entnehmen kann, ereignet sich der Großteil der TAG-Unfälle im AS-Netz in Bereichen mit Kurvenradien > 2.500 m. Aufgrund der Fahrdynamik ist für Fahrzeuglenker ab einem Kreisbogenradius von rd. 2.000 m (Erkenntnis aus RoadSTAR-Messungen) keine Unterscheidung zwischen Gerade und Kurve

mehr möglich. Mit kleiner werdendem Radius steigt der Anteil der Target Accident Group – von einem niedrigen Niveau ausgehend – stetig an.

Das Modell zur Prognose der Abkommensunfälle untersucht u.a. den Zusammenhang der Kurvigkeit einer Strecke und der erwarteten Anzahl der Abkommensunfälle. Um valide Aussagen tätigen zu können, wird hierfür der Einfluss der übrigen Variablen konstant gehalten, d.h. es wird untersucht, wie sich die Abkommenswahrscheinlichkeit mit größer bzw. kleiner werdendem Kurvenradius verändert.

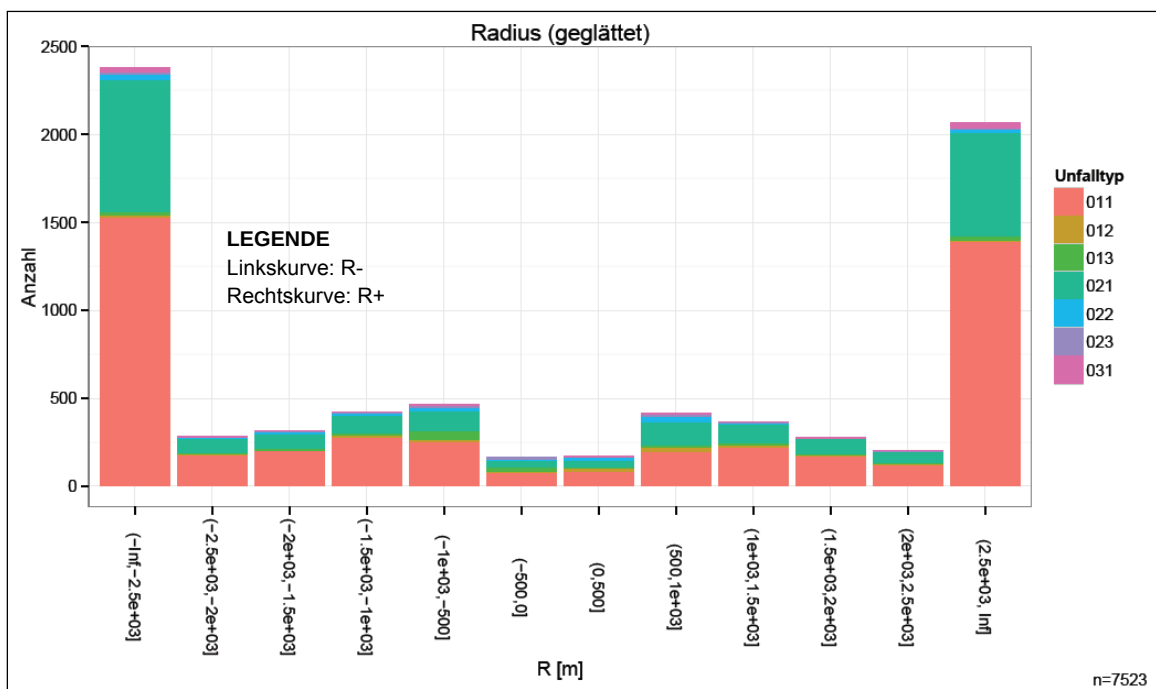


Abbildung 8: Analyse der Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn im AS-Netz in Abhängigkeit von Kurvenradien

Der überwiegende Teil (93%) der Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn „passt“ auf der Hauptfahrbahn, lediglich 7% der TAG (jeder 14. dementsprechende UPS) ereignen sich auf Rampen (siehe Abbildung 9). Als Rampe wird im gegenständlichen Projekt eine Zu- bzw. Abfahrt von einer Autobahn oder Schnellstraße bezeichnet. Diese bilden den „Übergang“ in das untergeordnete Straßennetz und werden – in Abhängigkeit der jeweiligen baulichen Ausführung – als Anschlussstelle bzw. Halbanchlussstellen ausgeführt.

Vergleicht man die Verteilung der Target Accidents mit den sonstigen Unfällen auf Autobahnen und Schnellstraßen, fällt auf, dass die Abkommensunfälle geringfügig höhere Werte für Hauptfahrbahnen aufweisen, die jedoch nicht signifikant sind.

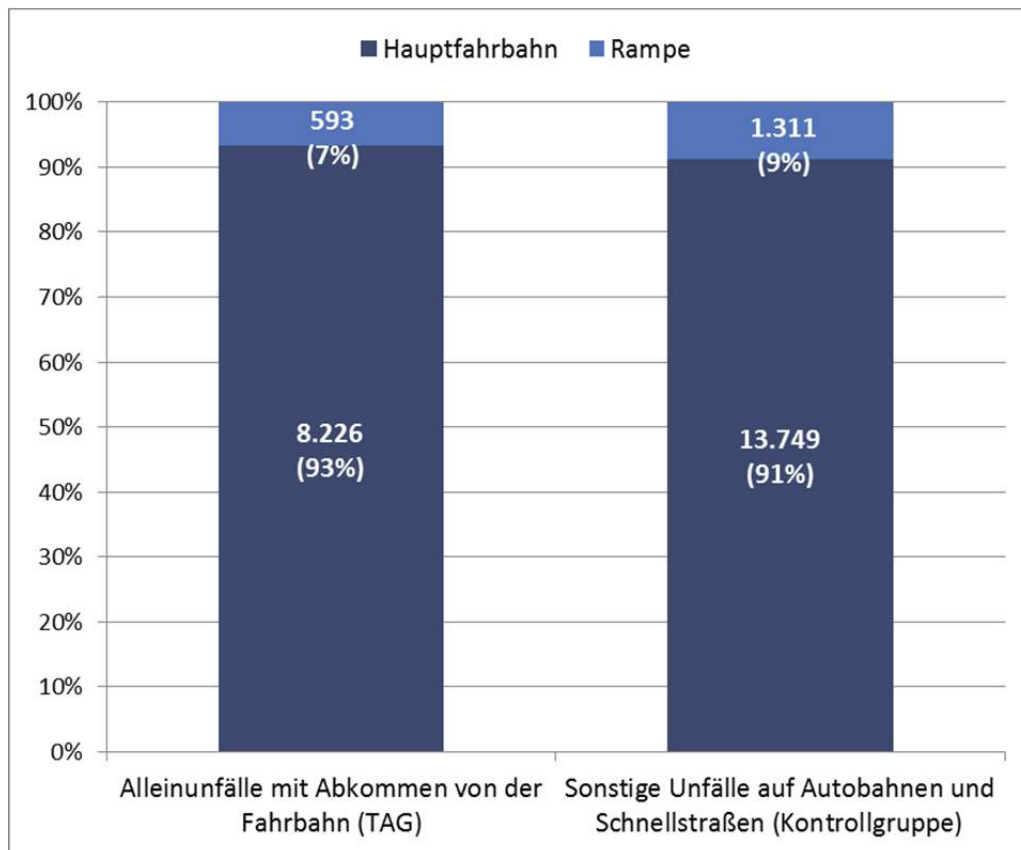


Abbildung 9: Vergleich der Unfälle der Risikogruppe (TAG) sowie der sonstigen Unfälle auf Autobahnen und Schnellstraßen nach Hauptfahrbahn/Rampe

Abgesehen von der geringen Prävalenz der Rampenunfälle hinsichtlich Abkommensunfälle, spielen zwei weitere Faktoren eine wesentliche Rolle hinsichtlich allfälliger Überlegungen, Rampen von den weiteren Detailuntersuchungen auszunehmen:

1. Rampenunfälle sind im Regelfall wesentlich schlechter verortet als Unfälle auf der Hauptfahrbahn. Eine Untersuchung des AIT bez. der Stationierung derartiger Unfälle hat ergeben, dass nur rund die Hälfte der Rampenunfälle (52%) eindeutig zuzuordnen sind, d.h. eine Rampennummer und einem Rampenkilometer aufweisen. Als Datenbasis dienten Unfälle mit Personenschaden der Jahre 2007–2011.
2. Derzeit gibt es keine validen Aufzeichnungen bez. aktueller Rampenbelastungen. Jüngste Forschungsarbeiten hinsichtlich Risikomodelle (sog. Accident Prediction Models) haben jedoch gezeigt, dass die Verkehrsstärke (Exposure) einen wesentlichen Einflussfaktor auf Verkehrsunfälle ausübt [12]. Obwohl davon auszugehen ist, dass dieser Umstand bei der TAG „Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn“ einen geringeren Einfluss hat, ist die Verkehrsstärke bei einer allfälligen Modellierung dennoch zu berücksichtigen.

2.3 Analyse der Unfallskizzen der Statistik Austria

Im Rahmen des Projekts RISKANT wird u.a. untersucht, welche ortsfesten Hindernisse am ASFINAG-Netz hinsichtlich der Unfallhäufigkeit von besonderer Relevanz sind bzw. welche durchschnittlichen Verletzungsschweren bei einem Anprall zu beobachten waren.

Zu diesem Zweck wurden von der Statistik Austria alle Unfallzählblätter (inkl. der jeweiligen Unfallskizzen) der Jahre 2002–2011 angefordert, die den Kriterien der Target Accident Group (Alleinunfall mit Abkommen von der Fahrbahn) entsprachen und bei denen es in weiterer Folge zu einer Kollision mit einem Hindernis am Straßenrand kam. Wie im Kapitel 2.2 bereits erläutert wurde, ereigneten sich im Beobachtungszeitraum rd. 300 Objektkollisionen, die im Folgenden detailliert nach Art des Hindernisses und dem Verletzungsgrad analysiert wurden.

Eine erste Durchsicht der zugeschickten Unfallskizzen ergab jedoch, dass die vermerkten Informationen in ihrem Detaillierungsgrad sehr unterschiedlich sind. In zahlreichen Fällen war es aufgrund mangelnder Aufzeichnungen seitens der Exekutive leider nicht möglich, valide Aussagen zum jeweiligen Anprallobjekt zu tätigen. In lediglich 42% der Fälle konnte der „Kollisionsgegner“ eindeutig identifiziert werden (siehe Abbildung 10).

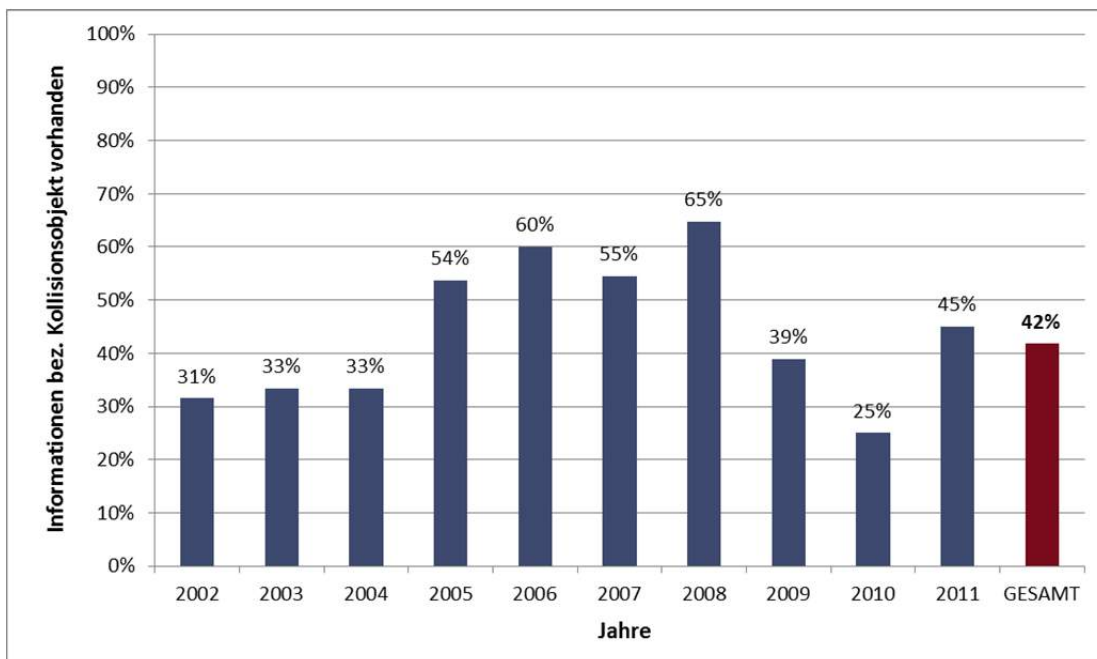


Abbildung 10: Anteil der erkannten Anprallobjekte aufgrund der Unfallskizzen

Es zeigt sich ferner, dass die Qualität der polizeilichen Datenerhebung über die Jahre hinweg stark variiert. Konnte in den Jahren 2002–2004 lediglich rd. 1/3 der Objekte aufgrund der Polizeiangaben in den Unfallskizzen identifiziert werden, stieg der betreffende

Anteil in den Folgejahren auf bis zu 65%. Die Jahre 2009 und 2010 waren wiederum durch eine extreme niedrige Qualität der Datenaufzeichnungen gekennzeichnet, wodurch sich – über alle Jahre gerechnet – eine „Aufklärungsquote“ von rd. 40% ergab.

Um „treffsicherere“ Aussagen hinsichtlich möglicher Kollisionsobjekte zu erzielen, wurden daher in weiterer Folge Befahrungsvideos der RoadSTAR Messkampagnen 2004/2005 und 2009/2010 herangezogen, um zusätzliche Objekte identifizieren zu können. Aufgrund dieser Maßnahme war es letztendlich möglich, 176 von insgesamt 316 ortsfesten Hindernissen einer bestimmten Objektart zuzuweisen. Die Aufklärungsquote ließ sich dadurch auf 54% steigern.

Tabelle 4: Verwendung aktueller Befahrungsvideos (RoadSTAR) zwecks Identifikation zusätzlicher Anprallobjekten

Objektart	Anzahl	Anteil
Baum	27	15,3%
Betonleitwand	23	13,1%
Leiteinrichtung/-schiene	23	13,1%
Tunnelportal	13	7,4%
Straßenausrüstung	12	6,8%
Brückenpfeiler	11	6,3%
Tunnelwand	9	5,1%
Wegweisung/Verkehrszeichen	9	5,1%
Zaun	7	4,0%
parkendes Fahrzeug	6	3,4%
Tunnelnische	6	3,4%
Böschung	5	2,8%
Mauer	5	2,8%
Trennselspitz	5	2,8%
Anpralldämpfer	4	2,3%
Felsen	2	1,1%
Notrufsäule	2	1,1%
Brücke	1	0,6%
Brückenportal	1	0,6%
FP Galerie	1	0,6%
Gantry	1	0,6%
Gewächs	1	0,6%
Notrufnische	1	0,6%
Tor	1	0,6%
176	100,0%	

Straßenausrüstung	Anzahl
Laternenmast	3
Betonsockel	2
Granitsteinleiste	1
Lichtmast	1
Lichtsignalanlage	1
Poller	1
Schaltkasten	1
Straßenbegrenzungspflöck	1
Straßenleitpflöck	1
12	

Quelle: Statistik Austria, Auswertungen der Unfallskizzen 2002–2011, eigene Erhebungen

Gemäß Tabelle 4 stellen Bäume mit einem relativen Anteil von 15% (27 Nennungen) die häufigsten Anprallobjekte dar, gefolgt von Betonleitwänden und Leiteinrichtungen/-schienen (jeweils 13%). Bei dieser Art der Datenanalyse wird jedoch nicht nach ortsfestem Hindernis bzw. Fahrzeugrückhaltesystem (FRS) unterschieden, sondern lediglich eine Häufigkeitsverteilung nach Kollisionsgegnern vorgenommen. Aussagen über das

objektspezifische Gefährdungspotential sind demnach nicht zulässig, da Betonleitwände, Leitschienen, Anpralldämpfer etc. errichtet werden, um Schlimmeres (Kollisionen mit Objekten höherer Steifigkeit) zu verhindern. Nichtsdestotrotz ermöglicht eine derartige Aufzählung einen ersten und – bezogen auf das ASFINAG-Netz – erstmaligen Einblick in die Prävalenz bestimmter Risikosituationen. Wie man Abbildung 11 entnehmen kann, weisen Brückenpfeiler und Tunnelnischen von allen untersuchten Kollisionsobjekten das höchste Getötetenrisiko (> 50%) auf, gefolgt von Mauern und Böschungen (jeweils 40% Getötetenrate).

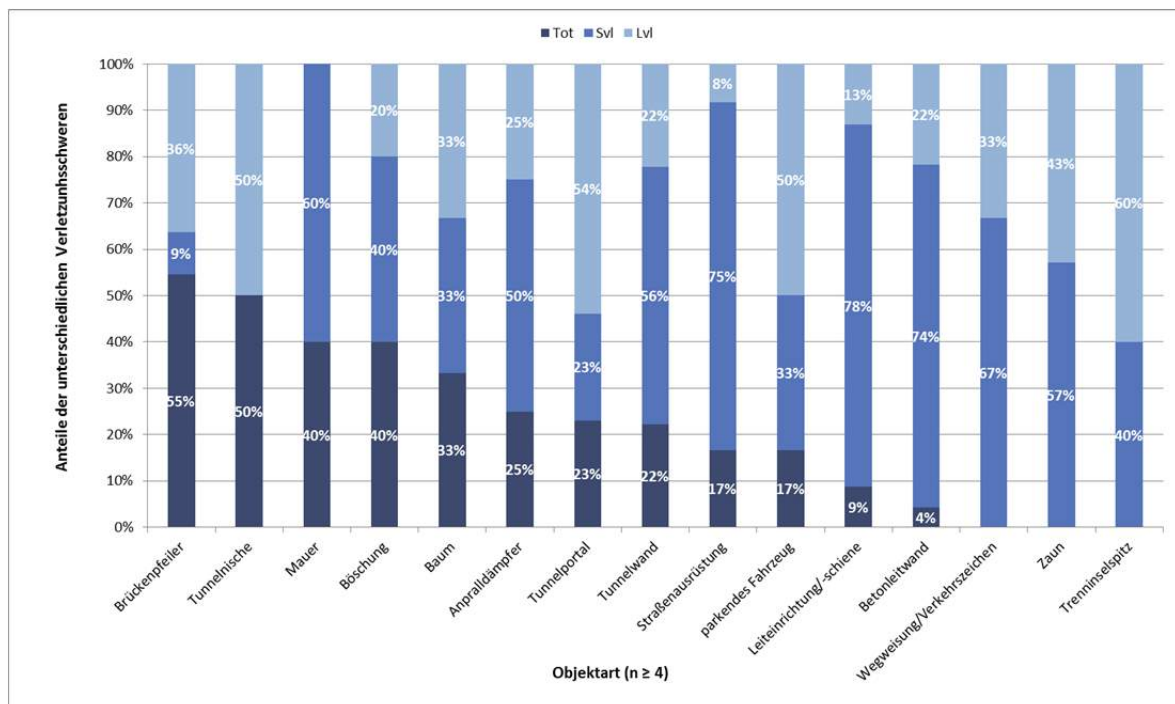


Abbildung 11: Verletzungsmuster nach Art des Kollisionsobjektes

3 MODELLIERUNG VON ABKOMMENSUNFÄLLEN

Im Rahmen des Projekts wurde u.a. ein (Modell-) Ansatz zur Evaluierung von Abkommensunfällen auf Autobahnen und Schnellstraßen entwickelt. Traditionelle Risikomodelle reduzieren eine zu untersuchende Realität auf bestimmte Erklärungsgrößen und machen diese überschaubar und zu einem gewissen Grad berechenbar. Die Ergebnisse einer Modellrechnung spiegeln jedoch stets „nur“ einen Durchschnittswert wider und können daher nicht 1:1 zur Bewertung einer spezifischen Unfallstelle herangezogen werden. Zu diesem Zweck müssen vielmehr lokale Einflussfaktoren, welche im Modell nicht oder nur als Durchschnittsgröße Eingang finden, als Gewichtung der Modellergebnisse berücksichtigt werden (siehe Abbildung 12).

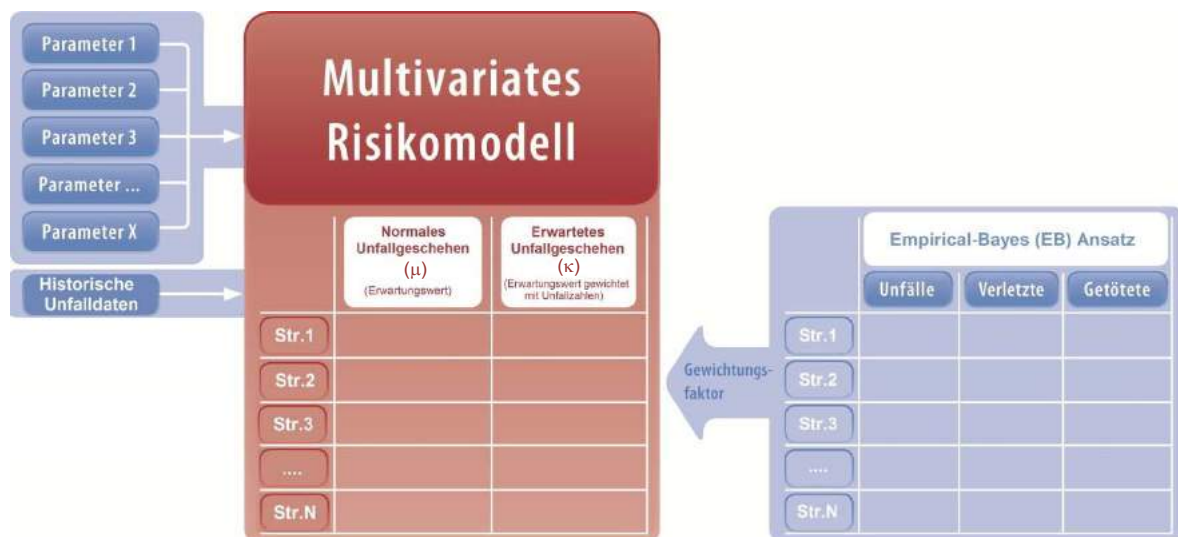


Abbildung 12: Schema eines Risikomodells zur Prognose von Abkommensunfällen

Im Projekt RISKANT werden zu diesem Zweck verschiedene Modellvorhersagen und örtliche Unfallzahlen in Form von Gewichtungsfaktoren verwendet, um die Schwächen traditioneller Risikomodelle (z.B. fehlende Berücksichtigung von Interdependenzen zwischen den Variablen sowie Unsicherheiten in Bezug auf Systemkomponenten) zu vermeiden und ein (Rechen-) Ergebnis zu liefern, welches der Realität weitestgehend entspricht.

In einem ersten Schritt werden verschiedene Parameter des Straßenumfelds (Entwurfs-elemente der Lage und der Höhe), Straßen- und Witterungsbedingungen zum Unfallzeitpunkt sowie historische Unfalldaten herangezogen, um ein Prognosemodell für Abkommensunfälle zu kalibrieren. Ergebnis dieser Modellierung ist ein streckenspezifisches Abkommensrisiko, das für jede Straßenstelle bzw. -strecke in Abhängigkeit der oben ge-

nannten Parameter einen Erwartungswert für einen Abkommensunfall berechnet („normales“ Unfallgeschehen).

Zusätzlich zu den Charakteristika des Gefahrenraumes werden aktuelle Unfallzahlen für eine weitere „Verfeinerung“ (Gewichtung) der Modellergebnisse herangezogen. HAUER [13] hat im Rahmen einer – für die Verkehrssicherheitsforschung richtungsweisenden – Arbeit nachgewiesen, dass die Verknüpfung der Ergebnisse eines multivariaten Risikomodells mit Informationen zum örtlichen Unfallgeschehen gravierende Vorteile gegenüber traditionellen Analysemethoden (z.B. Ereignisbäume) aufweist:

1. Berücksichtigung von im Modell nicht enthaltenen Variablen und des allgemeinen Trends:

Jedes Risikomodell, auch wenn es noch so viele Einflussparameter berücksichtigt, liefert, wie bereits erläutert wurde, lediglich ein „Abbild“ der Realität. Diese spiegelt sich laut SICKING et al. [14] in den örtlichen Unfallzahlen wider:

“Local crash histories intrinsically incorporate the effects of all high-way, roadside and local land-use characteristics for the site under consideration”

Im Umkehrschluss ist es daher auch möglich, auf Basis der Unfallzahlen, Aussagen hinsichtlich der örtlichen Gegebenheiten zu tätigen, insbesondere wenn diese im Rahmen von multivariaten Risikomodellen untersucht werden.

2. Vermeidung des Regression-to-the-Mean (RTM) Fehlers:

Die Regression zur Mitte ist ein Begriff aus der Statistik und bezeichnet das Phänomen, dass bei Zufallsvariablen nach einem extremen Messwert die nachfolgende Messung wieder näher am Durchschnitt liegt. HAUER und PERSAUD [15] haben 1983 nachgewiesen, dass RTM-Fehler bei Verkehrssicherheitsanalyse besonders häufig anzutreffen sind, da im Regelfall jene Stellen im Straßennetz untersucht werden, die hinsichtlich ihres Unfallgeschehens besonders auffällig waren.

Mithilfe des sogenannten Empirical-Bayes (EB) Ansatzes ist es möglich, den Output eines (Risiko-)Modells dermaßen zu modifizieren, dass RTM-Fehler vermieden werden und das Ergebnis den streckenspezifischen Erwartungswert (κ) wiedergibt. Dieser modifizierte Bewertungsmaßstab wird daher auch als „erwartetes“ Unfallgeschehen bezeichnet.

3.1 Methodische Vorgehensweise

Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung von Unfallereignissen durch eine Poisson-Verteilung approximiert werden kann. Die Poisson-Verteilung ist eine diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung, die beim mehrmaligen Durchführen eines sogenannten Bernoulli-Experiments entsteht. Hierbei handelt es sich um ein Zufallsexperiment, das nur zwei mögliche Ergebnisse kennt (z.B. Auftreten bzw. Nicht-Auftreten eines Unfalls). Führt man ein solches Experiment sehr oft durch und ist die Erfolgswahrscheinlichkeit gering, so ist die Poisson-Verteilung eine gute Näherung für die entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung. Die Poisson-Verteilung wird deshalb auch als Verteilung der seltenen Ereignisse bezeichnet. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung wird durch einen einzigen Parameter $\lambda > 0$ bestimmt.

$$f(k; \lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, \quad k \in \mathbb{N}_0,$$

der gleichzeitig auch Erwartungswert und Varianz der Zufallsvariable Y ist. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Äquidispersion.

$$E(Y) = \lambda, \quad \text{Var}(Y) = \lambda.$$

Der Parameter λ beschreibt die mittlere Auftretenshäufigkeit eines Ereignisses in einem gewissen Zeitraum.

Regressionprobleme mit Zählvariablen als abhängige Variable führen zur sogenannten Poisson-Regression. Diese fällt ebenso wie die klassische lineare Regression in den methodisch einheitlichen Rahmen der generalisierten linearen Modelle (GLM).

Bei der Poisson-Regression sind oftmals folgende zwei Probleme zu beobachten:

1. Überdispersion: Eine Charakteristik der Poissonverteilungsannahme ist die Gleichheit von Erwartungswert und Varianz. In vielen Fällen wird jedoch eine weit höhere empirische Varianz in den Daten beobachtet, z.B. durch das Fehlen von wichtigen erklärenden Kovariablen. Als Überdispersion bezeichnet man daher in der Poisson-Regression das Phänomen, dass die empirische Varianz der Daten ihren Mittelwert übersteigt. Abhilfe schaffen sogenannte Quasi-Poisson-Modelle oder Gamma-Poisson-Mischmodelle, welche zu einer negativen Binomial-Verteilung (NB-Regression) führen (siehe Kapitel 1).

2. Nullenüberschuss: Ein weiteres häufig auftretendes Phänomen bei der Poisson-Regression ist, dass mehr Nullen beobachtet werden, als es im gewählten Modell durch die Verteilungsannahme erlaubt ist. Mögliche Lösungsansätze sind Nullenüberschuss-Regressionsmodelle wie z.B. die Zero-Inflated-Poisson-Regression (ZIP) oder die Zero-Inflated-Negative-Binomial-Regression (ZINB).

3.1.1. Generalisierte Lineare Modelle

Generalisierte lineare Modelle [17] umfassen in einem methodisch einheitlichen Rahmen verschiedene Regressionsansätze für nicht notwendigerweise normal-verteilte Zielvariablen. In solchen Modellen wird u.a. angenommen, dass der Effekt der Kovariablen durch einen linearen Prädiktor erfasst werden kann.

Der bedingte Erwartungswert $\mu = E(y|x)$ der Zielvariablen y wird mit dem linearen Prädiktor $\eta = x^T \beta$ durch eine Responsefunktion h bzw. einer Linkfunktion $g = h^{-1}$ verknüpft:

$$\mu = h(\eta) \text{ bzw. } \eta = g(\mu).$$

Die Zielvariable wird nicht mehr als (approximativ) normal-verteilt betrachtet, sondern folgt einer beliebigen Verteilung aus der univariaten Exponentialfamilie. Hierin enthalten sind insbesondere Regressionsmodelle für binäre Zielgrößen (Bernoulliverteilung) und Zählvariablen (Poissonverteilung), aber auch Regressionsmodelle für positive stetige Zufallsvariablen basierend auf der Gammaverteilung.

Die bedingte Verteilungsdichte von $y_i|x_i$ muss somit der Beziehung

$$f(y; \lambda, \phi) = \exp\left(\frac{y \cdot \lambda - b(\lambda)}{\phi}\right) + c(y, \phi)$$

genügen, wobei $b(\cdot)$ und $c(\cdot)$ gegebene Funktionen bezeichnen, welche die gewählte Modellklasse (Normal-, Binomial-, Poisson-, Gammaverteilung) spezifizieren. Der Parameter λ heißt *natürlicher* oder *kanonischer Parameter*, der Parameter ϕ wird *Dispersionsparameter* genannt. Man kann zeigen, dass

$$\begin{aligned} E(y_i | x_i) &= \mu_i = b(\lambda_i), \\ \text{Var}(y_i | x_i) &= \phi \cdot b'(\lambda_i) \end{aligned}$$

gilt. Die Varianz ist somit proportional zu $\text{Var}(\mu) = b'(\lambda(\mu))$, der so genannten Varianzfunktion. Ein spezifisches generalisiertes lineares Modell ist somit durch den Typ der Exponentialfamilie, durch die Wahl der Link-/Responsefunktion und durch die Definition und Auswahl der Kovariablen vollständig charakterisiert. Die Modellparameter werden übli-

cherweise durch die Maximum-Likelihood-Methode in einer iterativ gewichteten Least-Squares-Schätzung berechnet.

3.1.2. Regressionsmodelle für Zähldaten

Poisson-Modell: Das einfachste Regressionsmodell für Zähldaten ist das Poisson-Modell mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung

$$f(y; \mu) = \frac{\exp(-\mu)\mu^y}{y!} = \exp(y \log(\mu) - \mu - \log(y!))$$

Die kanonische Linkfunktion ist gegeben durch $g(\mu) = \log(\mu)$, welche eine log-lineare Beziehung zwischen dem Erwartungswert und dem linearen Prädiktor beschreibt. Die Varianz im Poisson-Modell ist gleich dem Erwartungswert, daher ist der Dispersionsparameter $\phi = 1$ und die Varianzfunktion $\text{Var}(\mu) = \mu$.

Quasi-Poisson-Modell: In Anwendungen wird oft eine signifikant größere empirische Varianz beobachtet, als die angenommene Poisson-Verteilung impliziert. Es ist daher zweckmäßig, einen Überdispersionsparameter ϕ , der aus den Daten geschätzt werden kann, mittels der Annahme

$$\text{Var}(y_i | x_i) = \phi \cdot \lambda_i$$

einzuführen.

Negatives Binomial-Modell: Die negative Binomialverteilung tritt auf, wenn überdispersionierte Poisson-verteilte Daten modelliert werden, d.h. man Zähldaten verwendet, bei denen die Varianz größer als das Mittel ist. Wird angenommen, dass die Erwartungswerte μ_i Gamma-verteilt sind, erhält man durch Integration über μ_i in der kontinuierlichen Gamma-Poisson-Mischverteilung als Randverteilung folgende Parametrisierung der negativen Binomialverteilung

$$f(y; \mu, \theta) = \frac{\Gamma(y + \theta)}{\Gamma(\theta)y!} \frac{\mu^y \theta^\theta}{(\mu + \theta)^{y+\theta}}.$$

Der Parameter θ wird Dispersionsparameter genannt. Für einen festen Parameter θ ist die Verteilung wieder Mitglied der Exponentialfamilie und daher ein Spezialfall eines generalisierten linearen Modells. Es gilt wiederum $\phi = 1$, die Varianzfunktion ist aber in diesem Fall gegeben durch

$$\text{Var}(\mu) = \mu + \alpha\mu^2$$

mit $\alpha = 1/\theta$, und daher auf Grund des quadratischen Terms größer als der Erwartungswert (NB-2 Modell). Treten in der abhängigen Variable viele Nullen auf, liefern die oben angeführten Regressionsmodelle verzerrte Koeffizienten. Abhilfe schaffen sogenannte Null-adjustierte Modelle wie die Zero-Inflated-Poisson-Regression (ZIP) bzw. Zero-Inflated-Negative-Binomial-Regression (ZINB).

3.1.3. Schätzung des Überdispersionsparameters

Wird eine mögliche Überdispersion in einem Poisson-Modell durch die Annahme

$$\text{Var}(y_i | x_i) = \phi \cdot \lambda_i$$

berücksichtigt, so schätzt man ϕ durch

$$\phi = \frac{\chi^2}{n-p}$$

Wobei n die Anzahl der Datensätze, p die Anzahl der Modellparameter und

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{\lambda}_i)^2}{\hat{\lambda}_i}$$

die so genannte Pearson-Statistik bezeichnet.

3.1.4. Modellwahl

Um zwischen mehreren konkurrierenden statistischen Modellen mit verschiedenen Prädiktoren und Parametern auszuwählen, muss ein Kompromiss zwischen einer möglichst guten Datenanpassung und einer großer Modellkomplexität, d.h. einer hohen effektiven Anzahl von Parametern, erzielt werden. Das im Rahmen der Maximum-Likelihood-Inferenz am häufigsten verwendete Modellwahlkriterium ist das Informationskriterium nach Akaike (AIC). Allgemein ist das AIC definiert durch

$$\text{AIC} = -2l(\hat{\beta}) + 2k$$

wobei k die Anzahl der Parameter im Modell bezeichnet und $l(\beta)$ den maximalen Wert der Log-Likelihood darstellt, wenn in die Log-Likelihood der ML-Schätzer β eingesetzt wird. Bei der Wahl zwischen verschiedenen Modellen wird das Modell mit dem kleinsten AIC-Wert (und nicht mit der größten Log-Likelihood $l(\cdot)$) bevorzugt. Dadurch wird eine Überanpassung an den Datensatz durch Bestrafung zu hoher Komplexität, d.h. einer zu hohen (effektiven) Anzahl von Parametern, vermieden.

Das AIC-Modellwahlkriterium wird im gegenständigen Projekt verwendet, um aus einer Reihe zur Verfügung stehender Modellen die vielversprechendsten zu selektieren. Hierbei wird folgende Vorgehensweise gewählt:

1. Aufgrund von Vorüberlegungen bzw. Vorwissen aus vorangegangenen Analysen wird eine Auswahl potentieller Modelle getroffen. Diese Modelle können sich in der Anzahl der Variablen aber auch in der Art der Modellierung (z.B. verschiedene Verteilungsannahmen) unterscheiden.
2. Die zur Verfügung stehenden Modelle werden mittels AIC-Modellwahlkriterium beurteilt. Bei der Beschreibung der Ergebnisse sollte man sich jedoch nicht unbedingt auf das beste Modell – im Sinne des gewählten Modellwahlkriteriums – beschränken, da in der Regel mehrere Modelle annähernd das gleiche Gütemaß aufweisen und sich auch nur in bestimmten Teilaspekten unterscheiden. Die finale Modellwahl wurde schlussendlich aufgrund der Ergebnisse der Plausibilitätsprüfung mittels AIC sowie fachlicher Überlegungen getroffen.

3.1.5. Variablenselektion

Da die Zahl der zur Verfügung stehenden Einflussvariablen und Modellierungsvarianten dermaßen groß ist, dass eine Berechnung aller möglichen Modelle nicht ohne weiteres durchführbar war, kamen spezielle Verfahren zur Variablenselektion, wie etwa eine schrittweise Variablenselektion, zum Einsatz.

Bei der schrittweisen Selektion (Stepwise-Selection) wird, ausgehend von einem Startmodell, in jeder Iteration eine Variable in das Modell aufgenommen bzw. entfernt und zwar diejenige, welche die größte Reduktion eines Modellwahlkriteriums (AIC, Kreuzvalidierung etc.) ergibt. Der Algorithmus ist beendet, wenn keine Reduktion mehr möglich ist.

In der internationalen wissenschaftlichen Fachliteratur hat sich das NB-Modell als Standard zur Modellierung von Unfallhäufigkeiten etabliert ([18], [19], [20]). Ein Modell basierend auf der negativen Binomialverteilung für Abkommensunfälle in den USA (Bundesstaat Washington) [10] diente als wichtiger Input für das gegenständliche Risikomodell.

3.2 Datengrundlagen

Der folgende Abschnitt beschreibt die verwendeten Datensätze und stellt dar, in welcher Form diese verknüpft wurden, um als Basis für die Modellierung zu dienen. Für die Modellbildung wurden die Hauptfahrbahnen eines Großteils des österreichischen Autobahnnetzes herangezogen (siehe Abbildung 13: Hochrangiges Straßennetz in Österreich). Auf

Grund fehlender Daten blieben Rampen bzw. Schnellstraßen unberücksichtigt. Nichtsdestoweniger kann der gewählte Modellansatz auch zur Evaluierung von Schnellstraßen hinsichtlich des Abkommensrisikos herangezogen werden. Zwecks Berechnung der Modellkoeffizienten müsste jedoch zuallererst die benötigte Datenbasis aufbereitet bzw. im Falle von Rampen überhaupt erhoben werden.

Eine Übersicht der für die Modellbildung berücksichtigten Autobahnen ist Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Für die Modellbildung berücksichtigte Autobahnen

Bezeichnung	Gesamtlänge
A01 - West Autobahn	291,959 km
A02 - Süd Autobahn	372,783 km
A04 - Ost Autobahn	66,361 km
A07 - Mühlkreis Autobahn	26,831 km
A08 - Innkreis Autobahn	77,442 km
A09 - Pyhrn Autobahn	230,020 km
A10 - Tauern Autobahn	192,709 km
A11 - Karawanken Autobahn	21,243 km
A12 - Inntal Autobahn	158,320 km
A13 - Brenner Autobahn	36,006 km
A14 - Rheintal/Walgau Autobahn	63,373 km
A21 - Wiener Außenring Autobahn	38,243 km
A22 - Donauufer Autobahn	33,645 km
A23 - Autobahn Südosttangente Wien	17,754 km
A25 - Welser Autobahn	19,734 km

Quelle: BMVIT, Abschnittsverzeichnis [21]

Die Richtungsfahrbahnen werden im Folgenden mit R+ (aufsteigende Kilometrierung) bzw. R- (absteigende Kilometrierung) bezeichnet.

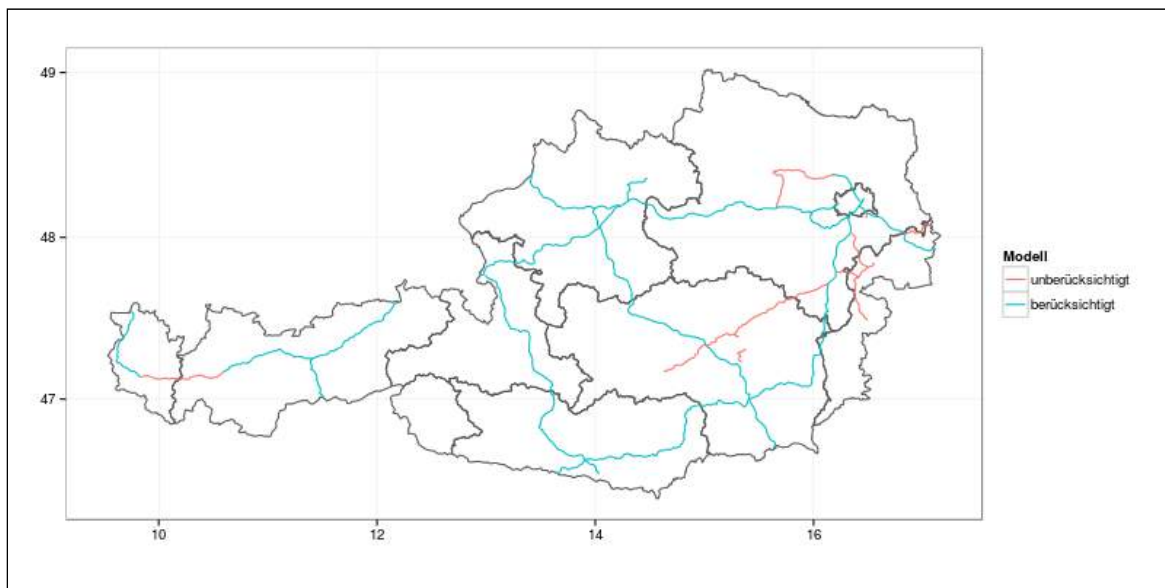


Abbildung 13: Hochrangiges Straßennetz in Österreich

3.2.1. Unfalldaten

Grundlage für die Modellierung der Abkommensunfälle waren die Unfalldaten der Statistik Austria, welche hinsichtlich der spezifischen Aufgabenstellung teilweise nachkorrigiert werden mussten. Da sämtliche in Betracht kommende Modelle Zähldaten als abhängige Variable verwenden, wurden in einem ersten Schritt die einzelnen Unfälle jeweils einem bestimmten Streckenabschnitt zugeordnet. Auf Basis dieser Segmentierung konnten im Anschluss Unfallanzahlen bestimmt und den entsprechenden Straßenparametern gegenübergestellt werden. Die Streckenintervalle müssen jedoch eine gewisse Mindestlänge aufweisen, damit die beobachteten Unfallhäufigkeiten durch eine theoretische Verteilung (z.B. Poisson- oder negativen Binomialverteilung) approximiert werden können. Ferner sollten die Segmentlängen auch den tatsächlichen Abkommensdistanzen weitestgehend entsprechen.

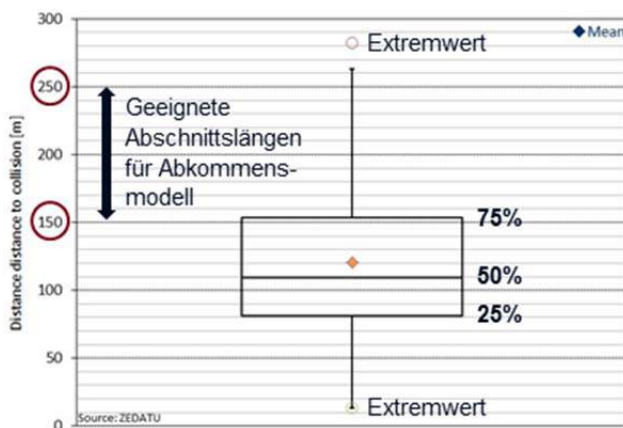


Abbildung 14: Abkommenslängen bei tödlichen Verkehrsunfällen auf Autobahnen

Aus Abbildung 14 ist ersichtlich, dass 75% der tödlichen Abkommensunfälle Abkommensdistanzen (Ausgangspunkt des Unfalls bis zum Abkommen) bis zu 150 m aufweisen, in Extremfällen sogar bis zu 280 m. Um ein valides Prognosemodell zu entwickeln, welches der untersuchten Realität größtmöglich entspricht, wurden in einem ersten Näherungsverfahren Abschnittslängen von 150–250 m in Betracht gezogen.

Die ermittelten Abkommensdistanzen entstammen der „Zentrale Datenbank zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen (ZEDATU)“. Hierbei handelt es sich um eine Verkehrsunfalldatenbank der Technischen Universität Graz, welche auf dem sogenannten STAIRS Protokoll (Standardisation of Accident and Injury Registration Systems) basiert. Das STAIRS Protokoll wurde in dem gleichnamigen EU-Projekt erstellt und beschreibt die für Verletzungsanalyse von Fahrzeuginsassen notwendigen zu erhebenden Daten.

Gemäß RVS 02.02.21 [7] werden zur Identifizierung von Unfallhäufungsstellen Abfragefenster mit Segmentlängen zwischen 50–250 m verwendet, wobei im Freilandbereich und im Speziellen auf Autobahnen und Schnellstraßen ein Wert nahe der oberen Schranke empfohlen wird.

Im Folgenden wird für die Segmentierung des Netzes von einer fixen Intervalllänge von $L=250$ m ausgegangen. Eine genaue Begründung hierfür erfolgt im Kapitel 3.3. Der betrachtete Zeitraum für das Modell wurde aus datenaufbereitungstechnischen Gründen auf die Jahre 2005–2011 eingeschränkt.

Nachfolgend zeigt Abbildung 15 die beobachteten Unfallverteilungen pro Fahrtrichtung bei einer Segmentlänge von 250 m (schwarze Balken). Zusätzlich wurden für diese Randverteilung noch Poisson- bzw. negativ Binomialverteilungen angepasst (orange Linien). Dabei ist ersichtlich, dass das NB-Modell (beiden unteren Graphiken) vorzuziehen ist, da die Poissonverteilung die Anzahl der Segmenten ohne Unfälle unterschätzt. Werden nur Abkommensunfälle aus der TAG betrachtet, zeigt sich ein ähnlicher Effekt.

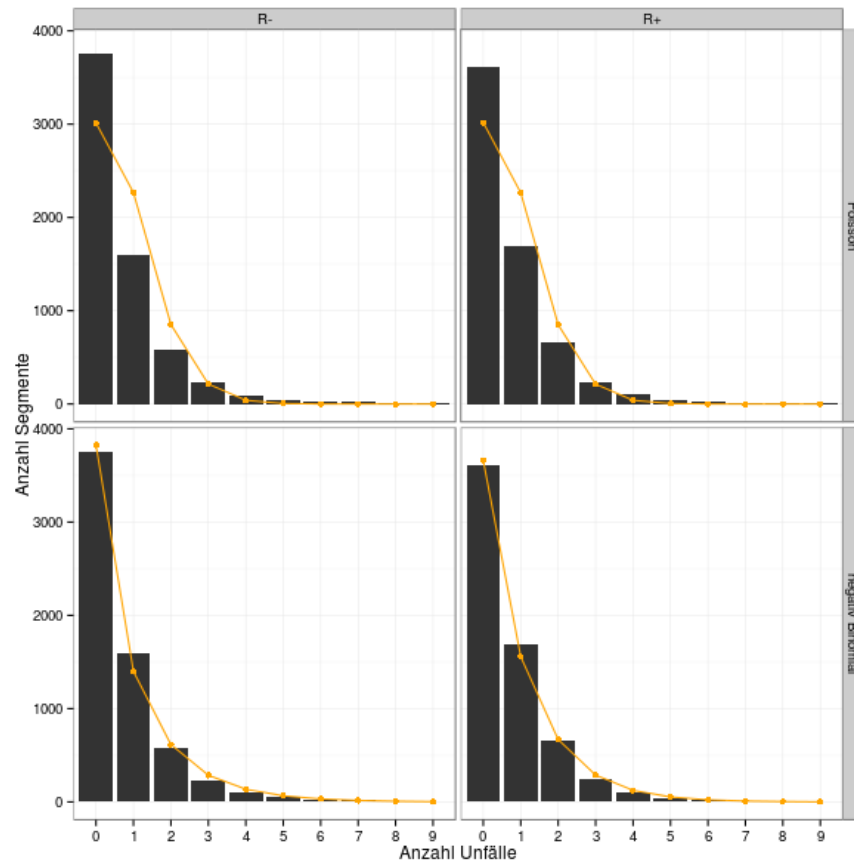


Abbildung 15: Verteilung der Unfallanzahlen im Autobahnnetz und angepasste theoretische Verteilungen (250 m Segmentierung)

3.2.2. RoadSTAR Daten

Mit dem mobilen Messsystem RoadSTAR können im fließenden Verkehr bei Messgeschwindigkeiten zwischen 40 km/h und 120 km/h (Standardgeschwindigkeit 60km/h) die wichtigsten Oberflächeneigenschaften sowie Trassierungsparameter erfasst werden. Zusätzlich werden mit Kamerasystemen der Straßenraum und die Straßenoberfläche aufgenommen.

Bei der Messkampagne 2009 wurde der rechte Fahrstreifen des gesamten ASFINAG-Netzes erfasst. Diese Messdaten liegen bis auf wenige Ausnahmen (Messlücken bei Baustellen, z.B. A1 Wien Auhof oder A2 Laßnitzhöhe) vor und wurden für die nachfolgende Modellierung herangezogen. Die Trassierungs- und Straßenzustandsdaten haben eine Auflösung von einem Meter. Für die Modellbildung wurden aus diesen Messdaten verschiedene aussagekräftige Merkmale für die einzelnen Segmente abgeleitet. Weitere Merkmale, wie etwa Pannestreifen, Parkplätze, Raststationen, Knoten, Anschlussstellen oder Geschwindigkeitslimits wurden manuell aus den vorhandenen Straßenraumvideos extrahiert.

Tabelle 6: Übersicht der für die Modellierung verwendeten Variablen

Kategorie	Variablen-name	Skalen-niveau	Anmerkungen
Trassierungsdaten/ Straßengeometrie	s_med	metrisch	Median der Längsneigung im betrachteten Segment.
	q_med	metrisch	Median der Querneigung im betrachteten Segment.
	q_zerocross	binär	Nulldurchgang der Querneigung, d.h. es tritt ein Vorzeichenwechsel der Querneigung im betrachteten Segment auf.
	bendiness	metrisch	Kurvigkeit im betrachteten Segment; Die Kurvigkeit ist für ein Segment der Länge definiert als: $b = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \psi_i ,$ wobei die jeweilige Kurswinkeländerung in Gon bezeichnet wird.
Straßenzustand	friction_med	metrisch	Median der Griffigkeit im betrachteten Segment.
	friction_sd	metrisch	Standardabweichung der Griffigkeit im betrachteten Segment.
	friction_diff_q10	metrisch	Differenz zwischen Median und 0.1-Quantil der Griffigkeit im betrachteten Segment. Diese Kovariable stellt einen Indikator für Griffigkeitsabfälle dar.
	depth2m_med	metrisch	Median der theoretischen Wasserfilmtiefe (2m-Latte) im betrachteten Segment, als ein Maß für die Spurrinnentiefe.
	depth2m_diff_q90	metrisch	Abstand zwischen 0.9-Quantil und Median der theoretischen Wasserfilmtiefe im betrachteten Segment. Diese Kovariable stellt einen Indikator für Änderungen der theoretischen Wasserfilmtiefe dar.
Straßenraumvideos bzw. Markertabellen	tunnel_ind ⁴	binär	Indikatorvariable für das Vorhandensein eines Tunnels im betrachteten Segment.
	lanes ⁴	kategorial	Anzahl der Fahrstreifen im betrachteten Segment (siehe Abbildung 16). Falls sich die Anzahl der Fahrstreifen im Segment ändert, wird der Maximalwert verwendet. Als Referenzwert werden zwei Fahrstreifen verwendet.
	lane_ind	kategorial	Indikatorvariable ob sich die Anzahl der Fahrstreifen im betrachteten Segment verändert. Diese Variable hat die Ausprägungen <i>none</i> , <i>exp</i> (Expansion) und <i>red</i> (Reduktion). Als Referenzkategorie wird <i>none</i> verwendet.

⁴Tunnels und Änderungen der Fahrstreifenanzahl werden bereits während der Messung entsprechend markiert. Diese Marker konnten direkt aus den Messtabellen übernommen und in dementsprechende Modellvariablen für die Segmente umgerechnet werden:

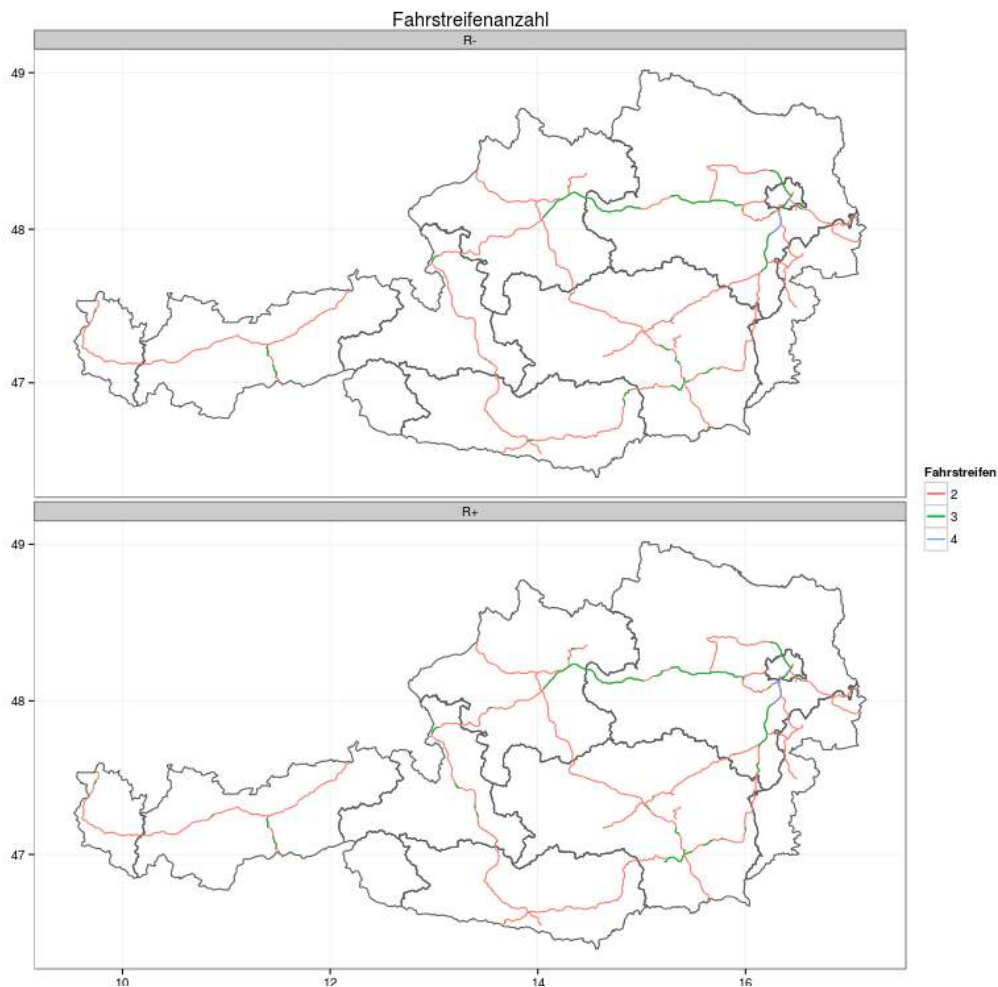


Abbildung 16: Anzahl der Fahrstreifen im Autobahnnetz

Die Geschwindigkeitslimits und die Information über das Vorhandensein von Pannestreifen wurden aus den Straßenraumvideos extrahiert und auf die Tabelle 7 enthaltenen Modellvariablen umgelegt.

Tabelle 7: Übersicht über verwendeten Geschwindigkeitsvariablen und Pannestreifeninformationen

Kategorie	Variablenname	Skalenniveau	Anmerkungen
Straßenraumvideo & Markertabellen (Forts.)	speed_cat	kategorial	Geschwindigkeitslimit im betrachteten Segment. Falls sich die Geschwindigkeit im Segment ändert wird der Minimalwert verwendet. Diese kategoriale Variable hat die Ausprägungen 130 km/h, 100 km/h, 80 km/h und ≤ 60 km/h (siehe Abbildung 17). Als Referenz wird 130 km/h verwendet.
	speed_var	binär	Indikatorvariable ob sich das Geschwindigkeitslimit im betrachteten Segment verändert.
	em_lane_rel	metrisch	Verhältnis des Bereichs mit vorhandenen Pannestreifen zur Segmentlänge im betrachteten Segment.

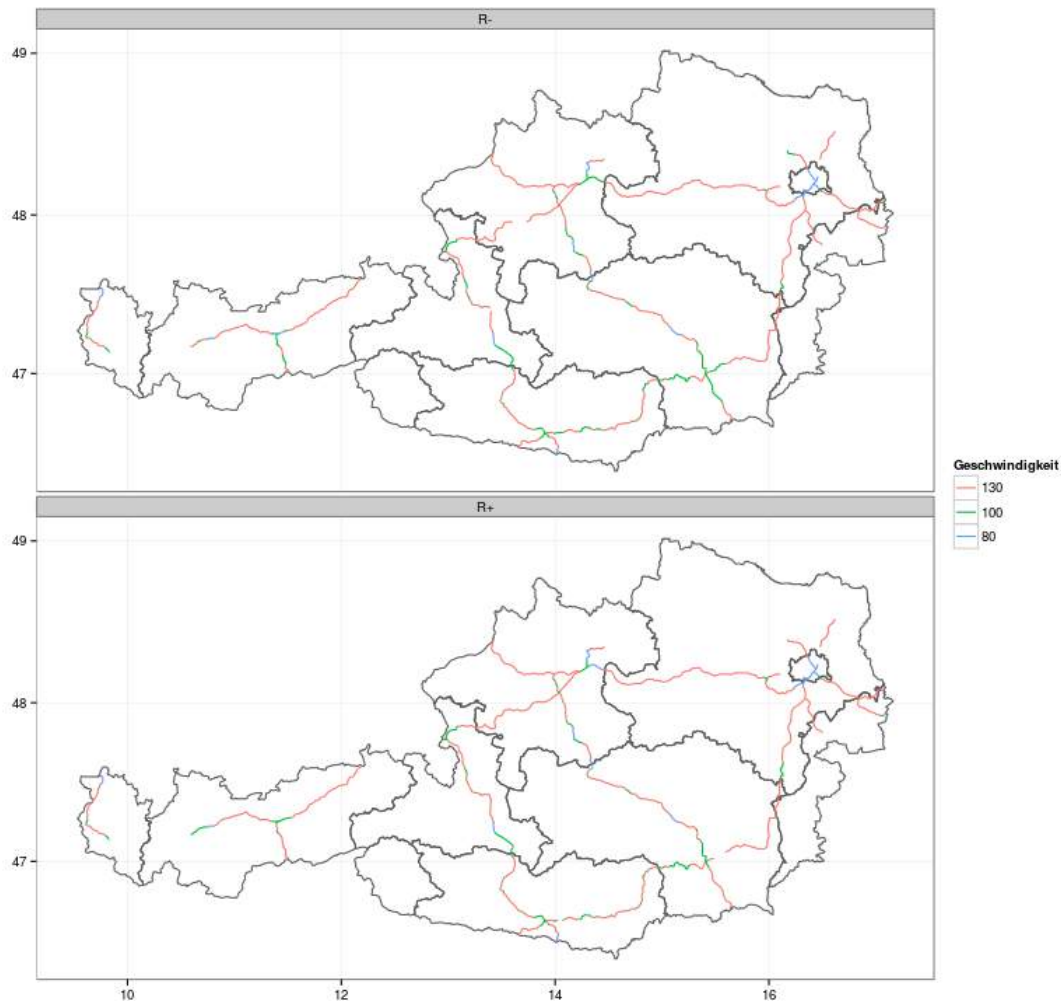


Abbildung 17: Geschwindigkeitsbereiche im Autobahnnetz

Des Weiteren wurden aus den Befahrungsvideos Anfangs- und Endpunkte für Halteplätze, Raststationen, Anschlussstellen und Knoten extrahiert. Als Anfangspunkt diente der Beginn der Sperrlinie zwischen dem Abbiegestreifen und rechtem Fahrstreifen vor der Verkehrsinsel. Analog dazu ist der Endpunkt das Ende der Sperrlinie zwischen Einbiegestreifen und dem rechten Fahrstreifen. Um allfällige Spurwechselvorgänge bei Annäherung an eine Anschlussstelle, Knoten etc. zu berücksichtigen, wurden die jeweiligen Anfangs- und Endpunkte auf Intervalle erweitert – d.h. der Beginn eines Merkmals wurde entsprechend der RVS 03.05.13 [20]) um 500 m noch vorne und aus Toleranzgründen um 20m nach hinten verlegt. Für Endpunkte wurden die umgekehrten Längen herangezogen (20m nach vorne bzw. 500m nach hinten). Die daraus resultierende 520 m-Bereiche wurden als Indikatorvariablen auf die Segmente umgelegt und ergeben die in Tabelle 8 aufgelisteten binären Modellvariablen:

Tabelle 8: Übersicht über die verwendeten Indikatorvariablen zur Identifikation von Anschlussstellen, Knoten, Raststationen und Halteplätzen

Kategorie	Variablenname	Skalenniveau	Anmerkungen
Indikatorvariablen	marker_junction_b_ind	binär	Bereich Anschlussstelle-Anfang
	marker_junction_e_ind		Bereich Anschlussstelle-Ende
	marker_interchange_b_ind		Bereich Knoten-Anfang
	marker_interchange_e_ind		Bereich Knoten-Ende
	marker_rest_b_ind		Bereich Raststation-Anfang
	marker_rest_e_ind		Bereich Raststation-Ende
	marker_stop_b_ind		Bereich Halteplatz-Anfang
	marker_stop_e_ind		Bereich Halteplatz-Ende

Die in Tabelle 8 enthaltenen Indikatorvariablen wurden zwecks Vereinfachung zu einer einzigen Modellvariable *event_ind* (binär) zusammengefasst, die alle beschriebenen Eigenschaften vereinigt.

Jährliche Daten der Verkehrsstärken (JDTV) bzw. LKW-Anteile wurden seitens der ASFINAG für die Jahre 2000–2010 zur Verfügung gestellt. Für die Modellbildung wurden die jeweiligen Abschnittswerte entsprechend dem Abschnittsverzeichnis robust gemittelt (Median) und auf die Segmentierung umgelegt. Da die JDTV-Werte nicht richtungsbezogen sind, wurden sie halbiert, da man ungefähr von einer gleichen Aufteilung in beiden Fahrtrichtungen ausgehen kann.

Tabelle 9: Übersicht über die verwendeten Variablen zur Modellierung der Verkehrsstärke

Kategorie	Variablenname	Skalenniveau	Anmerkungen
Verkehrsstärke	aadt_total_med	metrisch	Median des JDTV der Jahre 2006–2010 im betrachteten Segment
	aadt_hgv_rel		Median der LKW-Anteile der Jahre 2006–2010 im betrachteten Segment

Abbildung 18 zeigt den JDTV-Verlauf der einzelnen Jahre bzw. die gemittelten Werte auf der A2 ab Wien bis zur Staatsgrenze.

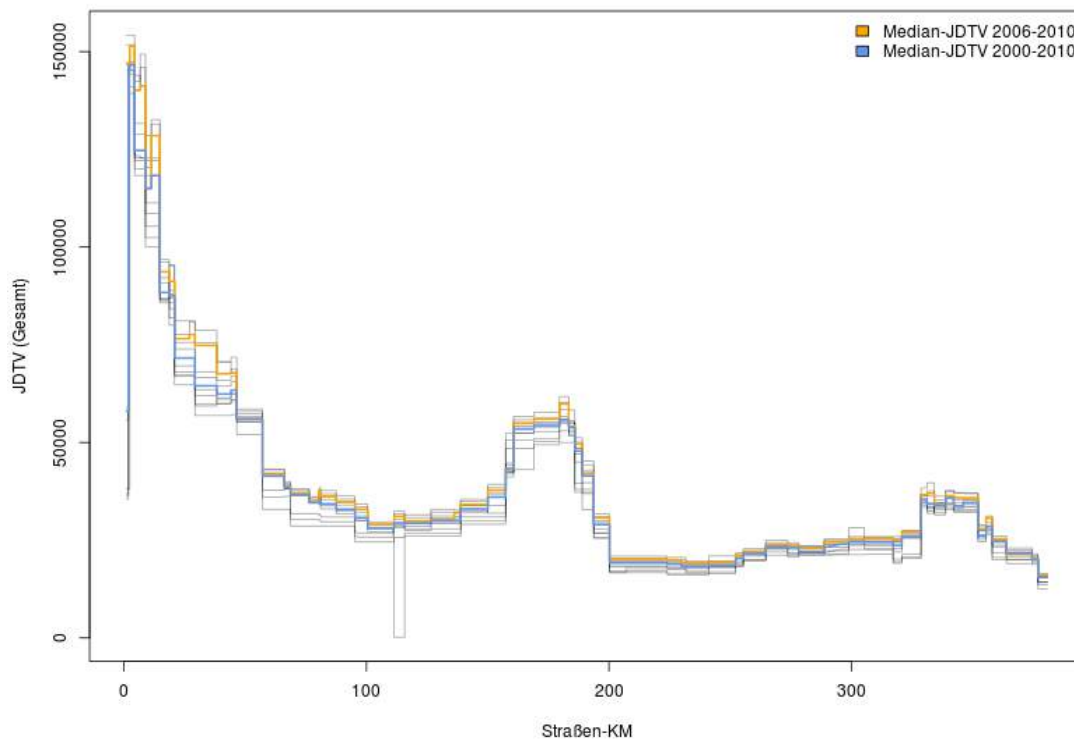


Abbildung 18: Jährlicher JDTV-Verlauf auf der A2 (2000-2010)

3.3 Modellwahl

Als Grundlage für die Modellanpassung dienen die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Variablen. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Modellselektion zusammengefasst.

Ein GLM ist linear in den Koeffizienten, die Kovariablen im Modell können jedoch eine beliebige funktionale Form aufweisen. Um diese zu bestimmen, wurde in einem ersten Schritt ein sogenanntes Generalisiertes Additives Modell (GAM) [21] angepasst. Derartige Modelle bestimmen mittels einer Backfitting-Prozedur für jede metrische Kovariable einen Splineschätzer mit der notwendigen Ordnung. Die Ordnungen dieser Splineschätzer (effektive Freiheitsgrade) gelten als Maß für die Nichtlinearität der einzelnen Kovariablen. Da diese Modelle jedoch anfällig für eine Überanpassung sind, wird ein GLM mit geeigneten Polynomfunktionen für die einzelnen Kovariablen betrachtet. Dies resultierte in einem quadratischen Ansatz für die Kovariablen *aadt_total_avg* bzw. *depth2m_med*. Die restlichen Kovariablen gehen linear in das Modell ein. Zusätzlich werden noch Interaktionseffekte zwischen der Verkehrsstärke (*aadt_total_avg*) und der Fahrstreifenzahl (*lanes*) bzw. der Verkehrsstärke und dem Tunnelindikator (*tunnel_ind*) berücksichtigt. Diese Vorgehensweise wurde sowohl für die Gesamtunfallanzahlen als auch die Abkommensunfälle (TAG) angewendet.

Da für die betrachteten Modelle nur vollständige Datensätze verwendet werden können, müssen Datenzeilen mit fehlenden Werten entfernt werden. Abbildung 19 zeigt eine Übersichtskarte jener Abschnitte, die vollständige Daten aufweisen (dunkelgrün) und daher im Rahmen der Modellanpassung berücksichtigt wurden (bei einer Segmentlänge von 250 m).

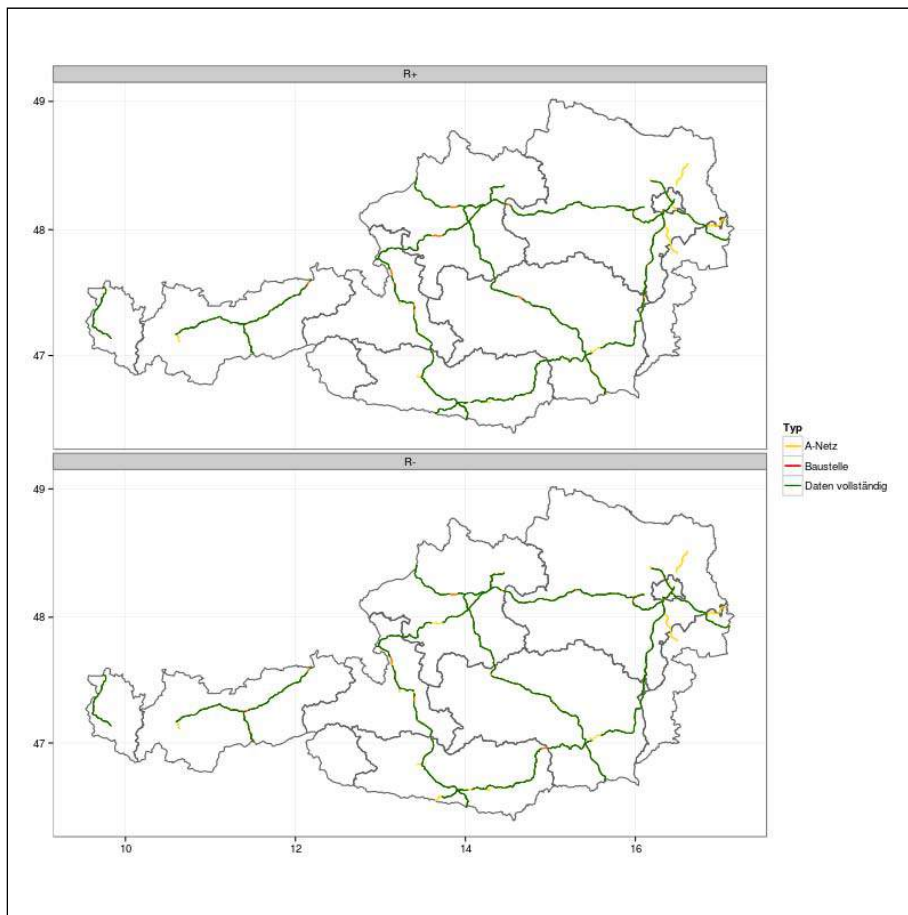


Abbildung 19: Im Modell berücksichtigte Autobahnabschnitte

Um sinnvolle bzw. optimale Segmentlängen zu bestimmen, wurde eine große Anzahl von Computersimulationen durchgeführt. Hierfür wurden verschiedene Segmentlängen zwischen 150–1000 m betrachtet. Für jede einzelne Segmentlänge, wurden durch die Wahl verschiedener Startpunkte, d.h. durch eine Verschiebung von jeweils 25 m, verschiedene Segmentierungen des Autobahnnetzes und den darauf projizierten Daten berechnet. Auf den so definierten Intervallen wurde die Modellgüte von Poissonmodellen, die Signifikanz der Kovariablen bzw. die Streuung der Koeffizienten untersucht.

Es wurden Segmentlängen von 250 m gewählt, da diese noch ausreichend lokale Effekte abbilden und zusätzlich mit der empfohlenen Fensterlänge zur Berechnung von Unfall-

häufungsstellen im Freilandbereich übereinstimmen [7]; 250 m liegen auch innerhalb der im Kapitel 3.2.1 postulierten Abschnittslängen zur Modellierung von Abkommensunfällen.

Für diese Segmentlänge wurden anschließend die verschiedenen Modellannahmen (Poisson, Quasi-Poisson, NB) betrachtet. Die Schätzung des Dispersionsparameters beim Quasi-Poissonmodell ergab einen Wert $\phi > 2$, wodurch von (leichter) Überdispersion auszugehen ist. Da NB-Modelle Überdispersion berücksichtigen können und bei den vorliegenden Daten die Verteilung von einem NB-Modell besser approximiert wird (siehe Abbildung 15), erhielten diese den Vorzug gegenüber allen anderen Modellen.

Für das finale Modell wurden die Segmente des Autobahnnetzes in zwei Kategorien eingeteilt: Event-Sections, das sind jene Bereiche die in der Umgebung von Knoten, Auf- oder Abfahrten bei Anschlussstellen, Raststationen etc. liegen bzw. deren Komplemente (Non-Event Sections). Dies führt zu unterschiedlichen Schätzungen der Kovariablen, da nun bei Event-Sections jede einzelne Indikatorvariable für diese Merkmale verwendet werden kann. Zur Modellierung von Knoten wurde nur die zusammengefasste Kovariable *event_ind* verwendet.

Ausgehend von einem „leeren“ Modell, in dem nur der konstante Term (Intercept) Eingang fand, wurde sowohl für Abkommensunfälle als auch für alle Unfälle eine schrittweise AIC-basierte Modellselektion durchgeführt. Der Datensatz wurde hierfür in Event bzw. Non-Event Abschnitte aufgeteilt.

Die Resultate dieser Modellauswahl sind in Tabelle 10 bis Tabelle 13 zusammengefasst. Die zweite Spalte enthält die Modellkoeffizienten β_i , $i \in \{1, \dots, p\}$. Bei metrischen Kovariablen beschreiben die Koeffizienten den multiplikativen Effekt bei einer Erhöhung der Kovariable um eine Einheit. Die Koeffizienten der kategorialen Kovariablen sind immer im Vergleich zur Referenzkategorie zu interpretieren. Die dritte Spalte enthält den Standardfehler der Koeffizientenschätzung. Der Quotient aus den Koeffizienten und den Standardfehlern ergibt den sogenannten Z-Wert, dieser folgt in GLM asymptotisch einer Normalverteilung und wird zum Testen der Nullhypothese $\beta_i = 0$ gegen die Alternative $\beta_i \neq 0$ benötigt. Die p -Werte dieser Tests sind in der vorletzten Spalte angeführt. Ist der p -Wert kleiner als ein vorgegebenes Signifikanzniveaus α (üblicherweise $\alpha = 0.05$), kann die Nullhypothese verworfen werden. Diese bedeutet, dass der Regressionsparameter signifikant von Null verschieden ist und daher die Kovariable einen signifikanten Einfluss auf die Zielvariable hat. Für kategoriale Variablen haben diese Einzeltests keine Aussagekraft, in diesem Fall müssen Devianzanalysen durchgeführt werden.

Tabelle 10: Selektiertes Modell für Abkommensunfälle (TAG) auf Non-Event Sections

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	-1.73e+00	2.99e-01	-5.77	8.0e-09	***
aadt_total_avg	4.86e-05	8.73e-06	5.56	2.7e-08	***
speed_cat100	-2.19e-01	8.40e-02	-2.61	0.00909	**
speed_cat80	-1.28e+00	1.85e-01	-6.96	3.5e-12	***
bendiness	7.71e+00	1.03e+00	7.46	8.8e-14	***
s_med	-7.69e-02	1.53e-02	-5.03	4.9e-07	***
q_zerocross	3.22e-01	6.99e-02	4.60	4.3e-06	***
depth2m_med	-4.90e-02	1.26e-02	-3.89	0.00010	***
aadt_hgv_rel	2.57e-02	5.38e-03	4.77	1.8e-06	***
I(aadt_total_avg^2)	-3.98e-10	1.42e-10	-2.80	0.00516	**
marker_emlane_rel	2.73e-01	1.40e-01	1.95	0.05140	.
friction_med	-1.22e+00	3.26e-01	-3.73	0.00019	***
q_med	-1.52e-02	7.35e-03	-2.07	0.03879	*
lanes3	9.98e-03	7.35e-02	0.14	0.89197	
lanes4	5.42e-01	2.17e-01	2.49	0.01265	*
tunnel_indTRUE	-3.26e-01	1.72e-01	-1.89	0.05884	.
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Dispersionsparameter $\theta=1,3$

Tabelle 11: Selektiertes Modell für Abkommensunfälle (TAG) auf Event Sections

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	-2.77e+00	1.66e-01	-16.67	< 2e-16	***
aadt_total_avg	7.14e-05	1.07e-05	6.65	2.9e-11	***
speed_cat100	-2.41e-01	8.53e-02	-2.82	0.0048	**
speed_cat80	-1.38e+00	1.79e-01	-7.70	1.4e-14	***
bendiness	9.68e+00	1.08e+00	8.96	< 2e-16	***
s_med	-8.47e-02	2.16e-02	-3.91	9.1e-05	***
I(aadt_total_avg^2)	-9.28e-10	2.16e-10	-4.29	1.8e-05	***
friction_sd	3.36e+00	1.39e+00	2.42	0.0156	*
marker_stop_e_indTRUE	-1.70e-01	1.13e-01	-1.51	0.1317	
q_zerocross	1.97e-01	8.97e-02	2.19	0.0285	*
lanes3	-4.17e-01	2.75e-01	-1.51	0.1302	
lanes4	-1.80e+00	9.04e-01	-1.99	0.0470	*
aadt_hgv_rel	1.63e-02	7.05e-03	2.30	0.0212	*
marker_stop_b_indTRUE	2.69e-01	1.01e-01	2.68	0.0075	**
marker_emlane_rel	-1.69e-01	8.23e-02	-2.06	0.0398	*
marker_junction_b_indTRUE	1.36e-01	7.01e-02	1.94	0.0527	.
lane_red_indexp	-8.35e-01	5.39e-01	-1.55	0.1216	
lane_red_indred	-7.12e-01	4.80e-01	-1.48	0.1383	
aadt_total_avg:lanes3	2.26e-05	1.00e-05	2.26	0.0238	*
aadt_total_avg:lanes4	5.79e-05	1.98e-05	2.93	0.0034	**
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Dispersionsparameter $\theta=1,481$

Tabelle 12: Selektiertes Modell für sämtliche Unfälle auf Non-Event Sections

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	-1.54e+00	1.99e-01	-7.74	1.0e-14	***
aadt_total_avg	1.04e-04	6.39e-06	16.23	< 2e-16	***
I(aadt_total_avg^2)	-1.04e-09	1.21e-10	-8.58	< 2e-16	***
s_med	-4.98e-02	1.09e-02	-4.58	4.8e-06	***
depth2m_med	-7.60e-02	2.67e-02	-2.85	0.00436	**
bendiness	3.28e+00	7.18e-01	4.57	4.8e-06	***
lanes3	-5.56e-02	1.45e-01	-0.38	0.70167	
lanes4	-1.48e+00	5.29e-01	-2.80	0.00505	**
friction_med	-8.62e-01	2.19e-01	-3.93	8.3e-05	***
q_zerocross	1.82e-01	4.97e-02	3.67	0.00024	***
aadt_hgv_rel	1.44e-02	3.97e-03	3.64	0.00028	***
lane_red_indexp	5.75e-01	2.45e-01	2.35	0.01894	*
lane_red_indred	4.75e-01	2.26e-01	2.10	0.03579	*
friction_sd	2.35e+00	8.18e-01	2.88	0.00401	**
tunnel_indTRUE	-1.35e-01	7.51e-02	-1.79	0.07327	.
I(depth2m_med^2)	3.65e-03	2.24e-03	1.63	0.10364	
aadt_total_avg:lanes3	-1.58e-06	5.34e-06	-0.30	0.76714	
aadt_total_avg:lanes4	3.95e-05	1.15e-05	3.44	0.00058	***
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Dispersionsparameter $\theta=2,005$

Tabelle 13: Selektiertes Modell für sämtliche Unfälle auf Event Sections

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	-1.68e+00	2.14e-01	-7.86	3.8e-15	***
aadt_total_avg	9.38e-05	4.64e-06	20.22	< 2e-16	***
I(aadt_total_avg^2)	-6.52e-10	5.52e-11	-11.79	< 2e-16	***
friction_sd	4.18e+00	8.74e-01	4.78	1.7e-06	***
marker_emlane_rel	-2.14e-01	5.27e-02	-4.06	5.0e-05	***
s_med	-5.25e-02	1.45e-02	-3.62	0.00029	***
bendiness	2.52e+00	7.39e-01	3.41	0.00064	***
friction_med	-6.37e-01	2.43e-01	-2.62	0.00887	**
tunnel_indTRUE	2.79e-01	1.06e-01	2.62	0.00878	**
marker_junction_e_indTRUE	2.09e-01	4.86e-02	4.31	1.6e-05	***
marker_junction_b_indTRUE	2.03e-01	4.95e-02	4.11	4.0e-05	***
marker_stop_b_indTRUE	2.06e-01	7.18e-02	2.87	0.00408	**
marker_rest_e_indTRUE	2.18e-01	7.90e-02	2.75	0.00590	**
speed_cat100	-7.71e-02	5.44e-02	-1.42	0.15667	
speed_cat80	-2.19e-01	8.13e-02	-2.69	0.00714	**
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Dispersionsparameter $\theta=1,877$

Mithilfe dieser Koeffizienten lässt sich für jeden Abschnitt eine zu erwartende mittlere Unfallanzahl berechnen (im langfristigen Verlauf betrachtet). Einige Faktoren auf das Unfallgeschehen, wie z.B. lokale Wettereinflüsse, Ablenkung etc., sind in den beschriebenen Modellen nicht enthalten. Diese werden mit einer empirischen Bayes-Methode [13] berücksichtigt. Hierfür werden zwei Informationsquellen für den jeweils betrachteten Abschnitt entsprechend gewichtet, nämlich das Ergebnis des Unfallvorhersagemodells und die tatsächliche Unfallanzahl im Segment:

$$\hat{y}_i = w_i \hat{y}_i + (1 - w_i) y_i,$$

wobei der Gewichtungsfaktor w_i aus dem Dispersionsparameter der NB-Verteilung θ berechnet wird

$$w_i = \frac{1}{1 + \frac{\hat{y}_i}{\theta}}.$$

Das Abkommensrisiko eines bestimmten Abschnitts wird nun folgendermaßen bewertet: Für das betrachtete Segment wird das Verhältnis (relatives Risiko) zwischen dem berechneten Wert des Unfallvorhersagemodells $\hat{y}_i^{RORA}$ für die Abkommensunfälle (Run-Off-Road Accidents/RORA) und der Modellvorhersage für alle Unfälle $\hat{y}_i^{Total}$ berechnet

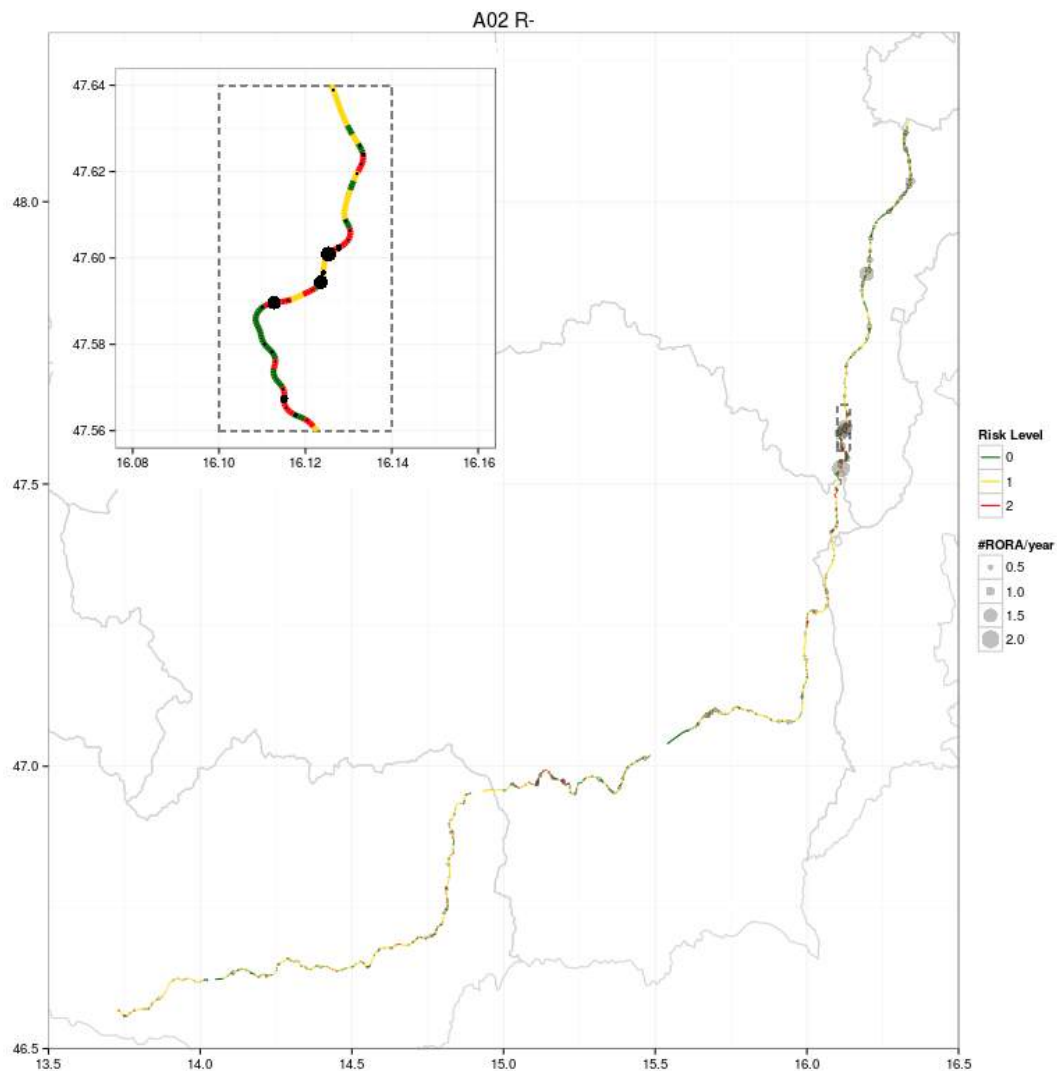
$$R_i = \frac{\hat{y}_i^{RORA}}{\hat{y}_i^{Total}},$$

Analog wird dieser Quotient auch für die gewichteten EB-Schätzungen bestimmt

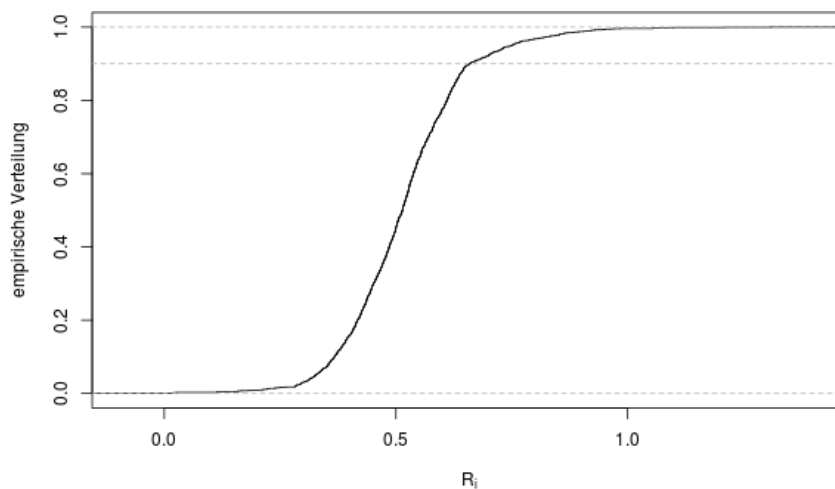
$$R_i^{EB} = \frac{\hat{y}_i^{RORA}}{\hat{y}_i^{Total}}.$$

Diese relativen Risiken werden nun gegenübergestellt. Ist der Wert $R_i > R_i^{EB}$, besteht kein unmittelbarer Handlungsbedarf. Segmente mit $R_i \leq R_i^{EB}$ können an Hand einer Häufigkeitsverteilung (z.B. durch bestimmte Quantile) in weitere Risikokategorien eingeteilt werden.

Diese Vorgehensweise ist in Abbildung 20 beispielhaft an Hand der A2 Südautobahn dargestellt. Abschnitte ohne Handlungsbedarf sind in grün dargestellt. Die restlichen Abschnitte sind in zwei Kategorien unterteilt – Abschnitte mit mittleren Risikolevel (gelb) bzw. hohen Risikolevel (rot). Als Schwellwert für die roten Abschnitte wurde das 0.9-Quantil (0,659) der Verteilung des relativen Risikos verwendet. Dies stellt einen plausiblen Wert dar, da die empirische Verteilung ungefähr in diesem Bereich einen leichten Knick aufweist (siehe Abbildung 21).



**Abbildung 20: Risikolevels für Abkommensunfälle entlang der A2 Südauto-
bahn (Richtung R-) und spezielle Betrachtung des Wechselabschnitts**



**Abbildung 21: Empirische Verteilung des relativen Risikos für Abschnitte
mit Handlungsbedarf auf der A2 Südauto-
bahn**

3.4 Anwendungsbeispiele

Im Folgenden wird die Abkommenswahrscheinlichkeit beispielhaft anhand einer Strecke bzw. eines Knoten auf der A2-Südautobahn berechnet.

3.4.1. Abkommensmodell für Streckenabschnitte

Ausgangsposition



Autobahn: **A2-Südautobahn**

Richtungsfahrbahn: **Graz**

Stationierung: **km 14,117 – km 14,367**

Länge: **250 m**

- Durchschn. Verkehrsstärke (**aadt_total_avg**): 64.242 Kfz/24h
- Schwerververkehrsanteil (**aadt_hgv_rel**): 13,97%
- Tempolimit (**speed_cat100/speed_cat80**): 130 km/h
- Anzahl der Fahrstreifen (**lanes3/lanes4**): 4
- Tunnelstrecke (**tunnel_ind**): nein
- Kurvigkeit (**bendiness**): 0,01265 Gon
- Median der Längsneigung (**s_med**): 0,3%
- Median der Querneigung (**q_med**): 3,2%
- Median der Griffigkeit (**friction_med**): 0,74
- Nulldurchgang (**q_zerocross**): Nein
- Median der Wasserfilmtiefe (**depth2m_med**): 2,0 mm
- Anteil Pannestreifen (**marker_emlane_rel**): 100%

- Rechenmodell: Strecke (**Non-Event Section**)

Schritt 1: Berechnung der (erwarteten) Abkommensunfälle

Tabelle 14: Ergebnis der Modellrechnung für Abkommensunfälle im Streckenabschnitt

Kovariablenname	Wert x_i	Modellkoeffizient β_i	Produkt $\beta_i x_i$
Intercept	1	-1,728	-1,728
aadt_total_avg	64.242	0,0000486	3,122
l(aadt_total_avg^2)	4.127.034.564	-0,000000000398	-1,6424
aadt_hgv_rel	13,97	0,0257	0,3590
speed_cat100	0	-0,219	0
speed_cat80	0	-1,280	0
lanes3	0	0,00998	0
lanes4	1	0,542	0,542
tunnel_ind	0	-0,326	0
bendiness	0,01265	7,71	0,098
s_med	0,30	-0,0769	-0,023
q_med	3,20	-0,0152	-0,049
friction_med	0,74	-1,22	-0,903
q_zerocross	0	0,322	0
depth2m_med	2,00	-0,0490	-0,098
marker_emlane_rel	1,00	0,273	0,273
		Summe	-0,049

Der lineare Prädiktor hat einen Wert von $\eta = -0,049$. Durch Anwendung der inversen Linkfunktion (d.h. der Responsefunktion) ergibt die Modellvorhersage einen Erwartungswert von $\hat{y}_i^{RORA} = \exp(-0,049) = 0,95$ Unfällen im betrachteten Zeitraum. Die beobachtete Anzahl an Target Accidents war $y_i^{RORA} = 1$. Aufgrund des Dispersionsparameters $\theta = 1,3$ der NB-Verteilung ergibt sich folgender Gewichtungsfaktor:

$$w_i^{RORA} = \frac{1}{1 + \frac{\hat{y}_i^{RORA}}{\theta}} = \frac{1}{1 + \frac{0,95}{1,3}} = 0,58$$

Die gewichtete EB-Schätzung für die Abkommensunfälle beträgt somit:

$$\tilde{y}_i^{RORA} = w_i \hat{y}_i + (1 - w_i) y_i = (0,58 \times 0,95) + [(1 - 0,58) \times 1] = 0,97 \text{ Abkommensunfälle}$$

Schritt 2: Berechnung der (erwarteten) Gesamtunfallanzahl

Tabelle 15: Ergebnis der Modellrechnung für alle Unfälle im Streckenabschnitt

Kovariablenname	Wert x_i	Modellkoeffizient β_i	Produkt $\beta_i x_i$
Intercept	1	1,542	-1,542
aadt_total_avg	64.242	0,000104	6,681
l(aadt_total_avg^2)	4.127.034.564	-0,00000000104	-4,292

aadt_hgv_rel	13,97	0,0144	0,201
lanes3	0	-0,0556	0
lanes 4	1	-1,484	-1,484
tunnel_ind	0	-0,135	0
bendiness	0,01265	3,28	0,0415
s_med	0,30	-0,0498	-0,015
friction_med	0,74	-0,862	-0,638
friction_sd	0,01784	2,35	0,0419
q_zerocross	0	0,182	0
depth2m_med	2,00	-0,076	-0,152
l(depth2m_med^2)	4,00	0,00365	0,0146
aadt_total_avg:lanes3	= (64.242 * 0)	-0,00000158	0
aadt_total_avg:lanes4	= (64.242 * 1)	0,0000395	2,538
lane_red_ind_red	0	0,475	0
lane_red_ind_exp	0	0,575	0
		Summe	1,395

Für dieses Modell ergibt sich für den linearen Prädiktor $\eta = 1,395$ und daher ein Erwartungswert von $\hat{y}_i^{Total} = \exp(1,395) = 4,03$ Unfällen im betrachteten Zeitraum. Die beobachtete Gesamtunfallanzahl beträgt $y_i^{Total} = 4$. Der Dispersionsparameter der NB-Verteilung ist in diesem Fall $\theta = 2,005$ und der Gewichtungsfaktor daher:

$$w_i^{Total} = \frac{1}{1 + \frac{\hat{y}_i^{Total}}{\theta}} = \frac{1}{1 + \frac{4,03}{2,005}} = 0,332$$

Beide Informationen kombiniert ergeben:

$$\tilde{y}_i^{Total} = w_i \hat{y}_i + (1 - w_i)y_i = (0,332 \times 4,03) + [(1 - 0,332) \times 4] = 4,01 \text{ Unfälle}$$

Schritt 3: Berechnung der (relativen) Abkommenswahrscheinlichkeit

Die relativen Risiken sind:

$$R_i = \frac{\hat{y}_i^{RORA}}{\hat{y}_i^{Total}} = \frac{0,95}{4,03} = 0,236$$

bzw.

$$R_i^{EB} = \frac{\tilde{y}_i^{RORA}}{\tilde{y}_i^{Total}} = \frac{0,97}{4,01} = 0,242$$

Schritt 4: Ergebnisinterpretation

Für dieses Segment gilt $R_i < R_i^{EB}$, da der Wert R_i^{EB} aber das 0.90-Quantil ($q_{0,90} = 0,659$) der relativen Risiken nicht überschreitet, besteht nur mittlerer Handlungsbedarf (Risikolevel 2).

3.4.2. Abkommensmodell für Knoten

Ausgangsposition



Autobahn: **A2-Südautobahn**

Richtungsfahrbahn: **Wien**

Stationierung: **km 8,968 – km 8,718**

Länge: **250 m**

- Durchschn. Verkehrsstärke (**aadt_total_avg**): 70.447 Kfz/24h
- Schwerververkehrsanteil (**aadt_hgv_rel**): 12,95%
- Tempolimit (**speed_cat100/speed_cat80**): 130 km/h
- Anzahl der Fahrstreifen (**lanes3/lanes4**): 4
- Tunnelstrecke (**tunnel_ind**): nein
- Kurvigkeit (**bendiness**): 0.01349 Gon
- Median der Längsneigung (**s_med**): 0,5%
- Median der Griffigkeit (**friction_med**): 0,66
- Nulldurchgang (**q_zerocross**): Nein
- Anteil Pannestreifen (**marker_emlane_rel**): 100%
- Rechenmodell: Knoten (**Event Section**)

Schritt 1: Berechnung der (erwarteten) Abkommensunfälle

Tabelle 16: Ergebnis der Modellrechnung für Abkommensunfälle im Knoten

Kovariablenname	Wert x_i	Modellkoeffizient β_i	Produkt $\beta_i x_i$
Intercept	1	-2,771	-2,771
aadt_total_avg	70.447	0,0000714	5,03
$l(aadt_total_avg^2)$	4.962.779.809	-0,000000000928	-4,605
aadt_hgv_rel	12,95	0,0163	0,211
speed_cat100	0	-0,241	0
speed_cat80	0	-1,38	0

lanes3	0	-0,417	0
lanes4	1	-1,80	-1,80
bendiness	0,01349	9,68	0,131
s_med	0,5	-0,0847	-0,042
friction_sd	0,03683	3,36	0,124
q_zerocross	0	0,197	0
marker_emlane_rel	1,00	-0,169	-0,169
aadt_total_avg:lanes3	=(70.447*0)	0,0000226	0
aadt_total_avg:lanes4	=(70.447*1)	0,0000579	4,079
lane_red_indepx	0	-0,835	0
lane_red_indred	0	-0,712	0
marker_stop_b_ind	0	0,269	0
marker_stop_e_ind	0	-0,170	0
marker_junction_b_ind	0	0,136	0
		Summe	0,188

Schritt 2: Berechnung der (erwarteten) Gesamtunfallanzahl

Tabelle 17: Ergebnis der Modellrechnung für alle Unfälle im Knoten

Kovariablenname	Wert x_i	Modellkoeffizient β_i	Produkt $\beta_i x_i$
Intercept	1	-1,685	-1,685
aadt_total_avg	70.447	0,0000938	6,608
l(aadt_total_avg^2)	4.962.779.809	-0,000000000652	-3,236
speed_cat100	0	-0,0771	0
speed_cat80	0	-0,219	0
bendiness	0,01349	2,52	0,034
s_med	0,5	-0,0525	-0,026
friction_med	0,66	-0,637	-0,420
friction_sd	0,03683	4,18	0,154
tunnel_ind	0	0,279	0
marker_emlane_rel	1,00	-0,214	-0,214
marker_stop_b_ind	0	0,206	0
marker_rest_e_ind	0	0,218	0
marker_junction_b_ind	0	0,203	0
marker_junction_e_ind	1	0,209	0,209
		Summe	1,424

Analog zum vorhergehenden Beispiel ergibt sich mit $y_i^{RORA} = 1$ und $\theta = 1,481$ für die Unfälle aus der TAG

$$\hat{y}_i^{RORA} = \exp(0,188) = 1.21$$

$$w_i^{RORA} = \frac{1}{1 + \frac{\hat{y}_i^{RORA}}{\theta}} = \frac{1}{1 + \frac{1,21}{1,481}} = 0.55$$

$$\tilde{y}_i^{RORA} = w_i \hat{y}_i + (1 - w_i) y_i = (0,55 * 1,21) + [(1 - 0,55) * 1] = 1,12 \text{ Abkommensunfälle}$$

bzw. für alle Unfälle erhält man mit:

$$y_i^{Total} = 4, \text{ und } \theta = 1.877 \text{ die Schätzer}$$

$$\hat{y}_i^{Total} = \exp(1.424) = 4,15$$

$$w_i^{Total} = \frac{1}{1 + \frac{\hat{y}_i^{Total}}{\theta}} = \frac{1}{1 + \frac{4,15}{1,877}} = 0,311$$

$$\tilde{y}_i^{Total} = w_i \hat{y}_i + (1 - w_i)y_i = (0,311 * 4,15) + [(1 - 0,311) * 4] = 4,05 \text{ Unfälle}$$

Schritt 3: Berechnung der (relativen) Abkommenswahrscheinlichkeit

Die relativen Risiken berechnen sich aus:

$$R_i = \frac{\hat{y}_i^{RORA}}{\hat{y}_i^{Total}} = \frac{1,21}{4,15} = 0.292$$

und

$$R_i^{EB} = \frac{\tilde{y}_i^{RORA}}{\tilde{y}_i^{Total}} = \frac{1,12}{4,05} = 0,277$$

Schritt 4: Ergebnisinterpretation

Wegen $R_i > R_i^{EB}$ besteht für diesen Abschnitt kein unmittelbarer Handlungsbedarf.

4 RISIKOBEWERTUNG VON ANPRALLOBJEKTEN

In diesem Kapitel wird die Finite Elemente (FE) Simulation ausgewählter Anprallobjekte (ortsfester Hindernisse) beschrieben. Im Anschluss erfolgen eine Definition der entsprechenden Lastmatrix sowie die Beschreibung der verwendeten Simulationsmodelle.

4.1 Risikobewertung von Anprallobjekten

Verletzungsschweren werden in der Unfallforschung nach dem AIS (Abbreviated Injury Score) klassifiziert mit dem Ziel, Verletzungen mit annähernd gleicher Letalität zusammenzufassen. Man unterscheidet sechs verschiedene Verletzungsklassen, wobei Verletzungen, welche nicht hinreichend diagnostiziert werden können mit „unbekannt“ eingestuft werden und Verletzungen mit der Ausprägung „null“ als unverletzt gelten (siehe Tabelle 18). Aus den AIS-Einzelverletzungen werden zwecks Bestimmung der höchsten Schweregrade maximale AIS (MAIS) nach Körperregionen gebildet bzw. auf den gesamten Körper angewandt.

Tabelle 18: Verletzungsschwere nach AIS

AIS Verletzungsschwere	Beschreibung	Beispiele
0	Nicht verletzt	
1	Leicht verletzt	Schürfung, Nasenbeinfraktur, Muskelkontusion
2	Ernsthaft verletzt	Schädelbasisfraktur; Oberkieferfraktur, 2-3 Rippenfrakturen, Fraktur Mittelfuß, Beckenfraktur
3	Schwer verletzt	2-3 Rippenfrakturen mit Hämato- oder Pneumothorax, Milz-Ruptur, Femurfraktur
4	Sehr schwer verletzt	Beidseitige Lungen-Laceration, Nieren/Leber Ruptur
5	Kritisch verletzt	Großes epidurales oder subdurales Hämatom, vollständige Zerstörung von Organen
6	Maximal verletzt	Massive Destruktion von Hirnschädel und Gehirn, Aorten-Laceration, Abriss Leber
9	Unbekannt verletzt	

Quelle: AIS Codebook 2005, Update 2008 [32]

Mit zunehmender Verletzungsschwere steigt auch die Wahrscheinlichkeit, eine letale Verletzung zu erleiden. Abbildung 22 zeigt die Letalitätswahrscheinlichkeit von Einzelverletzungen. Eine Verletzungsschwere von sechs (AIS 6) führt nach Auswertungen der National Trauma Data Base (NTDB) mit einer Wahrscheinlichkeit von 79% zum Tod [32]. Auswertungen von Realunfalldatenbanken haben gezeigt, dass ein MAIS von sechs im Normalfall nicht überlebbar ist.

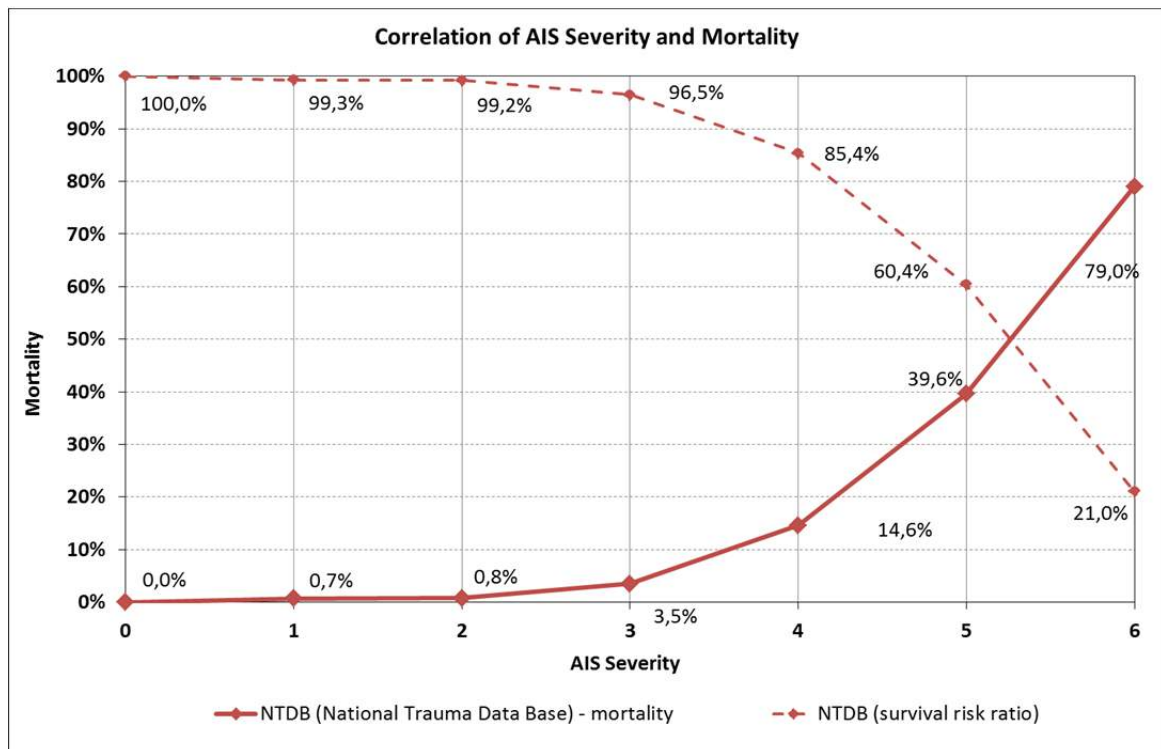


Abbildung 22: Zusammenhang zwischen AIS-Einzelverletzungsschwere und Überlebenswahrscheinlichkeit

Für die Bewertung des Verletzungsrisikos von Verkehrsunfällen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Es können z.B. die in der Fahrzeugindustrie üblichen Kriterien wie beispielsweise der HIC (Head Injury Criterion) oder die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung (delta-v) zur Bestimmung der Verletzungsschwere herangezogen werden. Hierfür sind jedoch Zusammenhänge zwischen dem realen Verletzungsschweregrad AIS und dem Verletzungskriterium HIC zu berücksichtigen (siehe Abbildung 23).

In der Fahrzeugindustrie wird ein HIC-Grenzwert von 1.000 als kritisch erachtet. Dieser Wert entspricht einer Wahrscheinlichkeit von 50% eine AIS 3 Verletzung zu erleiden. Die Verletzungsrisikokurven der Abbildung 23 gelten jedoch nur für Beschleunigungen, welche Verletzungen hervorrufen, ohne dass es zu einem Kontakt des Insassen (des Kopfes) mit der Fahrzeugstruktur bzw. dem Fahrzeuginnenraum kommt. Sollte es zu einem Kontakt mit Fahrzeugteilen durch Intrusionen in die Fahrgastzelle oder Insassenbewegungen kommen, können weitere Verletzungen nicht ausgeschlossen werden.

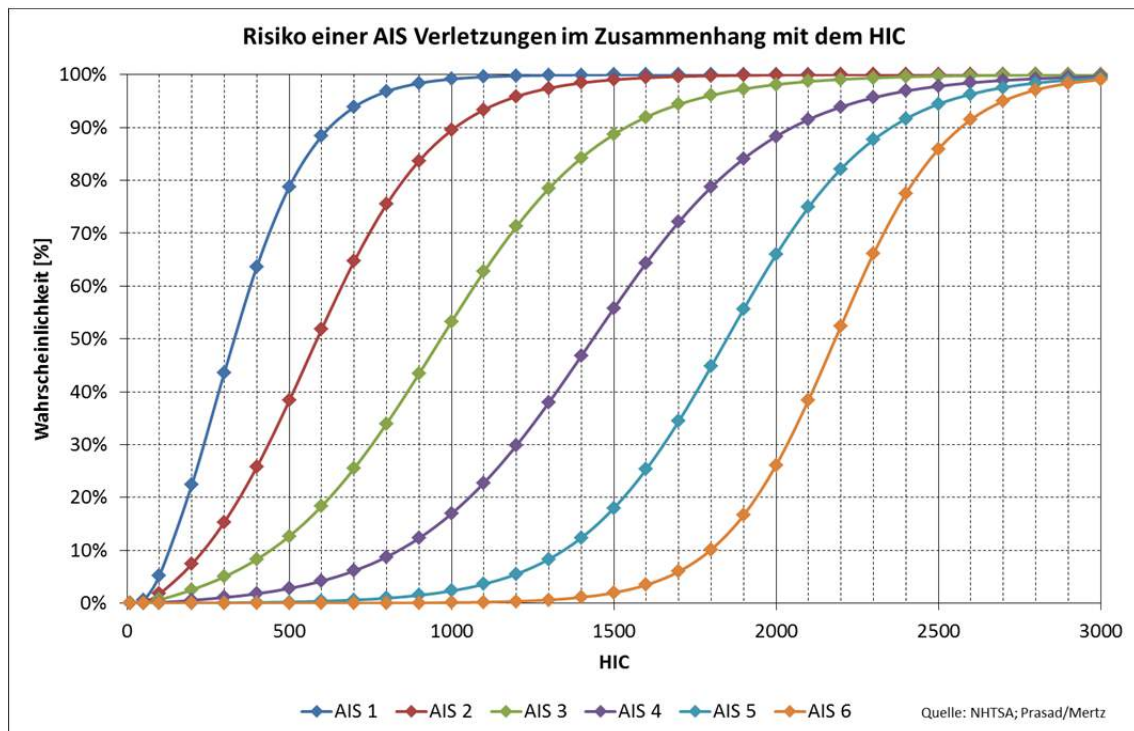


Abbildung 23: Risikofunktionen für unterschiedliche Verletzungsschweren nach [34]

Bei der Beurteilung von Kollisionen mit Fahrzeugsrückhaltesystemen entsprechend der EN 1317 [22] bzw. EN 12767 (Passive Sicherheit von Tragkonstruktion für die Straßenausstattung) [23] werden verschiedene Indizes wie der ASI (Acceleration Severity Index) oder der THIV (Theoretical Head Impact Velocity) als Beurteilungsmaß verwendet. Der Anpralltest erfolgt hierbei mit einem Dummy (ATD Antropometric Test Device), ohne jedoch Dummywerte wie z.B. Beschleunigungen mitzumessen. Der THIV wird aus den Beschleunigungssignalen am Fahrzeug auf die Insassen rückgerechnet.

Um valide Aussagen hinsichtlich eines vermuteten Zusammenhanges zwischen ASI und HIC tätigen zu können, wurden Anpralltests an Fahrzeugsrückhaltesystemen durchgeführt [24], [33]. Damit der HIC einem entsprechenden ASI-Wert zugeordnet werden kann, wurden am Dummy Beschleunigungen mitgemessen. So konnten für jeden Crashtest ASI und HIC in Relation zueinander gebracht werden. Aus der Untersuchung geht hervor, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen ASI und HIC besteht, welcher mithilfe einer Funktion approximiert werden kann (siehe Abbildung 24). Dadurch können verschiedenen ASI-Werten Verletzungsschweren mit einer entsprechenden Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden.

Bei einem HIC von 1.000 und einem ASI von 2,0 tritt mit 50%-iger Wahrscheinlichkeit eine AIS 3 Verletzung auf. AIS 4 Verletzung haben gemäß Abbildung 23 eine Eintrittswahr-

scheinlichkeit von 17%, bei AIS 5 liegt die Wahrscheinlichkeit bei lediglich 2,3%. ASI-Werte von 2,0 führen mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% zu AIS 2 Verletzungen.

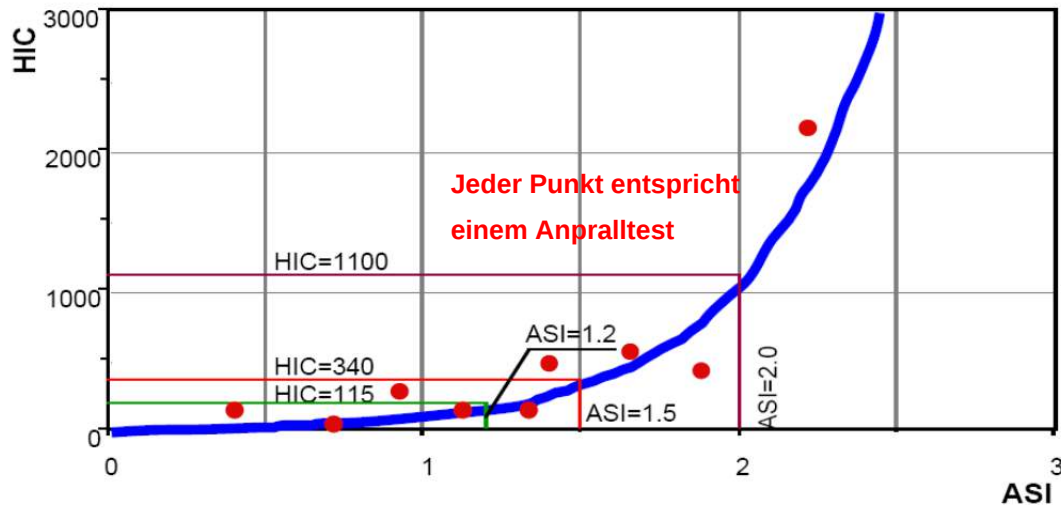


Abbildung 24: Zusammenhang zwischen ASI und HIC ([24],[33])

Im EU Projekt RISER [9] wurde mittels Anpralltests und Simulationen verschiedener Fahrzeugrückhaltesystemen mögliche Zusammenhänge zwischen ASI und Geschwindigkeit bzw. ASI und HIC untersucht. Wie man Abbildung 25 (linkes Bild) entnehmen kann, besteht zwischen Geschwindigkeit und ASI eine positive Korrelation. Bei einer Anprallgeschwindigkeit von z.B. 25 m/s (90 km/h) ist ein ASI-Wert von 1,4 zu erwarten. Ein ASI von 2,0 entspricht bei [24] einem HIC von 1.000. und bei [25] einem Wert von ca. 850.

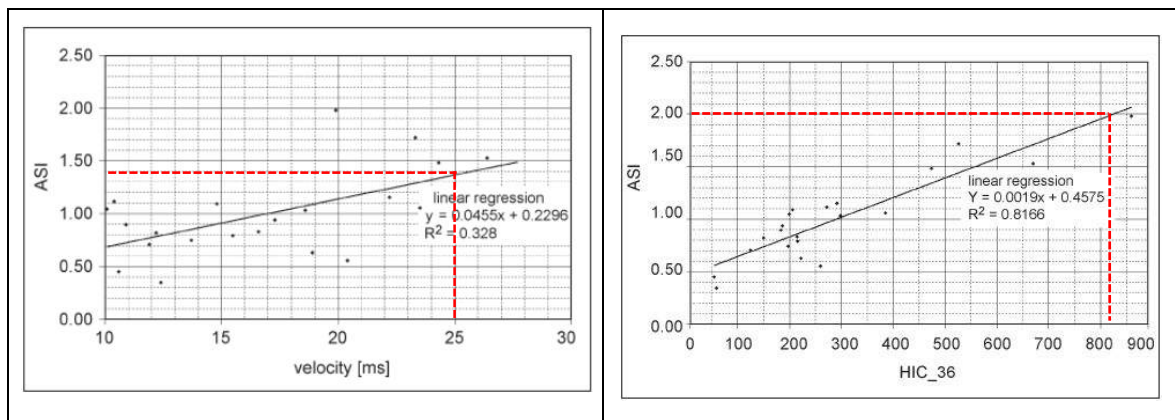


Abbildung 25: Zusammenhang zwischen ASI und Geschwindigkeit bzw. HIC [25]

STURT und FELL [38] haben der Einfluss des ASI auf das Verletzungsrisiko bei Kollision mit unterschiedlichen Fahrzeugrückhaltesystemen simuliert. Zwecks Validierung der Ergebnisse wurden drei Anprallversuche mit Anprallgeschwindigkeiten zwischen 109 km/h und 113 km/h und Anprallwinkeln von 15°-20° durchgeführt. Anschließend wurde mittels

Parameterstudie der ASI und THIV Zum Zeitpunkt des Anpralls bestimmt. Entsprechend der Simulationsergebnisse konnte eine Zunahme der Verletzungswahrscheinlichkeit mit steigendem ASI bzw. THIV festgestellt werden. Die breite Ergebnisstreuung weist allerdings auf andere (Einfluss-)Faktoren hin, welche schwere Verletzungen hervorrufen können. Ein deutlich höheres Risiko von Nacken- und Kopfverletzungen bei niedrigen Unfallschweren als bei anderen Körperregionen konnte herausgefunden werden.

Abbildung 26 beschreibt den Zusammenhang zwischen HIC und ASI. Im Diagramm sind sowohl Ergebnisse von Anpralltests als auch von Simulationen abgebildet. Die Grenzen für Freiwillige und PMHS (Post Mortem Human Surrogates) sind durch gestrichelte Linien gekennzeichnet. Das „acceptable Limit“ wurde mit einem HIC von 650 festgelegt, welches beim Euro NCAP Frontalcrash als Grenzwert gilt, sofern die höchste Punktezahl erreicht werden soll.

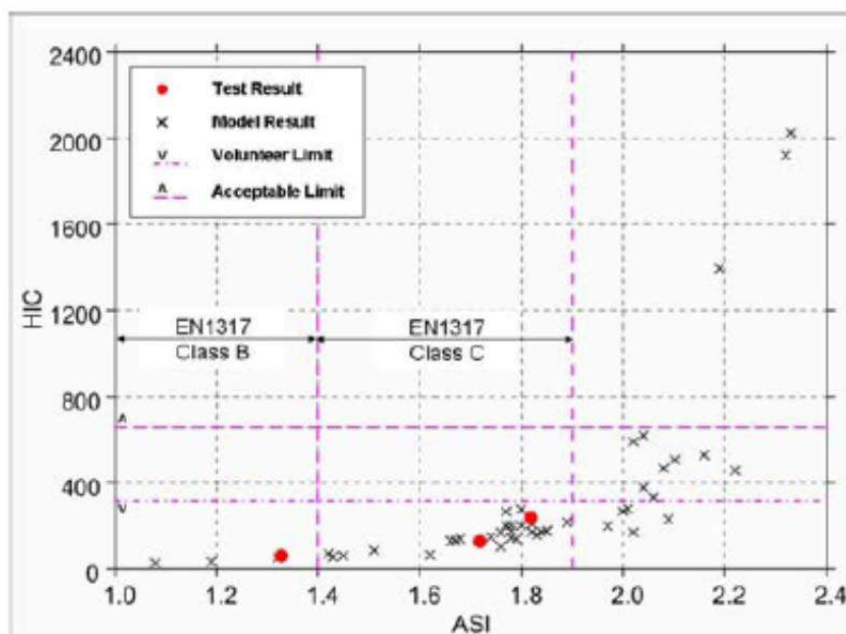


Abbildung 26: Zusammenhang zwischen HIC und ASI [38]

STURT und FELL konnten in ihrer Studie einen Zusammenhang zwischen Kopf- und Thoraxverletzungen und dem ASI herstellen. Für die Autoren ist demnach ein ASI-Wert von 2,0 akzeptabel, wobei allerdings auch der THIV zu berücksichtigen ist, welcher unter 35 km/h liegen muss. Für den Nacken als Körperteil mit einem erhöhten Verletzungsrisiko ist ein ASI bis 1,5 und ein THIV unter 30 km/h akzeptabel. Absolut inakzeptabel sind hingegen ASI-Werte über 2,0 und THIV über 38 km/h. Die Grenzwerte der EN1317 werden als ausreichend eingestuft, unter der Voraussetzung das keine weiteren Risikofaktoren vorliegen, welche Verletzungen verursachen könnten.

GABAUER und GABLER [39] haben in einer Untersuchung bez. des Zusammenhangs von Verletzungsschwere und ASI Crashtests mit Fahrzeugen durchgeführt, welche einen EDR (Event Data Recorder) eingebaut hatten. Es wurden hierfür insgesamt 180 Fälle analysiert. Auf Basis der Stichprobe wurden Risikofunktionen für Verletzungen mit unterschiedlichem Schweregrad und unterschiedlichen ASI bzw. THIV-Werten erstellt (siehe Abbildung 27, THIV entspricht der Bezeichnung OIV im Diagramm). Verletzungen mit einer Schwere von MAIS 3+ treten bei einem ASI von 2,0 mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 70% auf (linkes oberes Bild in Abbildung 27). Hingegen reduziert sich die Verletzungswahrscheinlichkeit auf etwa 15%, wenn von einem ASI = 1,0 ausgegangen wird. Ein ASI-Wert von 1,4 hätte demnach eine 45%-Wahrscheinlichkeit, einer MAIS 3+ Verletzung davonzutragen

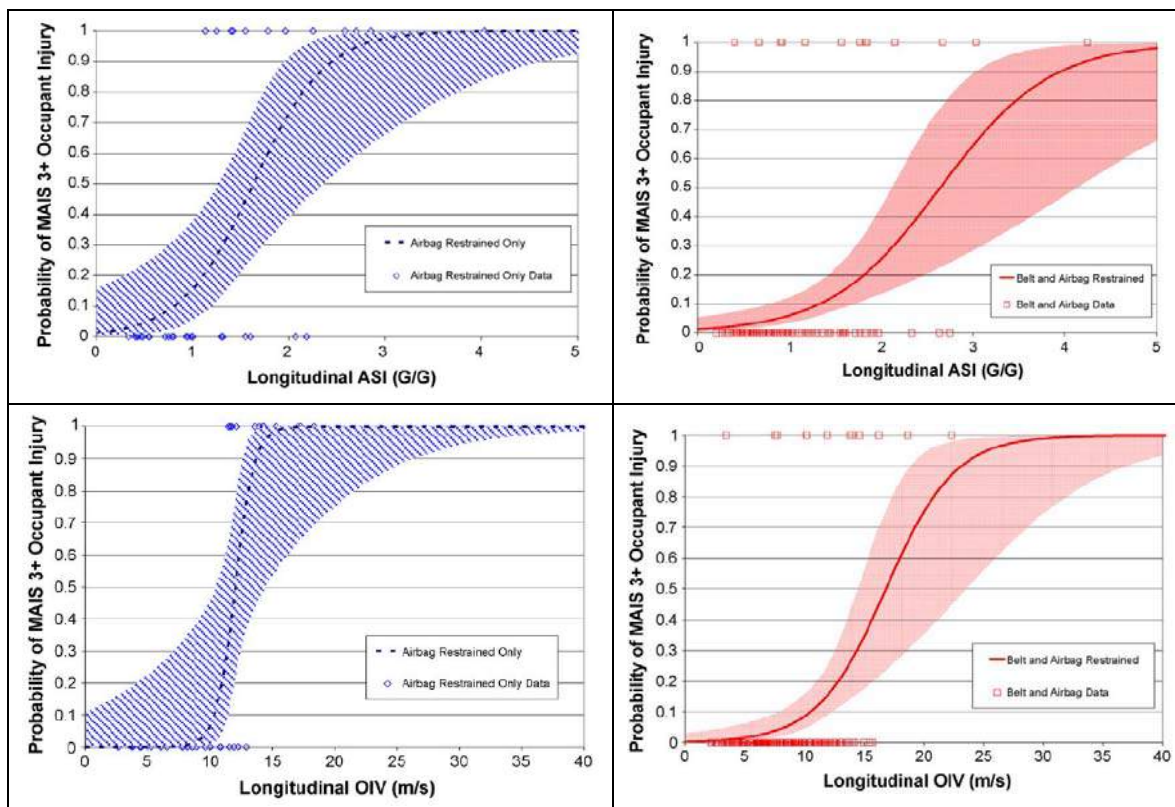


Abbildung 27: Risikofunktionen schwere Verletzungen von MAIS 3+ zu erleiden in Zusammenhang mit dem ASI und THIV

GABAUER und GALBER kommen zu dem Schluss, dass ASI und THIV gut zum Schätzen von Verletzungen geeignet sind. Allerdings wird nicht angeschnallten Insassen eine bessere Vorhersagekraft bescheinigt. Eine Einschränkung für diese Studie war auch die Verfügbarkeit von Fahrzeugen mit EDR, wobei nur Fälle mit Fahrzeugen vom Hersteller GM analysiert werden konnten.

Die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen ASI und Verletzungswahrscheinlichkeiten sind bis jetzt nur durch wenige Studien untersucht. Bei SHOOJATI [24] und KLOOTWIJK et al. [25] wurden positive Korrelationen zwischen HIC und ASI festgestellt. GABAUER und GALBER [39] sowie STURT und FELL [38] stellen ebenfalls eine positive Korrelation zwischen HIC und Verletzungswahrscheinlichkeit fest. Allerdings hat nur GABAUER und GABLER dies direkt mit einem Verletzungswert, nämlich dem MAIS korreliert. Es sollte allerdings auch darauf hingewiesen werden, dass der ASI und THIV speziell für schräge Anprallsituationen entwickelt wurden.

Die Zusammenhänge zwischen ASI/THIV und HIC, sowie weiterer in der Fahrzeugsicherheit üblichen Verletzungskriterien, sollte weiter untersucht werden, um Verletzungswahrscheinlichkeiten über den ASI bzw. THIV besser vorhersagen zu können.

4.2 Definition der Lastenmatrix zur Simulation ortsfester Hindernisse

Für die Untersuchung der Verletzungsschwere unterschiedlicher ortsfester Hindernisse, wie beispielsweise Verkehrszeichen, Lichtmasten, Bäume etc. wurde eine sogenannte Lastmatrix erstellt. In dieser werden (Rahmen-)Bedingungen wie Anprallgeschwindigkeiten, Anprallwinkel etc. definiert, unter denen ein Fahrzeug gegen ein Objekt prallt. In einem ersten Schritt erfolgt eine Analyse der normativen Anforderungen.

4.2.1. Normative Anforderungen nach EN 1317

Die in Europa und Österreich gültige Norm zur Bewertung von Fahrzeugrückhaltesystemen (FRS) ist die EN 1317. Diese Norm besteht aus mehreren Teilen und wird unter dem Haupttitel „Rückhaltesysteme an Straßen“ geführt:

- Teil 1: Terminologie und allgemeine Kriterien für Prüfverfahren.
- Teil 2: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Schutzeinrichtungen.
- Teil 3: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Anpralldämpfer.
- Teil 4: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Anfangs-, End- und Übergangskonstruktionen von Schutzeinrichtungen (in Bearbeitung; dieses Dokument ersetzt die ENV 1317-4:2001 hinsichtlich der Abschnitte zu Übergangskonstruktionen).
- Teil 5: Anforderungen an die Produkte, Konformitätsverfahren und -bescheinigung für Fahrzeugrückhaltesysteme.

- Teil 6: Fußgängerrückhaltesysteme, Brückengeländer (in Bearbeitung).
- Teil 7: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Anfangs- und Endkonstruktionen von Schutzeinrichtungen (in Bearbeitung; dieses Dokument ersetzt die ENV 1317-4:2001 hinsichtlich der Abschnitte zu Anfangs- und Endkonstruktionen).
- Teil 8: Rückhaltesysteme für Motorräder, die die Anprallheftigkeit an Schutzplanen reduzieren (in Bearbeitung).

Die Anhänge A und B sind informativ. Teil 1 der EN 1317 beinhaltet v.a. Begriffsdefinitionen und Berechnungsvorschriften. Es werden allgemeine Festlegungen für die Fahrzeuge und die Instrumentierung beschrieben, u.a. auch Berechnungsverfahren für die Anprallheftigkeit, dargestellt durch die zwei Kennwerte ASI und THIV.

- ASI: Acceleration Severity Index (Index für die Schwere der Beschleunigung), Einheit: [-]
- THIV: Theoretical Head Impact Velocity (Theoretische Anprallgeschwindigkeit des Kopfes), Einheit: [km/h] bzw. [m/s]

Im zweiten Teil der Norm sind die allgemeinen Leistungsklassen und Kriterien für Schutzeinrichtungen definiert. Diese werden nach verschiedenen Leistungsstufen für die drei wesentlichen Kriterien des Zurückhaltens eines Fahrzeuges angegeben: Aufhaltestufe, Anprallheftigkeit und Verformung.

Für die Beurteilung der Aufhaltestufe einer Schutzeinrichtung müssen die in Tabelle 19 angegebenen Abnahmeprüfungen erfüllt sein.

Tabelle 19: Prüfparameter und Aufhaltestufen für Schutzeinrichtungen

Aufhaltestufe	Parameter			
	Verhalten Schutzeinrichtung für Fahrzeuge oder Fahrzeugverhalten	Anprallheftigkeit ASI-THIV	Fahrzeugverformung-VCDI	Verformung Schutzeinrichtung für Fahrzeuge
T1	TB 21	TB 21	TB 21	TB 21
T2	TB 22	TB 22	TB 22	TB 22
T3	TB 41 + TB 21	TB 21	TB 21	TB 41 + TB 21
N1	TB 31	TB 31	TB 31	TB 31
N2	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11
H1	TB 42 + TB 11	TB 11	TB 11	TB 42 + TB 11
H2	TB 51 + TB 11	TB 11	TB 11	TB 51 + TB 11
H3	TB 61 + TB 11	TB 11	TB 11	TB 61 + TB 11

Aufhalte- stufe	Parameter			
	Verhalten Schutz- einrichtung für Fahr- zeuge oder Fahrzeug- verhalten	Anprallheftig- keit ASI-THIV	Fahrzeugver- formung-VCDI	Verformung Schutz- einrichtung für Fahrzeuge
H4a	TB 71 + TB 11	TB 11	TB 11	TB 71 + TB 11
H4b	TB 81 + TB 11	TB 11	TB 11	TB 81 + TB 11
L1	TB 42 + TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 42 + TB 32 + TB 11
L2	TB 51 + TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 51 + TB 32 + TB 11
L3	TB 61 + TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 61 + TB 32 + TB 11
L4a	TB 71 + TB32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 71 + TB32 + TB 11
L4b	TB 81 + TB32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 81 + TB32 + TB 11

Quelle: ÖNORM EN 1317 [22]

In Tabelle 20 sind Anprallgeschwindigkeiten und -winkel sowie Fahrzeugmassen dargestellt. Anschließend wird die Anprallheftigkeitsstufe nach den in Tabelle 21 festgelegten Kennwerten bewertet.

Tabelle 20: Kriterien für die Anprallprüfungen

Prüfung	Anprall- geschwindigkeit	Anprallwinkel	Gesamtmasse des Fahrzeugs	Fahrzeugart
	[km/h]	[Grad]	[kg]	
TB 11	100	20	900	Personenkraftwagen
TB 21	80	8	1.300	Personenkraftwagen
TB 22	80	15	1.300	Personenkraftwagen
TB 31	80	20	1.500	Personenkraftwagen
TB 32	110	20	1.500	Personenkraftwagen
TB 41	70	8	10.000	Lastkraftwagen
TB 42	70	15	10.000	Lastkraftwagen
TB 51	70	20	13.000	Bus
TB 61	80	20	16.000	Lastkraftwagen
TB 71	65	20	30.000	Lastkraftwagen
TB 81	65	20	38.000	Sattelzug

Quelle: ÖNORM EN 1317 [22]

Tabelle 21: Anprallheftigkeitsstufen

Anprallheftigkeitsstufe	Kennwerte		
A	ASI $\leq$ 1,0	und	THIV $\leq$ 33 km/h
B	1,0 $\leq$ ASI $\leq$ 1,4		
C	1,4 $\leq$ ASI $\leq$ 1,9		

Quelle: ÖNORM EN 1317 [22]

4.2.1.1 Abnahmekriterien für Anprallprüfungen

Schutzeinrichtungen einschließlich Brüstungen müssen den Anforderungen bez. Anprallheftigkeit, Verformung des Rückhaltesystems, Verhalten der Schutzeinrichtung sowie Verformung des Prüffahrzeugs genügen. Die Verformung des Prüffahrzeugs ist kein eigenes Abnahmekriterium, muss aber in einem Prüfbericht enthalten sein.

a) Verhalten der Schutzeinrichtung

Die Schutzeinrichtung muss das Fahrzeug ohne vollständigen Bruch der Hauptlängselemente des Systems aufhalten und zurückleiten. Teile mit einer Masse von mehr als 2 kg, welche sich vollständig gelöst haben, müssen identifiziert, lokalisiert und unter Angabe der Größe aufgezeichnet werden. Schutzeinrichtungsteile dürfen nicht in den Fahrzeuginnenraum eindringen. Verformungen von Schutzeinrichtungsteilen oder deren Eindringen in den Fahrzeuginnenraum, die ernsthafte Verletzungen hervorrufen können, sind nicht zulässig. Verankerungen im Boden und Befestigung müssen sich gemäß der Bemessung des Schutzeinrichtungssystems verhalten.

b) Verhalten des Prüffahrzeuges

Es darf nicht mehr als ein Rad des Fahrzeuges – während oder nach dem Anprall – die Schutzeinrichtung vollständig über- oder unterqueren. Ein Überschlagen oder auf die Seite kippen des Fahrzeugs ist ebenfalls nicht zulässig. Bei Prüfungen mit LKW oder Bussen dürfen sich vom Fahrzeug bis zum Verlassen des Abprallbereichs nicht mehr als 5% des Ballasts lösen bzw. auslaufen oder verschüttet werden.

c) Heftigkeitsindex

Das Kriterium der Anprallheftigkeit wird mittels der bereits erwähnten Kennwerte ASI und THIV beurteilt. Wesentlich ist hierbei, dass das kleinste und somit auch leichteste Fahrzeug die Anprallheftigkeit der jeweiligen Aufhaltestufe definiert. Fahrzeugrückhaltesysteme mit höherem Rückhaltevermögen sind in den Aufhaltestufen „H“ zusammengefasst. Das relevante Fahrzeug für die Anprallheftigkeit der Aufhaltestufen „H“ ist der TB 11.

d) Verformung des Prüffahrzeuges

Die Verformung des Innenraums wird nach dem in der EN1317-1 definierten Index VCDI (Vehicle Cockpit Deformation Index) bei allen Prüfungen mit Pkw bewertet.

e) Verformung der Schutzeinrichtung

Es werden die gemessenen und normalisierten Werte für die dynamische Durchbiegung und der Wirkungsbereich bestimmt und im Prüfbericht festgehalten. Bei LKW und Bussen muss die Fahrzeugeindringung im Prüfbericht angegeben werden.

4.2.2. Normative Anforderungen nach EN 12767

Bei Kollisionen von Fahrzeugen mit Tragkonstruktionen der Straßenausstattung ist die Insassensicherheit einerseits vom Fahrzeug selbst, andererseits aber auch vom Verhalten der Tragkonstruktion abhängig. Unter Berücksichtigung von Sicherheitsüberlegungen, sollen Tragkonstruktionen so konstruiert sein, dass sie sich beim Anprall eines Fahrzeugs lösen oder nachgeben.

Die Norm EN 12767 stellt die wesentliche Grundlage für die Prüfung des Anpralls von Fahrzeugen an Elemente der Straßenausstattung dar und legt drei Kategorien für die passive Sicherheit von Tragkonstruktionen fest:

- hoch energieabsorbierend (HE)
- niedrig energieabsorbierend (LE)
- nicht energieabsorbierend (NE)

Die EN 12767 definiert vier Stufen der Insassensicherheit. Für die Stufen 1-3 sind folgende zwei Prüfungen erforderlich:

- ein Versuch bei 35 km/h, um festzustellen, ob sich die Tragkonstruktion bei einem Anprall bei niedriger Geschwindigkeit planmäßig verhält, sowie
- ein weiterer Versuch bei der Anprallgeschwindigkeit 50 km/h, 70 km/h und 100 km/h.

Tragkonstruktionen der vierten Stufe gelten als sicher und der Testnachweis erfolgt daher aufgrund eines vereinfachten Prüfverfahrens.

4.2.2.1 Anforderungen an den Prüfgegenstand

Die grundlegenden Anforderungen an Prüfgegenstände lassen sich durch allgemeine Anforderungen (vorherbestimmtes Verhalten des Gegenstandes, Gefährdung von Fahrzeuginsassen und anderen Verkehrsteilnehmern) sowie zusätzliche Anforderungen für einseitig auskragende Kollisionsobjekte zusammenfassen. So muss sich der Prüfgegenstand nach der vom Hersteller vorherbestimmten Weise verhalten und es dürfen weder der Prüfgegenstand selbst noch von diesem abgelöste Teile, Fragmente oder andere Trümmer in den Innenraum des Fahrzeuges eindringen. Bei der Kollision darf die Windschutzscheibe zwar brechen, jedoch nicht durchdrungen werden. Bleibende Verformungen von einseitig auskragenden Gegenständen müssen den Anforderungen der Norm EN 12767 (Kapitel 5.3) entsprechen.

Durch energieabsorbierende Tragkonstruktionen wird das Fahrzeug erheblich verlangsamt, wobei nicht energieabsorbierende Tragkonstruktionen ein Weiterfahren des Fahrzeugs mit geringerer Geschwindigkeit nach dem Anprall ermöglichen. Dabei stellen nicht energieabsorbierende Tragkonstruktionen ein geringeres Verletzungsrisiko dar als energieabsorbierende Tragkonstruktionen. Die Leistungsart von Prüfobjekten ergibt sich als Kombination der Geschwindigkeitsklasse (siehe Tabelle 22), Energieabsorptionsklasse (siehe Tabelle 23) und Insassensicherheitsstufe (siehe Tabelle 24). Hierbei müssen die Grenzwerte der nachstehenden Tabellen eingehalten werden.

Tabelle 22: Geschwindigkeitsklasse

Geschwindigkeitsklasse [km/h]	Anprallgeschwindigkeit [km/h]
50	35 und 50
70	35 und 70
100	35 und 100

Quelle: ÖNORM EN 12767 [23]

Tabelle 23: Energieabsorptionskategorie

Anprallgeschwindigkeit v_i [km/h]	50	70	100
Energieabsorptionskategorie	Abprallgeschwindigkeit v_e [km/h]		
HE	$v_e = 0$	$0 \leq v_e \leq 5$	$0 \leq v_e \leq 50$
LE	$0 < v_e \leq 5$	$5 < v_e \leq 30$	$50 < v_e \leq 70$
NE	$5 < v_e \leq 50$	$30 < v_e \leq 70$	$70 < v_e \leq 100$

Quelle: ÖNORM EN 12767 [23]

Tabelle 24: Insassensicherheit

Energieabsorptionskategorie	Insassensicherheitsstufe	Geschwindigkeit			
		Obligatorische Anprallprüfung bei niedriger Geschwindigkeit 35 km/h		Anprallprüfungen für verschiedene Geschwindigkeitsklassen 50 km/h, 70 km/h und 100 km/h	
		Höchstwerte		Höchstwerte	
		ASI	THIV [km/h]	ASI	THIV [km/h]
HE	1	1,0	27	1,4	44
HE	2	1,0	27	1,2	33
HE	3	1,0	27	1,0	27
LE	1	1,0	27	1,4	44
LE	2	1,0	27	1,2	33

Energie- absorptions- kategorie	Insassen- sicherheits- stufe	Geschwindigkeit			
		Obligatorische Anprall- prüfung bei niedriger Ge- schwindigkeit 35 km/h		Anprallprüfungen für verschiedene Geschwindigkeitsklassen 50 km/h, 70 km/h und 100 km/h	
		Höchstwerte		Höchstwerte	
		ASI	THIV [km/h]	ASI	THIV [km/h]
LE	3	1,0	27	1,0	27
NE	1	1,0	27	1,2	33
NE	2	1,0	27	1,0	27
NE	3	0,6	11	0,6	11
NE	4	Keine Anforde- rungen	Keine Anforde- rungen	Siehe Normkapitel 5.6	

Quelle: ÖNORM EN 12767 [23]

4.2.2.2 Versuchsfahrzeug

Für die Anprallprüfung muss ein Versuchsfahrzeug gewählt werden, welches einem marktüblichen Personenkraftwagen entspricht und folgende Kriterien erfüllt:

- Prüfmasse: 825 ± 40 kg.
- ein Dummy mit einer Masse von $78 \text{ kg} \pm 5 \text{ kg}$. Die statische Bruttomasse muss $900 \text{ kg} \pm 40 \text{ kg}$ betragen.
- die Versuchsfahrzeuge müssen Modelle aus aktuellen Produktionen sein, die für den gegenwärtigen Verkehr in Europa repräsentativ sind.

4.2.3. Ermittlung der Lastmatrix für die FE Simulation

Für die Bewertung des Verletzungsrisikos wurden fünf ortsfeste Hindernisse am Fahrbahnrand gewählt. Als Fahrzeug wurde ein PKW mit einer Fahrzeugmasse von rd. 900 kg herangezogen. Dieser PKW wurde auf Grund der normativen Anforderungen der EN 1317 sowie EN 12767 ausgewählt. Mit diesem Fahrzeug wird die Insassenbelastung beim Anprall an ein FRS bzw. eine Tragkonstruktion (der Straßenausstattung) bewertet. In der Norm wird dieses Fahrzeug als TB11 bezeichnet. Durch diese Bezeichnung sind alle notwendigen Parameter für eine Anprallprüfung festgelegt (siehe Tabelle 25).

Die Folgen für die Insassen bei einem Anprall mit einem kleineren und somit leichteren Fahrzeug sind schwerwiegender als mit einem großen Fahrzeug. Daher wurde für die FE Simulationen auch nur dieses Fahrzeug als das kritischere angesehen. Als Anprallseite

wurde sowohl die Fahrzeugfront (F) als auch die Fahrzeugseite (S) untersucht. Im Falle der Anprallsimulationen gegen einen Baum wurde der Baumdurchmesser von 50 mm bis 350 mm mit einer Schrittweite von 100 mm variiert. Der Anprall wurde mit 70 km/h, 100 km/h und 130 km/h simuliert. Dies entspricht sowohl den normativen Angaben als auch den aktuellen Erkenntnissen von Realunfalluntersuchungen (siehe Abbildung 56).

Tabelle 25: Lastmatrix für FE Simulationen verschiedener Anprallobjekte

Anprallobjekt	Lichtmast	VZ auf I-Träger	Rohrrahmen	Gittersteher	Baum
					
Fahrzeugtyp	TB11	TB11	TB11	TB11	TB11
Anprallseite	Front, Seite	Front, Seite	Front, Seite	Front, Seite	Front, Seite
Objektvariation	keine	keine	keine	keine	Baum-durchmesser
Anprallwinkel	F: 0, 45, 90	F: 20	F: 20	F: 20	-
	S: 45	S: 20	S: 20	S: 20	-
Anprallgeschwindigkeit	70, 100	70, 100, 130	70, 100, 130	70, 100, 130	70, 100
Bewertung	ASI, THIV, delta-v	ASI, THIV, delta-v	ASI, THIV, delta-v	ASI, THIV, delta-v	ASI, THIV, delta-v

4.3 Simulationsmodelle

4.3.1. Fahrzeugsimulationsmodell Geo Metro

Die Beurteilung der Anprallheftigkeit erfolgt mittels ASI-Werten. Das verwendete Fahrzeug für die Simulation ist ein frei zugängliches FE Modell, angelehnt an den Geo Metro [35] (siehe Abbildung 28). Das Fahrzeug hat ein Gesamtgewicht von 926 kg und fällt somit in die TB11 Klasse. Dieses Fahrzeug entspricht den Anforderungen der EN 1317 sowie der EN 12767.

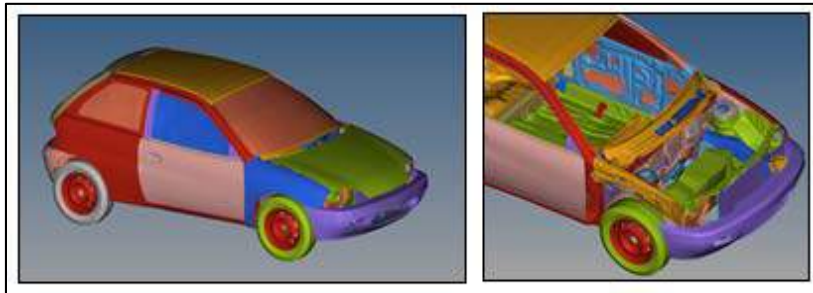


Abbildung 28: Geo Metro, FE Model

Das Fahrzeugmodell ist aus ~16.000 Elementen aufgebaut und wurde v.a. zur Simulation von Frontalcrashes entwickelt. Zwecks Überprüfung der Gültigkeit des Modells (zumindest bei niedrigen Geschwindigkeiten) wurde das Fahrzeug teilüberdeckt (40%) gegen eine starre Wand gefahren und mit Fahrzeugen deren Masse ähnlich dem des verwendeten Modells ist verglichen.

Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs wurde im Simulationsmodell mit $v = 15 \text{ km/h}$ gewählt. Daraus resultierte eine maximale Deformation, gemessen zwischen den Stoßstangen, von ca. 15 cm. Im Unfallrekonstruktionsprogramm PC-Crash ist ein EES-Katalog⁵ hinterlegt, der für verschieden Fahrzeuge die maximale Deformation enthält. In Tabelle 26 sind Ergebnisse der FE Simulation und Resultate aus Realversuchen gegenübergestellt. Es besteht im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse der FE Simulation mit den Realtests. Im FE Modell ist die Deformation durch den schwarzen Bereich bzw. die beiden roten Linien gekennzeichnet.

Tabelle 26: Vergleich des FE Modells mit Real-Fahrzeugversuchen hinsichtlich der Steifigkeit

EES [km/h]	FE-Model, 15	14.4	14.1	14.4
Masse [kg]	926	1025	1000	930
Deformation [cm]	15	16	14	24
Verformungs- bild				

⁵EES = Energy Equivalent Speed (Maß für die auftretende Deformationsenergie)

4.3.2. Anprall an Lichtmast

Für die Anprallsimulationen an einen Lichtmast wurde die in Abbildung 29 dargestellte konstruktive Ausführung verwendet. Der Beleuchtungsausleger wurde symmetrisch modelliert, wie in der Konstruktionszeichnung im rechten oberen Bild ersichtlich ist. Das rechte untere Bild zeigt die Verankerung des Lichtmasts im Fundament. Auf der Grundplatte ist ein I-Träger (rot) verschweißt und mit dem Fundament verschraubt. Auf diesem I-Träger wird der Lichtmast aufgesetzt, der Zwischenraum wird mit Split aufgefüllt.

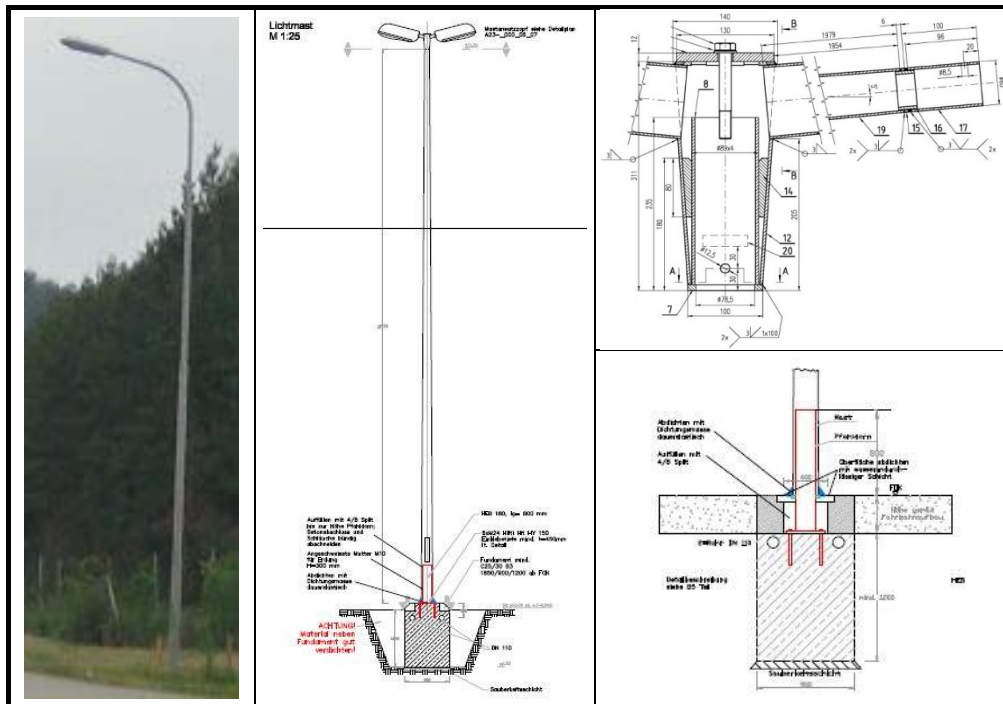


Abbildung 29: Anprallobjekt Lichtmast und konstruktive Ausführung

4.3.2.1 Simulationsmodell

Das Fundament des Lichtmasts wird als unbeweglich (starr) betrachte und als solches daher nicht modelliert. Durch die fixe Verschraubung der Grundplatte mit dem Fundament wird diese in der Simulation für alle Freiheitsgerade gesperrt. Die Schweißnaht zwischen I-Träger und Grundplatte wird durch eine fixe Verbindung (koinzidente Knoten) der ersten Elementreihe des Trägers mit denen der Grundplatte verbunden und nicht gesondert modelliert. Die Füllung aus Split wird als Erde/Schaummaterial modelliert, wobei zur Erhöhung der Berechnungsstabilität eine Ummantelung aus Aluminiumschaum mit ähnlichen Eigenschaften im Vergleich zum Split angenommen wurde.

In Abbildung 30 ist die Modellierung des Lichtmastes und die Befestigung an der Grundplatte mit den dazugehörigen Beschreibungen der getroffenen Vereinfachungen dargestellt.

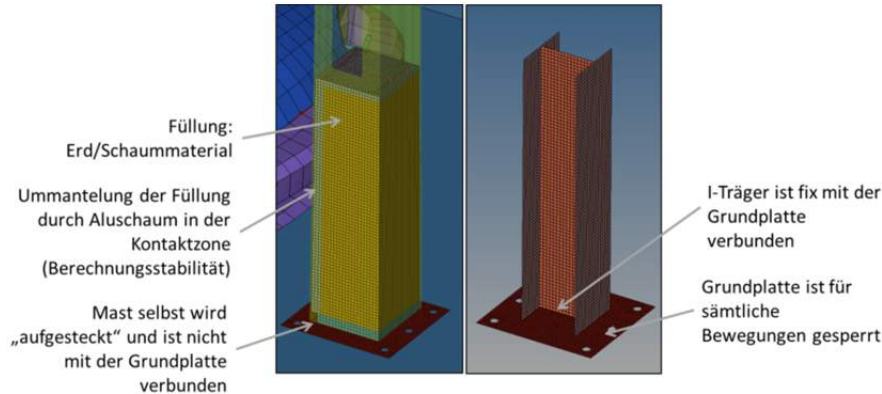


Abbildung 30: Simulationsmodell der Anbindung an die Grundplatte des Lichtmastes

4.3.2.2 Materialien im FE Modell

- Träger
 - o MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE
 - o Streckgrenze: 235N/mm²
 - o Versagenskriterium: Bruchdehnung 25%
- Mast
 - o MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE
 - o Streckgrenze: 235N/mm²
 - o Versagenskriterium: Bruchdehnung 25%
- Split (Erde/Schaummaterial)
 - o MAT_SOIL_AND_FOAM
 - o E-Modul: 2340 N/mm²
 - o Dichte: $1.7 \cdot 10^{-9} \text{ to/mm}^3$
 - o Schermodul: 100N/mm²
- Split (Aluschaum)
 - o MAT_CRUSHABLE_FOAM
 - o E-Modul: 2340 N/mm²
 - o Dichte: $4 \cdot 10^{-10} \text{ to/mm}^3$
 - o Load curve: siehe im Anhang des Kapitels
- Grundplatte
 - o MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE
 - o Streckgrenze: 235N/mm²

- o Versagenskriterium: Bruchdehnung 25%

4.3.2.3 Simulationsmatrix

Für die Simulation des Lichtmasts wurden insgesamt sechs Simulationen durchgeführt. Es wurden zwei Geschwindigkeiten (70 km/h und 100 km/h) sowie zwei Anprallpositionen (Front-, Seitenanprall) am Fahrzeug getestet. Die verschiedenen Versuchskonfigurationen können Tabelle 27 entnommen werden. Die Anprallpositionen unterscheiden sich durch den Anprallwinkel an den Lichtmast, d.h. der Winkel unter der der Lichtmast getroffen wird (0°, 45°, 90°) sowie die Anprallseite des Fahrzeugs (Front, Seite). Die Startposition ist Abbildung 31 zu entnehmen. Die Simulation mit einem Anprallwinkel von 45° weicht von den Anforderungen nach EN 1317 bzw. der EN 12767 ab. Diese Anprallkonfiguration wurde jedoch als schwerwiegend angesehen und daher für die Simulationen gewählt.

Tabelle 27: Simulationsmatrix Anprallobjekt Lichtmast

Anprallseite	Anprallwinkel [°]	Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h]
Front	0	100
		70
	45	100
	90	100
Seite	45	100
	45	70

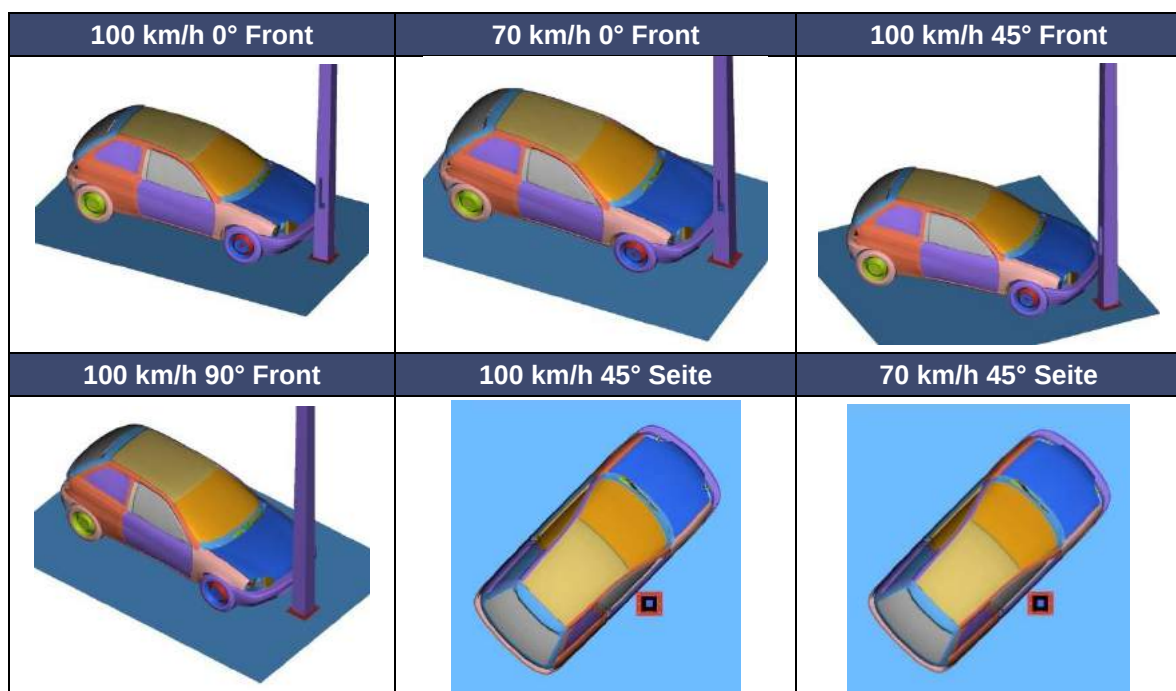


Abbildung 31: Startpositionen des Fahrzeugs beim Anprall an den Lichtmast

4.3.2.4 Simulationsergebnisse Lichtmast

Ein Überblick über die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen ist in Tabelle 28 dargestellt. ASI und THIV-Werte wurde zu den jeweils angegebenen Zeitpunkten berechnet.

Tabelle 28: Ergebnisse der Anprallsimulationen an einen Lichtmast

Anprall	Winkel	Geschwindigkeit	ASI @ Zeitpunkt
	[°]	[km/h]	@ [s]
Front	0	100	3,6 @ 0,045
		70	4,4 @ 0,05
	90	100	1,9 @ 0,037
	45	100	0,6 @ 0,025
Seite	45	100	4,4 @ 0,026
	45	70	3,0 @ 0,037

Bei einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h an die Frontseite des Fahrzeugs ergeben sich massive Verformungen des Fahrzeugs (siehe Tabelle 29 und Abbildung 32). Der ASI liegt bei ca. 3,6 und der THIV summiert sich zu 54 km/h. In der Simulation reißt der Träger bei der Anbindung zur Grundplatte.

Wird der I-Träger um 90° verdreht, sind nach wie vor massive Beschädigungen des Fahrzeugs zu erwarten. Der ASI beträgt hierbei 1,9 und der THIV 26 km/h. Erfolgt der Anprall bei einem Winkel von 45°, ändert sich der ASI auf 0,6 und der THIV auf 8,6 km/h. Allerdings ist die Simulation hier abgebrochen. Bei einer Anprallgeschwindigkeit von 70 km/h sind ebenfalls massive Verformungen zu erwarten. Beim Frontanprall liegt der ASI bei 4,4 und der THIV bei 74 km/h.

Eine Anprallsimulation seitlich ergibt ein ähnliches Bild. Es kommt zu hohen Intrusionen in die Fahrgastzelle, sowohl bei 100 km/h als auch bei 70 km/h Anprallgeschwindigkeit. Die Intrusionen reichen bis ca. 80 cm in die Fahrgastzelle. Der ASI liegt bei 100 km/h bei etwa 4,4 und der THIV bei 49 km/h. Für 70 km/h Anprallgeschwindigkeit ergeben sich ein ASI-Wert von ca. 3,0 und ein THIV von 37 km/h.

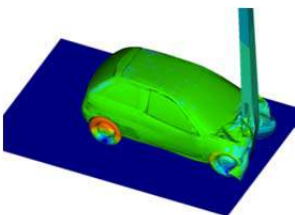
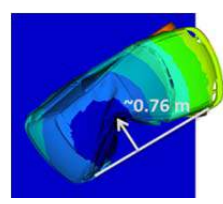
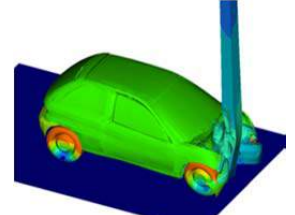
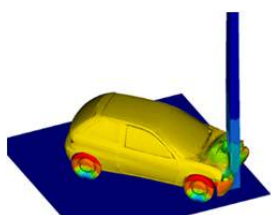
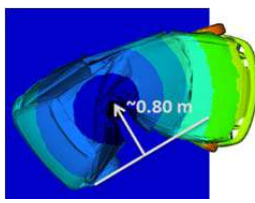
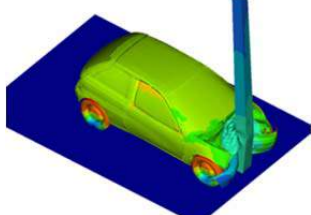
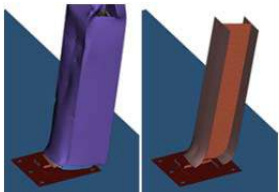
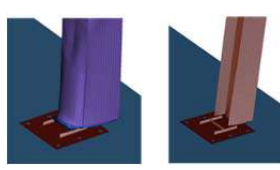
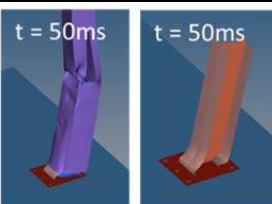
70 km/h, 0°, Front @ 52ms	70 km/h, 45°, Seite @ 90ms	100 km/h, 0°, Front @ 45ms
		
100 km/h, 45°, Front @ 100ms	100 km/h, 45°, Seite 25ms	100 km/h, 90°, Front @ 37ms
		

Abbildung 32: Deformationen am Fahrzeug in den verschiedenen Situationen

Tabelle 29: Berechnungsdetails der Lichtmastsimulation

Front, 0°, 100 km/h		Front, 90°, 100 km/h	
	- I-Träger bricht im unteren Teil ab - Berechnungsprobleme wegen des Schaummaterials		- I-Träger bricht im unteren Teil ab - Berechnungsprobleme wegen des Schaummaterials
Front, 45°, 100 km/h		Front, 0°, 70 km/h	
Deformationen am Lichtmast gering	Berechnungsprobleme wegen des Schaummaterials		- I-Träger bei Simulationsabbruch bereits stark verformt - Berechnungsprobleme wegen des Schaummaterials
Seite, 45°, 100 km/h		Seite, 45°, 70 km/h	
Deformationen am Lichtmast gering	tiefe Intrusionen in das Fahrzeug (~0.8m)	Deformationen am Lichtmast gering	tiefe Intrusionen in das Fahrzeug (~0.76m)

4.3.2.5 Einschränkungen der Simulationsergebnisse

Die größte Vereinfachung im vorliegenden Simulationsmodell stellt die Modellierung des Splits als Schaummodell dar.

Aufgrund der Instabilität des Schaummaterials kam es bei den meisten Simulationen zu einem frühzeitigen Abbruch der Berechnungen. Zu diesem Zeitpunkt waren die Belas-

tungswerte (THIV, ASI) sowie die sichtbaren Verformungen jedoch bereits so hoch, dass im weiteren Rechenverlauf keine günstigeren Ergebnisse zu erwarten waren.

Die Struktur des Fahrzeugmodells ist für eine Seitenkollision nicht ausgelegt. Daher sind die hohen Intrusionen in das Fahrzeug auch auf diesen Umstand zurückzuführen. Tendenziell sind jedoch massive Intrusionen zu erwarten.

Zur allgemeinen Einschränkung der Simulationsergebnisse kann gesagt werden, dass diese nur für das Zusammenspiel des verwendeten Fahrzeugmodells mit dem jeweiligen Kollisionsobjekt gelten. Werden andere Fahrzeugtypen, Materialien, Bodenbefestigungen, I-Trägerdimensionen, konstruktive Ausführungen (z.B. Sollbruchstellen) etc. verwendet, können die ermittelten Ergebnisse nicht übertragen werden. Ebenfalls sind bei den Materialangaben der Hersteller die Werte als Mindestwerte (z.B. der Streckgrenze) einzuhalten. Abweichungen zu diesem genormten Wert können unter Umständen auch deutlich über +10 % liegen. Dies kann durchaus zu gravierenden Änderungen des ASI-Wertes führen. Eine zusätzliche Untersuchung des eingesetzten Materials durch eine Materialprüfung kann die Ergebnisse der FE Simulation gegebenenfalls verbessern.

4.3.3. Anprall an Verkehrszeichen auf I-Träger

In der nachfolgenden Abbildung 33 ist ein Verkehrszeichen (VZ) auf einem I-Träger dargestellt. Zwecks Vereinfachung der Simulation wurde das Modell so adaptiert, sodass sich das VZ auf einer Ebene befindet und nicht (wie oftmals üblich) auf einer Böschung montiert ist. Die exakte Nachbildung der Einbettung des I-Trägers in das Fundament wurde deshalb nicht realisiert. Ein Versagen des I-Trägers erfolgt eher an der Oberkante des Fundaments als im Fundament selbst.

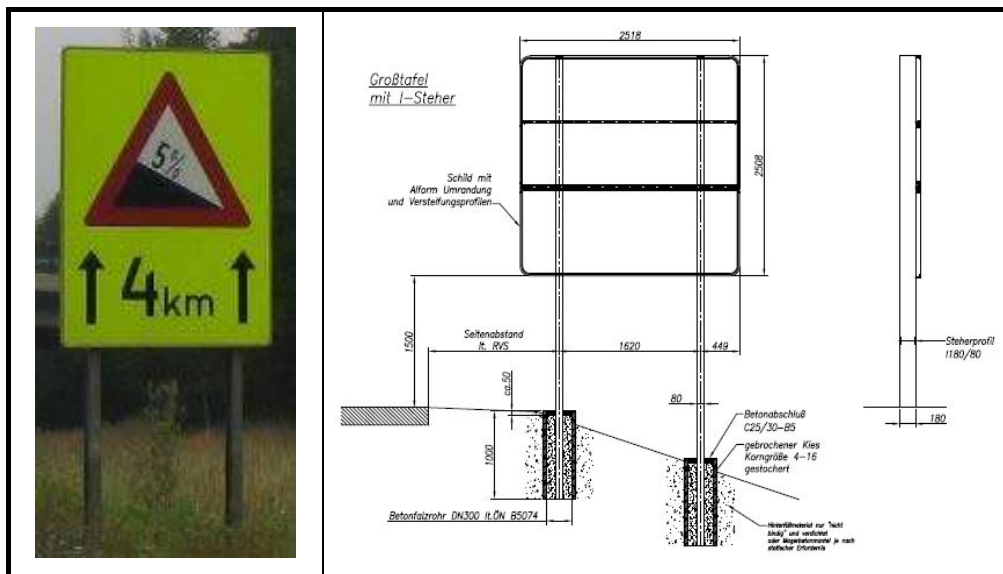


Abbildung 33: Verkehrszeichen auf I-Träger

4.3.3.1 Simulationsmodell

Beim Frontalanprall wird der I-Träger mittig an der Fahrzeugfront getroffen (Abbildung 34). Für die Seitenkollision wurde das Fahrzeug um 20° verdreht. Der Anprallpunkt am Fahrzeug lag hier unmittelbar vor der B-Säule, ähnlich wie bei Seitenanprallprüfungen mit einem pfahlähnlichen Anprallobjekt. Die Schrägstellung des Fahrzeugs wurde entsprechend der EN 1317 bzw. der EN 12767 festgelegt bzw. entspricht der amerikanischen FMVSS (15° Anprallwinkel).

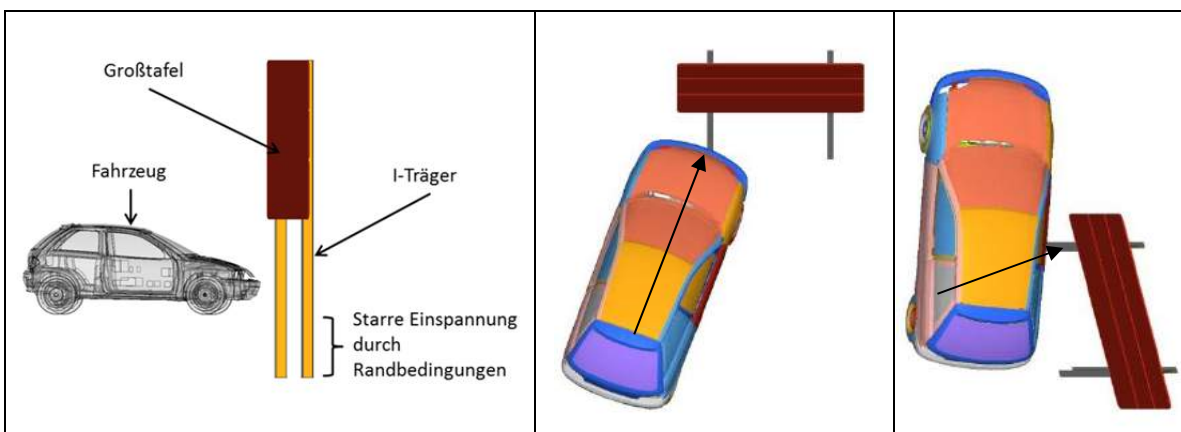


Abbildung 34: Darstellung der frontalen und lateralen Anprallkonfigurationen

Die Komponenten für den Modellaufbau sind folgende:

- Fahrzeug (TB 11)
- Großtafel
- I-Träger

Der I-Träger als wichtigste Komponente der Simulation wurde mit Shell-Elementen modelliert. Um die Elementanzahl bez. Simulationsgenauigkeit und Rechendauer in einem vernünftigen Bereich zu halten, wurde die Elementlänge auf 10 mm begrenzt. Ebenso wurde eine Elementlänge von 10 mm für die Modellierung der Großtafel gewählt. Nachstehend werden Veränderungen bzw. Modellvereinfachungen in Bezug auf den Realzustand näher erläutert.

a.) Anbindung Großtafel an I-Träger

Die Anbindung der Großtafel-Elemente an den I-Träger erfolgte direkt über äquivalente Knotenpunkte, um eine Anbindung durch Verschraubung zu vermeiden. Diese Vereinfachung kann getroffen werden, da ein Versagen der Anbindungen unwahrscheinlich ist.

b.) Fundamenteinbettung

Die Einbettung der I-Träger in ein Fundament wurde nicht modelliert, da ein Versagen der I-Träger direkt oder knapp oberhalb der Kante zum Betonabschluss erfolgt und nicht im Fundamentinneren auftritt. Es wurden die I-Träger durch vorgegebene Randbedingungen im Bereich des Fundamentes in allen sechs Freiheitsgraden gesperrt, sodass eine Bewegung verhindert wird.

4.3.3.2 Materialien im FE Modell

Geometrie und Modellaufbau sind bekannt, somit wird als nächster wichtiger Bereich die Definition der Materialeigenschaften beschrieben.

Für die einzelnen Komponenten werden mittels der FE Software LS-Dyna verschiedene Materialien (sogenannte Materialkarten) zugewiesen und mit entsprechenden (geforderten) Eigenschaften versehen.

- I-Träger: MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
 - o Dichte: 2700 kg/m³
 - o E-Modul: 70000 N/mm²
 - o Poissonzahl: 0,3
 - o Fließspannung: 260 N/mm²
- Großtafel: MAT_RESULTANT_PLASTICITY
 - o Dichte: 2700 kg/m³
 - o E-Modul: 70000 N/mm²
 - o Poissonzahl: 0,33
 - o Fließspannung: 140 N/mm²
 - o Tangentenmodul: 630 N/mm²

4.3.3.3 Simulationsmatrix

Die Anprallsimulation mit einem VZ auf I-Träger wurde mit drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten sowie zwei Anprallkonfigurationen durchgeführt (siehe Tabelle 30). Daraus ergeben sich in Summe sechs numerische Berechnungen. Zusätzlich wurden weitere vier Berechnungen bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h durchgeführt, um den Einfluss von Materialversagen zu untersuchen. Es wurde ein Materialversagen bei 20% Bruchdehnung definiert bzw. eine weitere Simulation ohne Versagen ausgewertet.

Die Änderung der Bruchdehnung (einfach zu ändern im Vergleich zu einer Fließkurve, die nicht skalierbar ist) als Parameter soll den Einfluss unterschiedlicher Materialeigenschaften (eines Werkstoffes) und somit Materialversagen widerspiegeln. Da es sich bei den angegebenen Daten der Hersteller immer um Mindestwerte z.B. der Streckgrenze handelt und die Abweichungen zu diesem genormten Wert auch deutlich über +10 % liegen können, sind gravierende Änderungen des ASI-Werts zu erwarten.

Grundsätzlich empfiehlt es sich, bei der Qualitätskontrolle stichprobenartig die Materialeigenschaften mittels Zugversuchen zu überprüfen, um einer simulationsbasierten Absicherung eine höhere Aussagekraft zu verleihen.

Die Simulation ohne Versagen beruht auf der „Fließkurve“ eines S235. Dabei wurde die Bruchdehnung solange erhöht, dass es zu keinem Versagen des Bauteils kommen kann. Dieses Szenario ist bei einer falschen Materialwahl bzw. Materialaustausch ohne zugrundeliegender Berechnung des Verletzungsrisikos möglich.

Tabelle 30: Anprallsimulationen für die I-Trägerkonstruktion

Anprallszenario	Fahrzeuggeschwindigkeit, v [km/h]		
Frontalanprall: Mitte – 20° Standard	70	100	130
Frontalanprall: Modifiziert: 25% Bruchdehnung		100	
Frontalanprall: Modifiziert: Kein Materialversagen		100	
Lateraler Anprall: vor B-Säule – 20° Standard	70	100	130
Lateraler Anprall: Modifiziert: 25% Bruchdehnung		100	
Lateraler Anprall: Modifiziert: Kein Materialversagen		100	

4.3.3.4 Simulationsergebnisse VZ auf I-Träger

Die Ergebnisse der Simulationen sind Tabelle 31 zu entnehmen. Bei einem Frontalanprall mit 70 km/h liegt der ASI bei 0,35. Dieser Wert entspricht im Großen und Ganzen auch Anprallgeschwindigkeiten von 100 km/h bzw. 130 km/h. Bei einer Bruchdehnung von 20 % erhöht sich der ASI auf 0,71 für den Anprall mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h. Für den Fall, dass kein Versagen eintritt, ergibt sich ein ASI von 3,19.

Tabelle 31: ASI, THIV und Delta-v für Anprall an ein VZ auf I-Träger

	Anprall		Frontal			Seite		
	Material-versagen		Standard	20% Versagen	Kein Versagen	Standard	20% Versagen	Kein Versagen
70 [km/h]	ASI		0,35			0,73		
	THIV	[km/h]	8,50			13,60		
	delta-v	[km/h]	4,00			10,00		
100 [km/h]	ASI		0,34	0,71	3,19	0,57	0,75	2,79
	THIV	[km/h]	10,30	12,80	65,20	15,20	20,40	57,70
	delta-v	[km/h]	4,00	5,00		9,00	12,00	
130 [km/h]	ASI		0,30			0,56		
	THIV	[km/h]	4,80			17,20		
	delta-v	[km/h]	4,00			8,00		

Die Fahrzeugdeformation bei einem Anprall an das VZ auf I-Träger ist Abbildung 35 zu entnehmen. Für einen Frontalanprall sind keine wesentlichen Verformungen am Fahrzeug zu erwarten. Der I-Träger versagt bei der Einspannung und wird abgesichert.

Ein ähnliches Bild ergibt sich auch für Seitenkollisionen (siehe Abbildung 36). Bei einem Seitenanprall mit einer Anprallgeschwindigkeit von 70 km/h ist zumindest eine Deformation am Schweller im Bereich der B-Säule von ca. 200 mm festzustellen. Erfolgt der Anprall im Bereich der Fahrzeugtüren, sind für dieses Modell auch tiefere Intrusionen durchaus möglich. Bei 70 km/h ist der ASI bei ca. 0,73. Bei einem Anprall mit 100 km/h beläuft sich der ASI auf 0,57 und bei 130 km/h Anprallgeschwindigkeit auf ca. 0,56.

Für seitliche Kollisionen mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h wurde ebenfalls Materialversagen im I-Träger simuliert. Ein Anprall mit 20% Bruchdehnung führt demnach zu einem ASI von 0,75. Ohne Versagen ergibt sich ein ASI von 2,79. Bei der Betrachtung des Deformationsbildes zeigt sich, dass das Fahrzeug komplett verformt wird, wenn der I-Träger nicht bricht, sondern mit dem Fundament verbunden bleibt.

Wie bereits beschrieben wurde, geben die ASI-Werte der Simulationen mit erhöhter Bruchdehnung Auskunft über Verletzungsrisiken bei falscher Materialwahl bzw. abweichenden Materialeigenschaften aufgrund des Herstellungsprozesses.

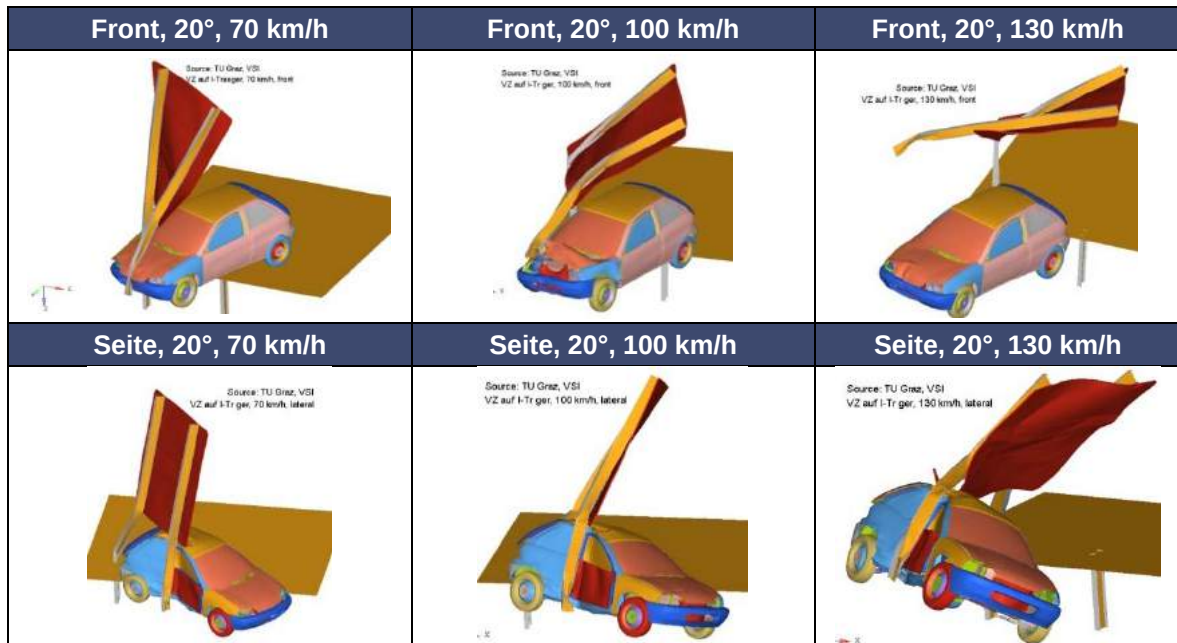


Abbildung 35: Deformationsbild beim Anprall an ein VZ auf I-Träger (Standard)

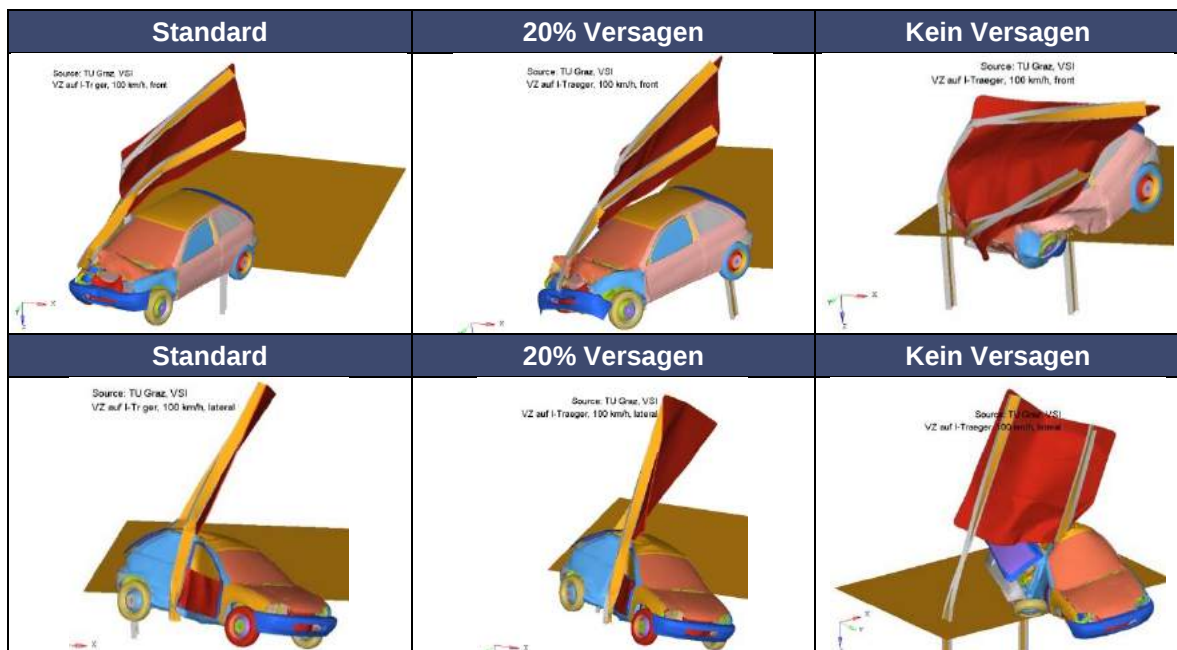


Abbildung 36: Vergleich der Deformationsbilder beim Front- und Seitenanprall (100 km/h) mit VZ auf I-Träger und unterschiedlichen Versagenskriterien

In Tabelle 31 sind lediglich die ASI-Werte der betreffenden Simulationen ersichtlich. Bei einem Seitenanprall kann es jedoch auch zu Intrusionen in die Fahrgastzelle kommen (siehe Abbildung 37). Es wurden allerdings nur Seitenkollisionen betrachtet, da hierbei eher Intrusionen in die Fahrgastzelle auftreten. Bei den simulierten Anprallgeschwindigkeiten reichen die Intrusionen bis etwa 330 mm. Diese sind für alle Anprallgeschwindigkeiten in etwa gleich tief. Bei der Simulation mit 20% Versagen liegt der ASI bei ca. 0,75 wobei mögliche Intrusionen bis zu 410 mm reichen.

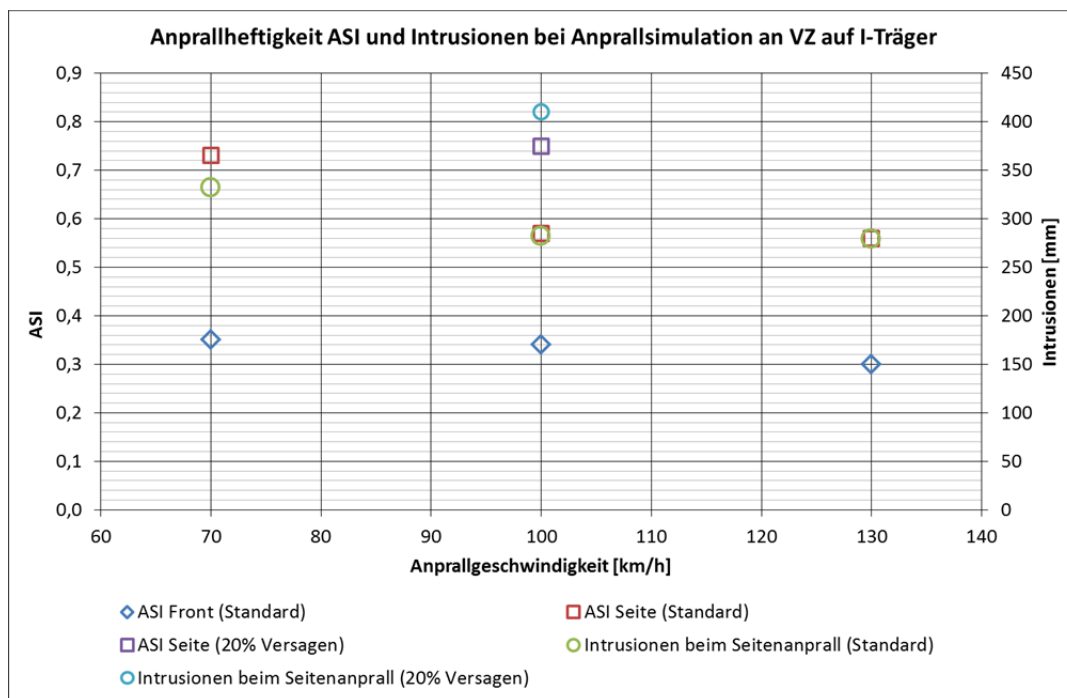


Abbildung 37: Anprallheftigkeit (ASI) und Intrusionen bei Anprallsimulation VZ auf I-Träger

4.3.4. Anprall an Rohrrahmensteher

Ein weiteres mögliches Anprallobjekt am Straßenrand stellen Rohrrahmen dar (siehe Abbildung 38). Diese sind über ein Fundament mit dem Untergrund verbunden.

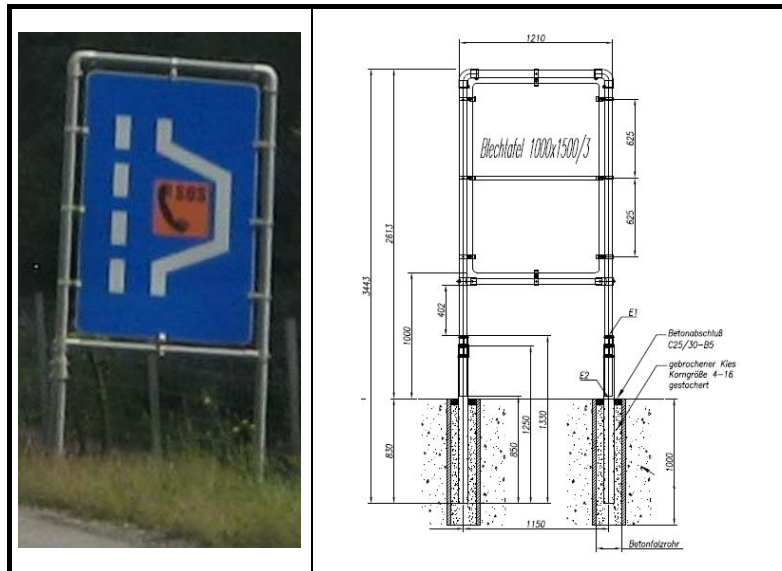


Abbildung 38: Darstellung des Rohrrahmens

4.3.4.1 Simulationsmodell

Beim Frontalanprall wird der Rohrrahmensteher mittig an der Fahrzeugfront getroffen. Zur Simulation von Seitenkollisionen wurde das Fahrzeug um 20° verdreht. Der Anprallpunkt am Fahrzeug liegt dabei kurz vor der B-Säule, ähnlich wie bei Seitenanprallprüfungen mit einem pfahlartigen Objekt.

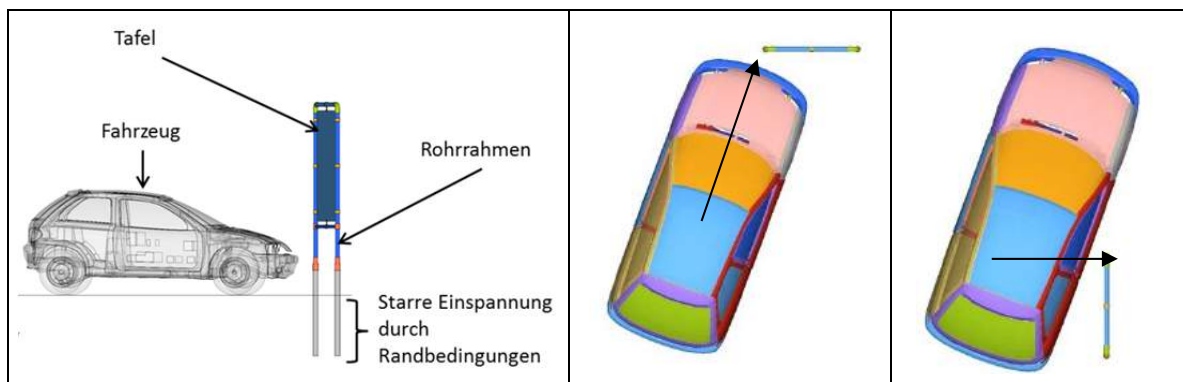


Abbildung 39: Darstellung der frontalen und lateralen Anprallkonfiguration beim Rohrrahmen

Die einzelnen Komponenten des FE Modells bestehen aus:

- Fahrzeug (TB11)
- Tafel
- Rohrrahmen

Der Rohrrahmen als wichtigste Komponente wurde mit Shell-Elementen modelliert. Um die Elementanzahl hinsichtlich Simulationsgenauigkeit und Rechendauer in einem vernünftigen Rahmen zu halten, wurde die Elementlänge mit 10 mm fixiert. Ebenso wurde eine Elementlänge von 10 mm für die Modellierung der Tafelteile festgelegt. Nachstehend werden Veränderungen bzw. Modellvereinfachungen in Bezug auf den Realzustand näher erläutert.

a.) Anbindung Tafel an Rohrrahmen

Die Anbindung der Großtafel-Elemente an den Rohrrahmen erfolgte über definierte Kontaktbedingungen, um eine Anbindung durch Verschraubung zu vermeiden. Die Befestigung der Einzelkomponenten geschieht über einen Klebekontakt. Diese Vereinfachung ist insofern zulässig, als ein Versagen der Anbindungen sehr unwahrscheinlich ist.

b.) Verbindung Rohrreduzierung/Rohrrahmenlasche/T-Verbindung

Ebenso wie die Anbindung der Großtafel-Elemente an den Rohrrahmen erfolgte die Verbindung der Rohrrahmenteile über Klebekontakte. Diese Vereinfachung kann ebenfalls getroffen werden, da ein Versagen der Anbindungen höchst unwahrscheinlich ist.

c.) Fundamenteinbettung

Die Einbettung der Rohrrahmen in das Fundament wurde nicht modelliert, da ein Versagen der Rohrrahmen direkt oder knapp oberhalb der Kante zum Betonabschluss erfolgt und nicht im Fundamentinneren auftritt. Es wurden die Rohrrahmensteher durch vorgegebene Randbedingungen im Bereich des Fundamentes in allen sechs Freiheitsgraden gesperrt, wodurch diese in der Anbindung unbeweglich sind.

4.3.4.2 Materialien im FE Modell

Mittels der Software LS-Dyna werden den einzelnen Komponenten verschiedene Materialarten zugewiesen und mit entsprechenden (geforderten) Eigenschaften versehen.

- Rundrohre: MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
 - o Dichte: 7850 kg/m³
 - o E-Modul: 210000 N/mm²
 - o Poissonzahl: 0,3
 - o Fließspannung: 260 N/mm²
- Tafel: MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
 - o Dichte: 2700 kg/m³
 - o E-Modul: 70000 N/mm²
 - o Poissonzahl: 0,3
 - o Fließspannung: 260 N/mm²

- Rohrreduzierungen/Eckverbinder: MAT_RESULTANT_PLASTICITY
 - o Dichte: 2650 kg/m³
 - o E-Modul: 65000 N/mm²
 - o Poissonzahl: 0,27
 - o Fließspannung: 130 N/mm²
 - o Tangentenmodul: 1724 N/mm²

4.3.4.3 Simulationsmatrix

Die Anprallsimulation mit Rohrrahmensteher erfolgt bei drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und zwei Anprallkonfigurationen (siehe Tabelle 32). Zusätzlich wurden weitere Simulationen bei einer Geschwindigkeit von 100km/h durchgeführt, um Materialversagen zu analysieren. Die Erläuterung für dieses Vorgehen (Änderung der Bruchdehnung) ist Kapitel 4.3.3.3 zu entnehmen. Im Rahmen einer weiten Simulation wurde die Einspannung verändert. Der Rohrrahmen ist dabei nicht mehr starr eingespannt, sondern in einen Zylinder gestellt, was zur Folge hat, dass die dem Anprall zugewandte Rohrseite in Richtung der Fahrzeuggeschwindigkeit verformt werden kann. Diese Berechnung dient als zusätzliche Information zu den bestehenden Standardsimulationen mit starrer Einspannung.

Tabelle 32: Anprallsimulationen für die Rohrrahmenkonstruktion

Anprallszenario	Fahrzeuggeschwindigkeit, v [km/h]		
	70	100	130
Frontalanprall: Mitte – 20° Standard	70	100	130
Frontalanprall: Modifiziert: 50% Bruchdehnung		100	
Frontalanprall: Modifiziert: Kein Materialversagen		100	
Frontalanprall: Modifiziert: Einspannung, Rohrrahmen in Zylinderfassung		100	
Lateraler Anprall: vor B-Säule – 20° Standard	70	100	130
Lateraler Anprall: Modifiziert: 50% Bruchdehnung		100	
Lateraler Anprall: Modifiziert: Kein Materialversagen		100	
Lateraler Anprall: Modifiziert: Einspannung, Rohrrahmen in Zylinderfassung		100	

4.3.4.4 Simulationsergebnisse Rohrrahmen

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 33 dargestellt. Der ASI ist bei den Kollisionen sowohl für den frontalen als auch für den seitlichen Anprall relativ niedrig. Dieser

Reicht von 0,18 bei einer Anprallgeschwindigkeit von 70 km/h bis 0,24 bei Kollisionen mit 130 km/h. Beim Seitenanprall ist dieser etwas höher und liegt im Bereich von 0,4 sowohl bei 70 km/h Anprallgeschwindigkeit als auch bei 130 km/h Anprallgeschwindigkeit. Bei den Simulationen mit den modifizierten Versagenskriterien steigt der ASI auf 0,32 bei einem Frontanprall bzw. 0,67 bei einem Seitenanprall und 100 km/h Geschwindigkeit. Wird ohne Versagen des Rohrrahmens gerechnet, liegt der ASI bei 2,87 für frontale Anprallsituationen bzw. 2,31 für Seitenanprallsituationen.

Tabelle 33: ASI, THIV und Delta-v für alle Anprallkonfigurationen mit dem Rohrrahmen

	Anprall		Frontal			Seite		
	Material-versagen		Stan- dard	50% Versa- gen	Kein Versagen	Stan- dard	50% Versagen	Kein Versa- gen
70 [km/h]	ASI		0,18			0,41		
	THIV	[km/h]	6,40			11,70		
	delta-v	[km/h]	3,00			7,00		
100 [km/h]	ASI		0,19	0,32	2,87	0,41	0,67	2,31
	THIV	[km/h]	7,10	9,30	66,10	10,70	18,50	42,70
	delta-v	[km/h]	3,00	5,00		7,00	10,00	
130 [km/h]	ASI		0,24			0,43		
	THIV	[km/h]	7,40			11,30		
	delta-v	[km/h]	3,00			6,00		

Die Kollision mit einem Rohrrahmen führt sowohl für den Front- als auch Seitenanprall zu keinen massiven Beschädigungen am Fahrzeug (siehe Abbildung 40). In beiden Fällen wird der Rohrrahmen an der Einspannung abgesichert. Bei einer Anprallsituation, wo das Fahrzeug beim Frontanprall nur mit einem Steher kollidiert, erfolgt nach Abscheren des Stehers in der Einspannung ein Verdrehen des Objekts um den verbleibenden zweiten Steher. Nachdem die Grenzbelastung überschritten wird, wird auch der zweite Steher an der Einspannung zum Fundament abgesichert. Das gesamte Anprallobjekt kann sich zu diesem Zeitpunkt frei bewegen und wird über das Fahrzeug geschleudert. Eine Kollision des freifliegenden Objekts mit anderen Verkehrsteilnehmern ist möglich und kann nicht ausgeschlossen werden.

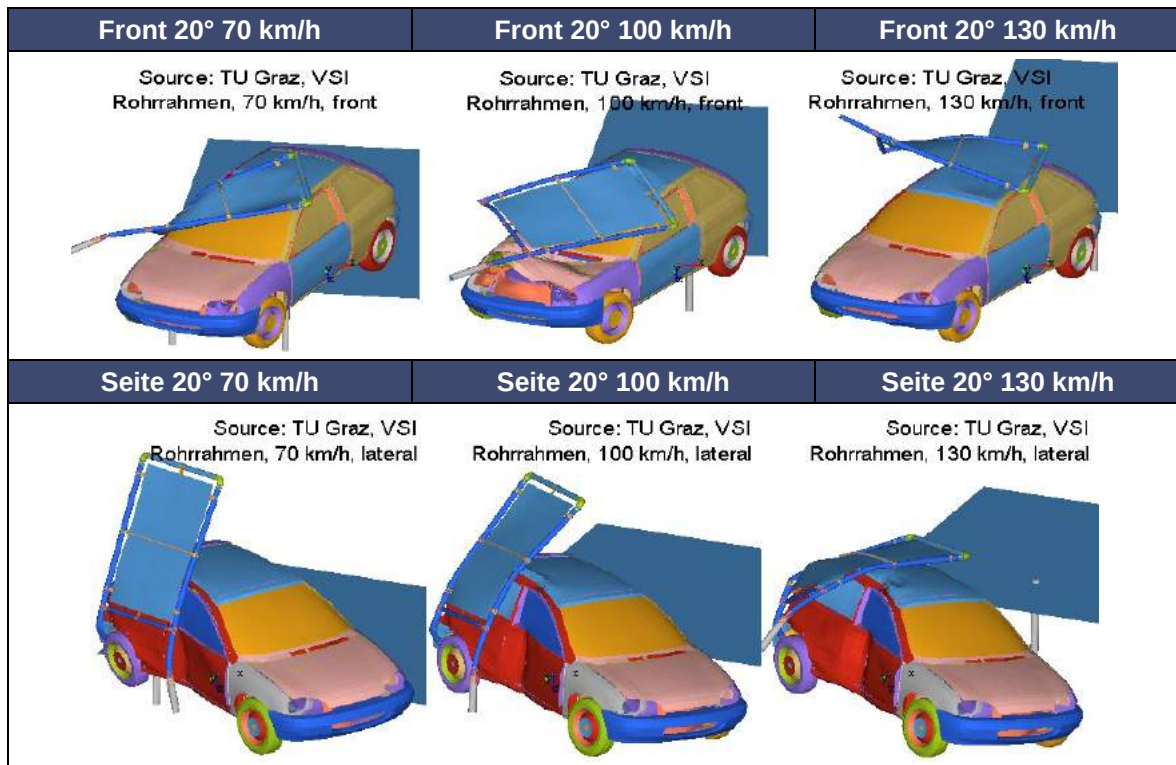


Abbildung 40: Deformationsbild beim Anprall an einen Rohrrahmen (Standard)

In Abbildung 41 sind die Simulationsergebnisse mit einem 50% Versagenskriterium und ohne Versagen dargestellt.

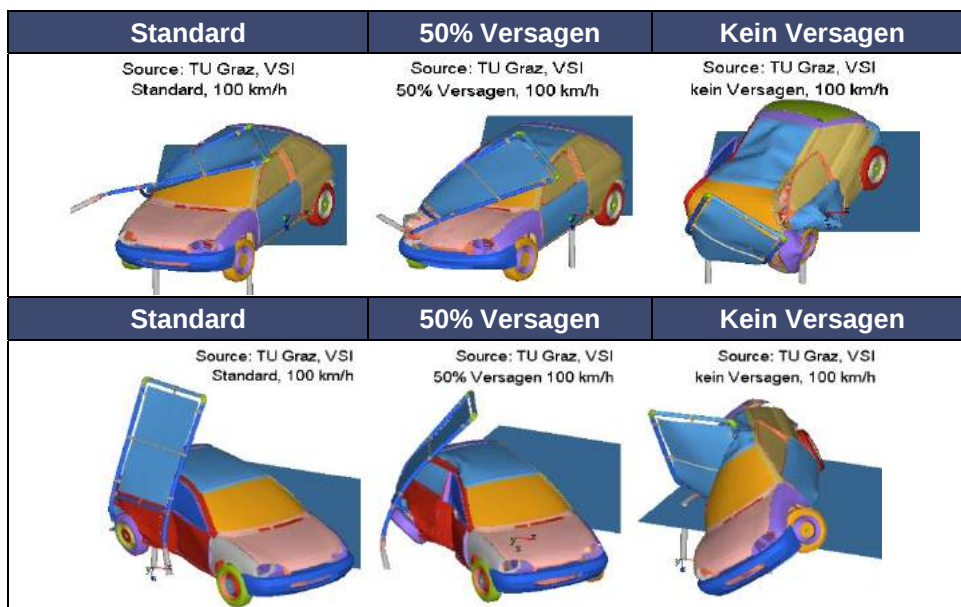


Abbildung 41: Vergleich der Deformationsbilder beim Front- und Seitenanprall mit einem Rohrrahmen und unterschiedlichem Versagenskriterium

Der Anprall an einen Rohrrahmen hat entsprechend der Simulationsergebnisse einen niedrigen ASI. Diesem niedrigen Wert entspricht auch eine geringe Intrusion in die Fahr-

gastzelle. Bei einer Anprallgeschwindigkeit von 70 km/h liegt eine Intrusion bei etwa 150 mm und bei 130 km/h bei ca. 250 mm. Sofern die Simulation mit 50% Versagen rechnet, ist ein ASI von knapp 0,7 und eine Intrusion von etwa 280 mm aus den Simulationen festzustellen. Dies gilt für eine Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h.

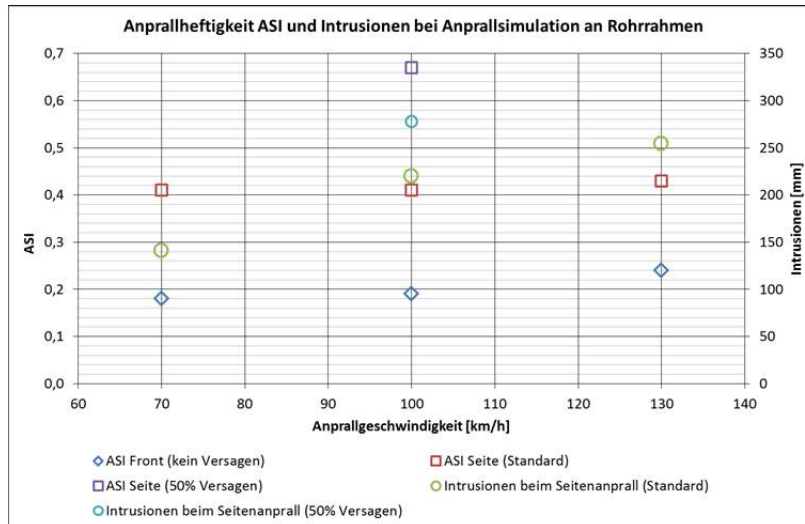


Abbildung 42: Anprallheftigkeit (ASI) und Intrusionen bei Anprallsimulation mit Rohrrahmen

4.3.5. Anprall an Gittersteherkonstruktion

In Abbildung 43 ist der Aufbau eines Gitterstehers dargestellt. Dieser wird mittels zweier Streifenfundamente im Boden verankert. Für die Simulation wurde eine ebenerdige Fundamentierung der Gittersteherkonstruktion angenommen. Es wurde ebenfalls vorausgesetzt, dass sich die Konstruktion nicht auf einer Böschung befindet.

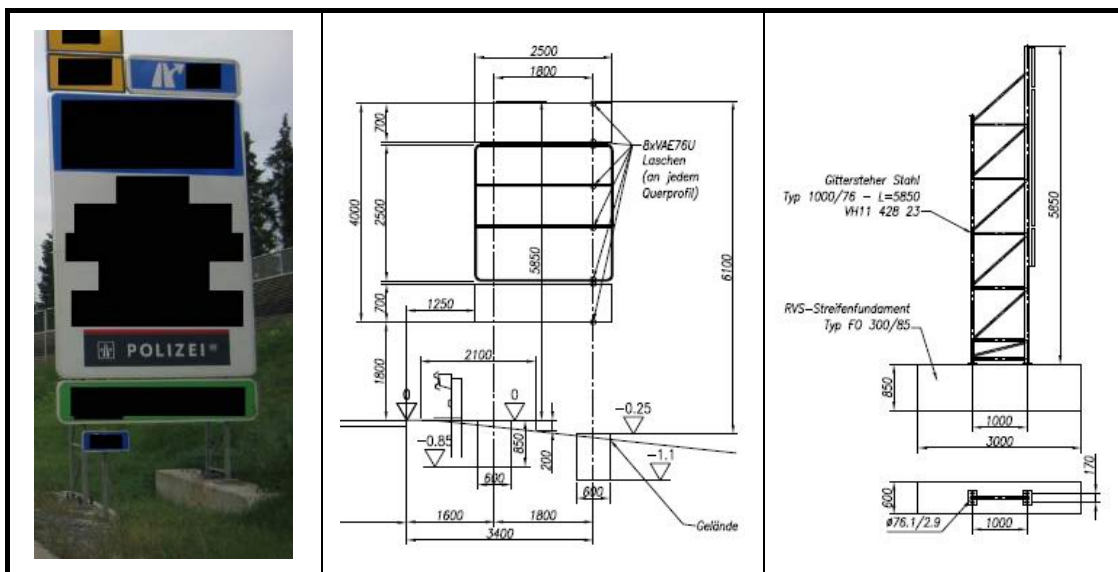


Abbildung 43: Aufbau Gittersteherkonstruktion

4.3.5.1 Simulationsmodell

Die Positionierung des Fahrzeugs bez. des Gitterstehers wurde in beiden Fällen, frontal und lateral, mit 20° Drehung festgelegt. In Abbildung 44 ist der Modellaufbau und die Positionierung des Fahrzeugs dargestellt.

Der Gittersteher besteht aus folgenden Komponenten:

- Zwei Fachwerke aus Formrohren (Stahl) mit unterschiedlichem Durchmesser
- eine mehrteilige Tafel

Die Einspannung der Gittersteher wurde am unteren Ende des Stahlrohres starr ausgeführt. Die Verbindung der Rohre erfolgt mittels koinzidenter Knoten, da eine detailgetreue Berechnung der Schweißnähte einen deutlichen Mehraufwand bedeuten würde und durch eine zusätzliche Versuchsserie eingesetzter Schweißverbindungen gestützt werden müsste. Es ist jedoch davon auszugehen, dass durch eine Schweißverbindung die Verbindungsstellen geschwächt werden, was in geringfügig geringere ASI Werte resultiert. Die Intrusionsgefahr würde jedoch ansteigen. Die Verbindung der Tafel mit den Gitterstehern wurde über eine zusätzliche Elementreihe definiert.

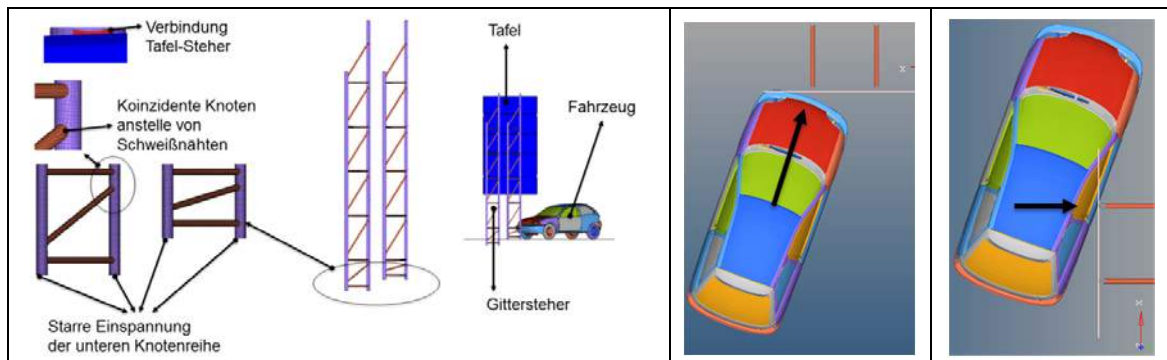


Abbildung 44: Darstellung der frontalen und lateralen Anprallkonfiguration mit eingezeichnetem Geschwindigkeitsvektor

4.3.5.2 Materialien im FE Modell

Die verwendeten Materialeigenschaften und Materialmodelle für die Komponenten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Stahlrohre des Gitterstehers: S235JRG2
 - o MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
 - o Streckgrenze: 245,0N/mm²
 - o Versagenskriterium Bruchdehnung: 25%
 - o Dehnratenabhängigkeit
- Aluminiumtafel: Aluminiumlegierung ENAW 5251 H34

- o MAT_RESULTANT_PLASTICITY
- o Streckgrenze: 140,0N/mm²
- o Tangentenmodul: 630,0N/mm²
- o Kein Versagenskriterium
- Aluminiumlaschen: Aluminiumlegierung ENAW 6063 T66
 - o MAT_RESULTANT_PLASTICITY
 - o Streckgrenze: 200,0N/mm²
 - o Tangentenmodul: 560,0N/mm²
 - o Kein Versagenskriterium

4.3.5.3 Simulationsmatrix

Für die Gittersteherkonstruktion wurden zehn Simulationen durchgeführt. Diese unterscheiden sich in der Anprallgeschwindigkeit des Fahrzeugs (70 km/h, 100 km/h, 130 km/h) sowie der Anprallrichtung (frontale, laterale Kollision). Mittels zusätzlicher Simulationen wurde die Bruchdehnung des Stahls variiert, da es zu großen Abweichungen bez. der Streckgrenze und Bruchdehnung bei einer bestimmten Stahlsorte kommen kann.

Die durchgeführten Simulationen sind in Tabelle 34 zusammengefasst.

Tabelle 34: Anprallsimulationen für die Gittersteherkonstruktion

Anprallszenario	Fahrzeuggeschwindigkeit, v [km/h]		
Frontalanprall: Mitte – 20° Standard	70	100	130
Frontalanprall: Modifiziert: 50% Bruchdehnung		100	
Frontalanprall: Modifiziert: Kein Materialversagen		100	
Lateraler Anprall: vor B-Säule – 20° Standard	70	100	130
Lateraler Anprall: Modifiziert: 50% Bruchdehnung		100	
Lateraler Anprall: Modifiziert: Kein Materialversagen		100	

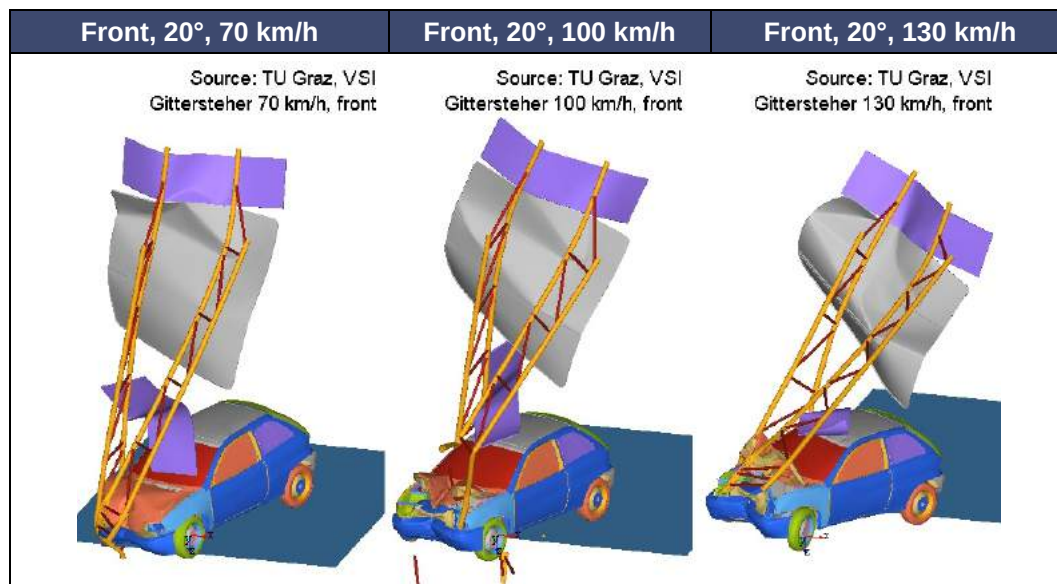
4.3.5.4 Simulationsergebnisse Gittersteher

In Tabelle 35 sind die Simulationsergebnisse für Kollisionen mit einem Gittersteher zusammengefasst. Der Frontalanprall an den Gittersteher bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 70 km/h ergibt für den ASI einen Wert von 0,79. Bei 100 km/h ist der ASI bei 0,65 und für 130 km/h Anprallgeschwindigkeit bei 0,76.

Tabelle 35: ASI, THIV und Delta-v für Anprallkonfigurationen mit einem Gittersteher

	Anprall		Frontal			Seite		
	Material-versagen		Standard	50% Versagen	Kein Versagen	Standard	50% Versagen	Kein Versagen
70 [km/h]	ASI		0,79			1,44		
	THIV	[km/h]	30,40			29,30		
	delta-v	[km/h]						
100 [km/h]	ASI		0,65	1,40	3,70	1,41	2,01	2,75
	THIV	[km/h]	21,40	37,9	74,4	30,80	33,10	49,60
	delta-v	[km/h]						
130 [km/h]	ASI		0,76			1,44		
	THIV	[km/h]	27,60			27,50		
	delta-v	[km/h]						

Im Falle einer Seitenkollision ist der ASI bei 1,44 bei einer Anprallgeschwindigkeit von 70 km/h. Für eine Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h ergibt sich ein ASI von 1,41 bzw. 1,44 bei 130 km/h. Intrusionen in die Fahrgastzelle sind insbesondere bei seitlichen Kollisionskonfigurationen möglich. Allerdings wurde bei den Simulationen ein sich stark verdrehtes Fahrzeug definiert. Sofern es sich um eine Abgleitkollision handelt, müssen keine tiefen Intrusionen auftreten. Liegt hingegen eine Anprallsituation wie in den Simulationen dargestellt vor, können Intrusionen in die Fahrgastzelle auftreten (siehe Abbildung 45).



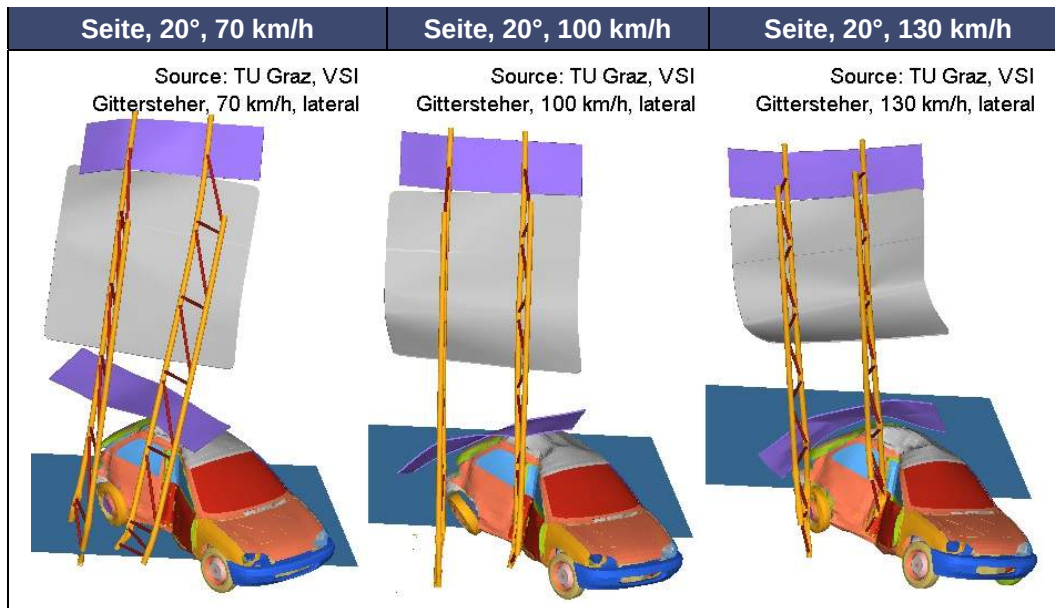


Abbildung 45: Deformationsbild beim Anprall an die Gittersteherkonstruktion (Standard)

Da diese Ergebnisse nur für die angegebenen Daten (Materialien) gültig sind, wurde die Bruchdehnung von Stahl variiert, um die resultierende Veränderungen des ASI Wertes besser abschätzen zu können. Dabei ist davon auszugehen, dass auch bei dem verwendeten Stahl (S235) eine gewisse Schwankungsbreite zu erwarten ist, da die Streckgrenze ein Minimum darstellt und auch höhere Werte annehmen kann. Dieser Vorgang wurde bereits im Abschnitt VZ auf I-Träger eingehend beschrieben (siehe Kapitel 4.3.3.3).

Die Deformationsbilder der Gitterstehersimulation sind in Abbildung 45 dargestellt. Beim Frontanprall wird der kollidierte Steher an der Anbindung zum Fundament abgesichert, mit der Konsequenz, dass die gesamte Gittersteherkonstruktion um den noch mit dem Fundament verbundenen Steher verdreht wird. Dieser wird unter Umständen ebenfalls abgesichert, was in der Simulation jedoch nicht mehr ersichtlich ist. Bei der Seitenkollision werden beide Steher an der Anbindung zum Fundament abgesichert, da auf Grund der Fahrzeugbreite ein Anprall an den ersten Steher und in weiterer Folge auch auf den zweiten Steher erfolgt.

Bei Seitenkollisionen liegen Intrusionen in die Fahrgastzelle vor, welche zwischen 400 mm und 500 mm betragen können.

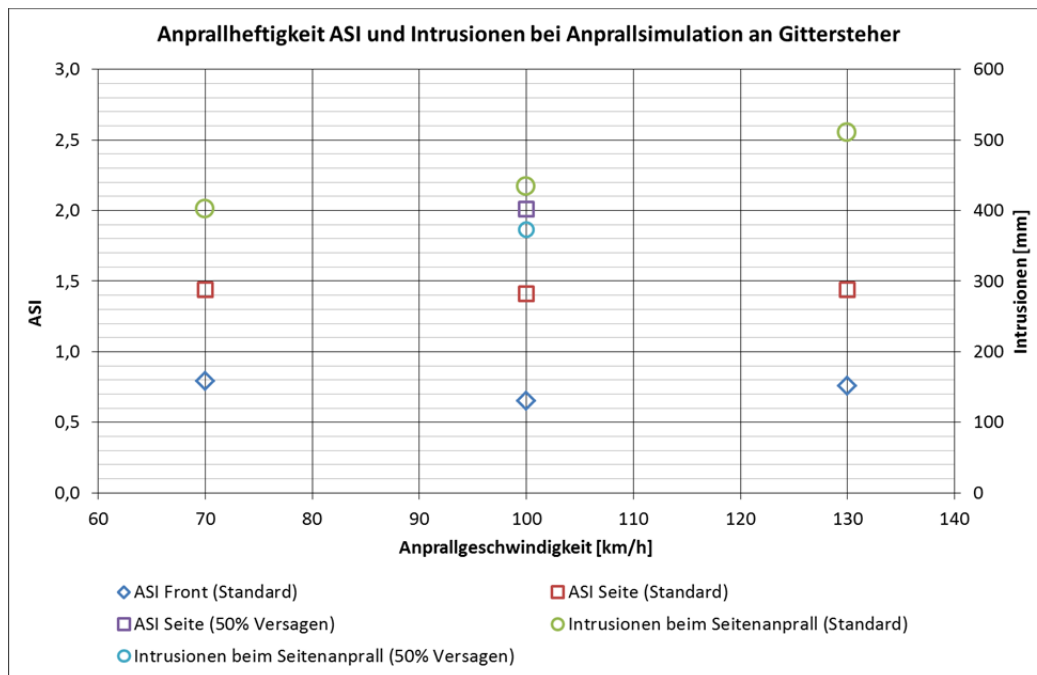


Abbildung 46: Anprallheftigkeit ASI und Intrusionen bei Anprallsimulation an einen Gittersteher

Für jede Anprallkonfigurationen (Frontal, Lateral) wurden zwei weitere Simulationen gerechnet. Bei der ersten wurde die Bruchdehnung auf 50% erhöht und die Zweite ohne Materialversagen (Bruch) gerechnet (siehe Abbildung 47). Die Fahrzeuggeschwindigkeit wurde mit 100 km/h festgelegt. Die ASI-Werte dieser Konfiguration können Tabelle 35 entnommen werden. Beim Frontalanprall ergeben sich z.B. für die erhöhte Bruchdehnung (im Vergleich zur Standardkonfiguration) mehr als doppelt so hohe Werte, ohne Versagen sogar mehr als das fünffache der Standardsimulation.

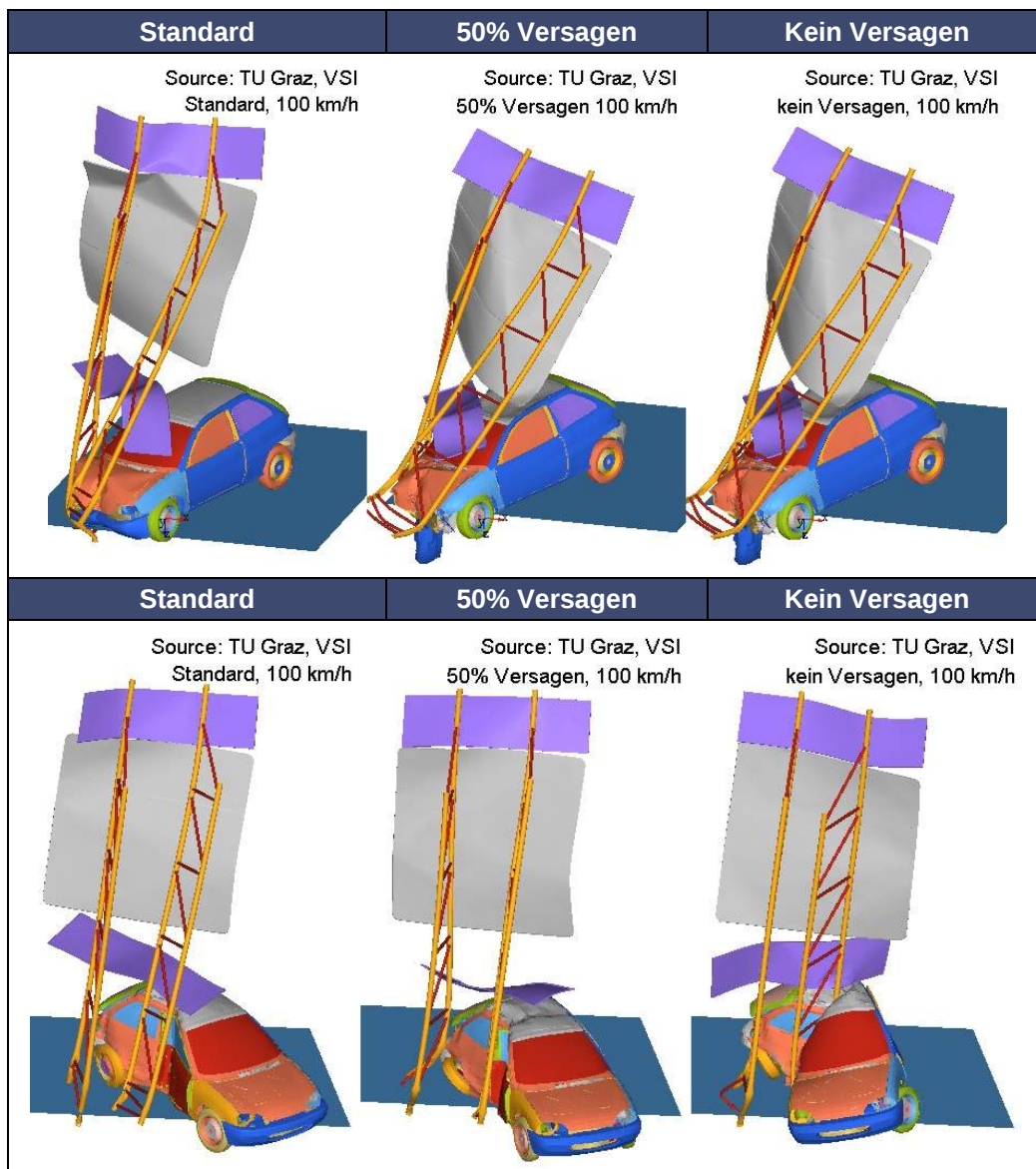


Abbildung 47: Vergleich der Deformationsbilder beim Front- und Seitenanprall mit einem Gittersteher und unterschiedlichem Versagenskriterium

4.3.6. Anprall an Baum

Als letztes Kollisionsobjekt wurde ein Baum simuliert. Als Holzart wurde eine Tanne verwendet, da nur hierfür entsprechende Daten in der Literatur zur Verfügung standen.

Beim Frontalanprall wird der Baum mittig an der Fahrzeugfront getroffen. Für die Seitenkollision wurde das Fahrzeug um 20° verdreht und in Richtung Baum bewegt. Der Anprallpunkt am Fahrzeug lag hier hierbei unmittelbar vor der B-Säule, ähnlich wie bei einer Seitenanprallprüfung mit einem pfahlähnlichen Objekt.

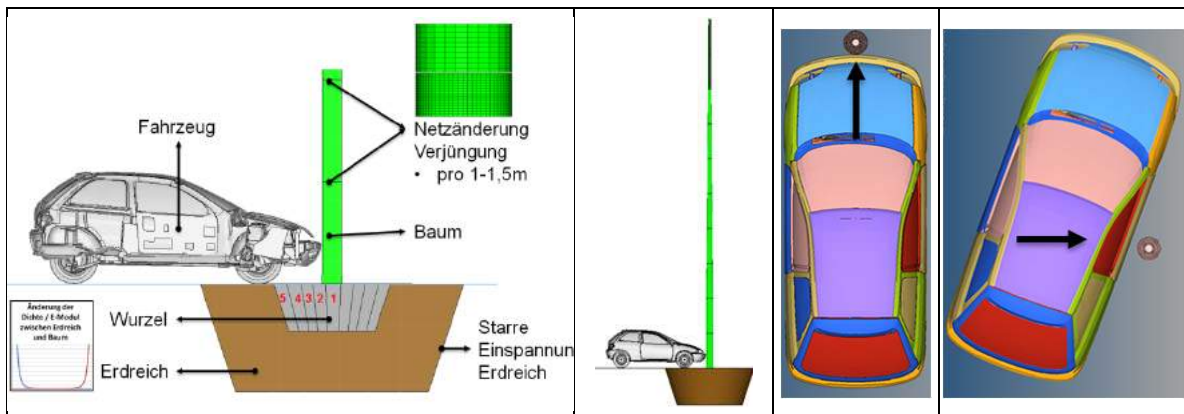


Abbildung 48: Darstellung der frontalen und lateralen Anprallkonfiguration bei Baumkollisionen

Die einzelnen Modellkomponenten bestehen aus:

- Fahrzeug (TB11)
- Baum (in 1m Abschnitte getrennt, jeweils mit „Rigids“ verbunden)
- Wurzel (unterteilt in mehrere Bereiche)
- Erdreich

Der „Baum“ als wichtigste Komponente wurde mit Solid-Elementen modelliert. Um die Elementanzahl bei einer durchschnittlichen Elementgröße zwischen 5-10 mm zu begrenzen, wurde nach jeweils einem Meter ein neues Netz aufgebaut, das ab dem ersten Meter vom Boden gröber wurde (Verringerung der Elementanzahl). Die einzelnen Abschnitte wurden in der jeweiligen Schnittebene mit Starrkörpern („Rigids“) verbunden. Durch diesen Aufbau konnte die Elementanzahl der Modelle verringert und somit auch Rechenzeit eingespart werden. Dies ist u.a. damit zu begründen, dass der Fahrzeugkontakt sowie auftretende Deformationen nur im ersten Teilstück zu erwarten sind. Für den restlichen Teil des Baumes ist hauptsächlich die Trägheit für den Kollisionsablauf ausschlaggebend. Das Durchmesser-Höhenverhältnis wurde aus einer Arbeit von LAPPI-SEPPÄLÄ [26] entnommen. Dieser ist zu entnehmen, dass ein degressiver Verlauf der Höhenzunahme mit dem Baumdurchmesser besteht.

Die Baumwurzel besteht aus mehreren Bereichen (1- 5), die durch unterschiedliche Materialeigenschaften beschrieben werden können und mittels Solidelementen modelliert wurden. Die Baumwurzel ist mit dem Baum über ein starres Element verbunden. Das angrenzende Erdreich (koinzidente Knoten) wurde ebenfalls mit Solidelementen aufgebaut und diente dazu, die Interaktion mit der Wurzel des Baumes abzubilden. Diese Modellierungsmöglichkeit wurde in der Dissertation von JONSSON [27] beschrieben und durch

eigene Versuche validiert. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Versuche an einem steilen Gelände an einem Berg durchgeführt wurden und es im Vergleich zu Bäumen neben Verkehrsrouten zu Abweichungen in der Zusammensetzung und dem daraus resultierenden Verhalten kommen kann.

Durch die zu erwartende Biegung am Stamm besteht ein großes Interesse, die Wurzel samt umgebendem Erdreich zu modellieren, um eine realistischere Randbedingung/Einspannung beim Anprall zu erhalten. Die Tiefe und der Durchmesser der Wurzel wurden bei mehreren Bäumen vermessen und als Verhältnis zum Brusthöhendurchmesser des Baumes angegeben.

4.3.6.1 Materialien im FE Modell

Für die einzelnen Komponenten wurden folgende Materialkarten in der Software LS-Dyna mit den entsprechenden (geforderten) Eigenschaften verwendet:

- Baum: Mat_Wood_Fir oder Pine (vordefiniertes, validiertes Material in LS-Dyna)
 - o Ausgewählte Dichte: 430kg/m³
 - o Orthotrope Ausrichtung des Holzes wird über einen Vektor definiert.
 - o Mit dem Zusatz Fir/Pine werden jeweils die Daten für das entsprechende Holz geladen. (Feuchte, Festigkeiten, Versagenskriterien)
- Erdreich: Mat_Elastic (unterteilt in verschiedene Bereiche $p, E=f(1/r^6)$ [27])
 - o 5 Bereiche definiert (berücksichtigt die Abnahme der radialen Wurzel/Erdreichfläche)
 - o Dichte, ρ : Von 430kg/m³ bis 1600kg/m³
 - o E-Modul, E : von 11000N/mm² bis 170N/mm²
- Erdreich: Mat_Drucker_Prager ergänzt mit Mat_Add_Erosion [27]
 - o Dichte: 1600kg/m³
 - o Schubmodul: 2.2N/mm²
 - o Querkontraktion: 0.25
 - o Reibungswinkel: 36Grad
 - o Kohäsionswert C : 0.0062N/mm² (Schubspannung)
 - o Versagenskriterium in Zugrichtung: 0.0035N/mm²

4.3.6.2 Simulationsmatrix

Die Anprallsimulation mit einem Baum wurde mit zwei verschiedenen Geschwindigkeiten, fünf unterschiedlichen Baumdurchmessern und zwei Anprallkonfigurationen durchgeführt (siehe Tabelle 36). Hieraus ergeben sich in Summe 20 numerische Berechnungen. Bei

einem Frontalanprall an einem Baum mit 150 mm Durchmesser (150f) bei 100km/h wurde eine zusätzliche Simulation aufgebaut, die durch ein feineres Netz des Baumes Unterschiede in der Berechnung in Abhängigkeit von der Elementgröße aufzeigen soll.

Tabelle 36: Anprallsimulationsmatrix Baum

Frontalaufprall – Mitte			Seitenanprall – vor B-Säule	
v [km/h]	70	100	70	100
Durchmesser [mm]	50	50	50	50
	100	100	100	100
	150	150 + 150f	150	150
	250	250	250	250
	350	350	350	350

f ... fein vernetzt

Der kleinste Baumdurchmesser wurde mit 50 mm gewählt und um jeweils 100 mm bis schlussendlich 350 mm erhöht. Aufgrund bereits durchgeführter Studien, die eine Baumkollision bei einem Durchmesser ab 300mm als lebensbedrohlich einstufen, wurde als letzter Durchmesser 350 mm mitberücksichtigt.

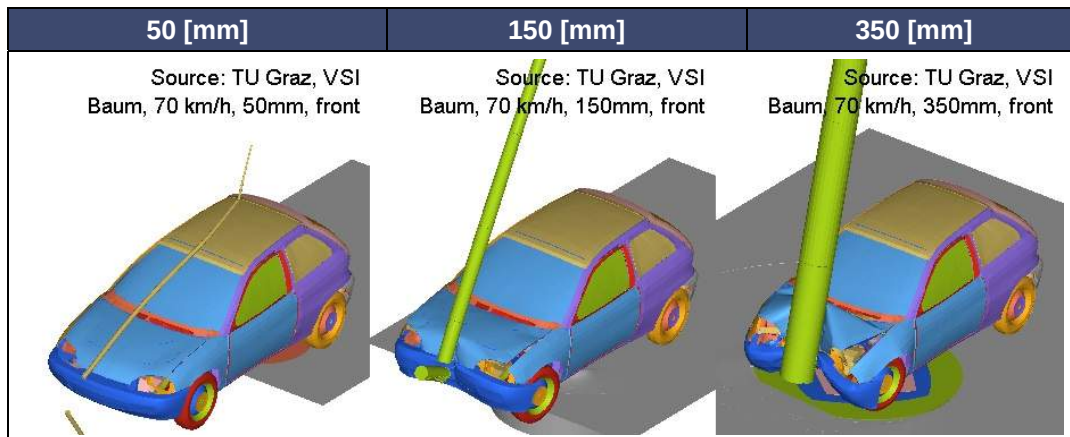
4.3.6.3 Simulationsergebnisse Baumkollisionen

Die ASI Werte liegen bis zu einem Baumdurchmesser von 150 mm im Bereich der Anprallheftigkeit A ($ASI < 1,0$), ausgenommen Seitenanpralle bei 70km/h (siehe Tabelle 37). In diesem Fall beträgt der ASI 1,1. Bis zu einem Durchmesser von 250 mm liegen Baumkollisionen im Bereich der Anprallheftigkeit B. Das heißt, der ASI liegt unter 1,4. Ab einem Durchmesser von 250mm wird bei einem Seitenanprall mit 70 km/h die Anprallheftigkeitsstufe B ($ASI > 1,4$) überschritten. Der ASI beträgt dann in etwa 2,29.

Einhergehend mit einem höheren ASI steigt auch die Beschädigung am Fahrzeug deutlich an (siehe Abbildung 49 bis Abbildung 52). Dies ist insbesondere bei Seitenkollisionen zu beobachten, wo bereits ab Baumdurchmesser > 150 mm Intrusionen in die Fahrgastzelle auftreten können. Dies ist jedoch bei bloßer Betrachtung des ASI nicht ersichtlich. Grundsätzlich sind bei seitlichen Kollisionen die ASI Werte tendenziell mehr als doppelt so hoch wie bei einem Frontanprall.

Tabelle 37: ASI, THIV und Delta-v für Baumkollisionen

Anprall	Geschwindigkeit	ASI				
		50 [mm]	100 [mm]	150 [mm]	250 [mm]	350 [mm]
Frontal	70 [km/h]	0,09	0,09	0,65	1,27	1,93
	100 [km/h]	0,07	0,09	0,42	0,88	1,62
	100 [km/h] ¹			0,74		
Seite	70 [km/h]	0,13	0,20	1,10	2,29	2,54
	100 [km/h]	0,13	0,17	0,91	1,68	3,25
Anprall	Geschwindigkeit	THIV [km/h]				
		50 [mm]	100 [mm]	150 [mm]	250 [mm]	350 [mm]
Frontal	70 [km/h]	0,6	1,7	13,3	27,0	40,8
	100 [km/h]	0,5	2,0	18,2	17,4	29,4
Seite	70 [km/h]	3,4	5,0	15,7	44,7	47,7
	100 [km/h]	4,2	5,4	10,4	15,8	57,6
Anprall	Geschwindigkeit	Delta-v [km/h]				
		50 [mm]	100 [mm]	150 [mm]	250 [mm]	350 [mm]
Frontal	70 [km/h]	1	2	10	25	37
	100 [km/h]	1	2	7	16	31
Seite	70 [km/h]	1	3	15	70	70
	100 [km/h]	1	4	13	22	56

¹fein vernetzt

Abbildung 49: Vergleich der Deformationsbilder beim Frontanprall an einen Baum bei unterschiedlichen Baumdurchmessern und einer Anprallgeschwindigkeit von 70 km/h

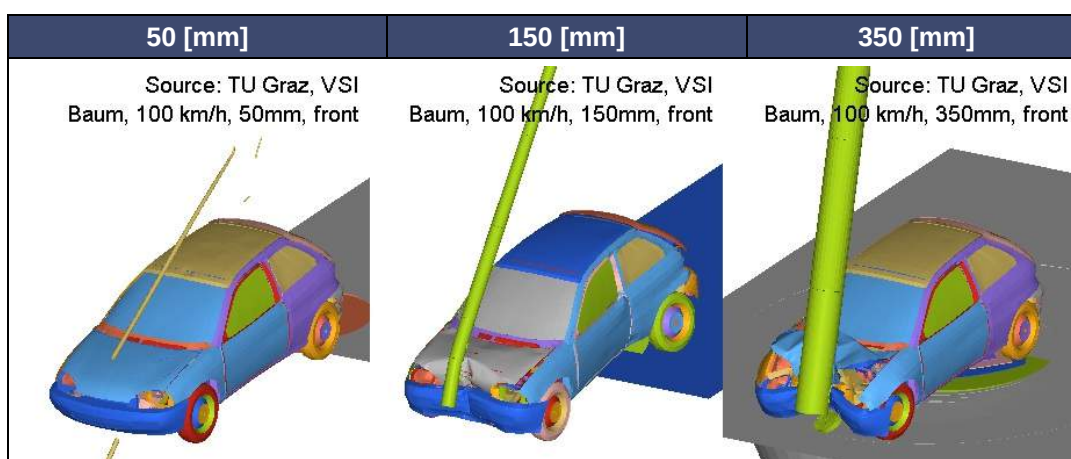


Abbildung 50: Vergleich der Deformationsbilder beim Frontanprall an einen Baum bei unterschiedlichen Baumdurchmessern und einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h

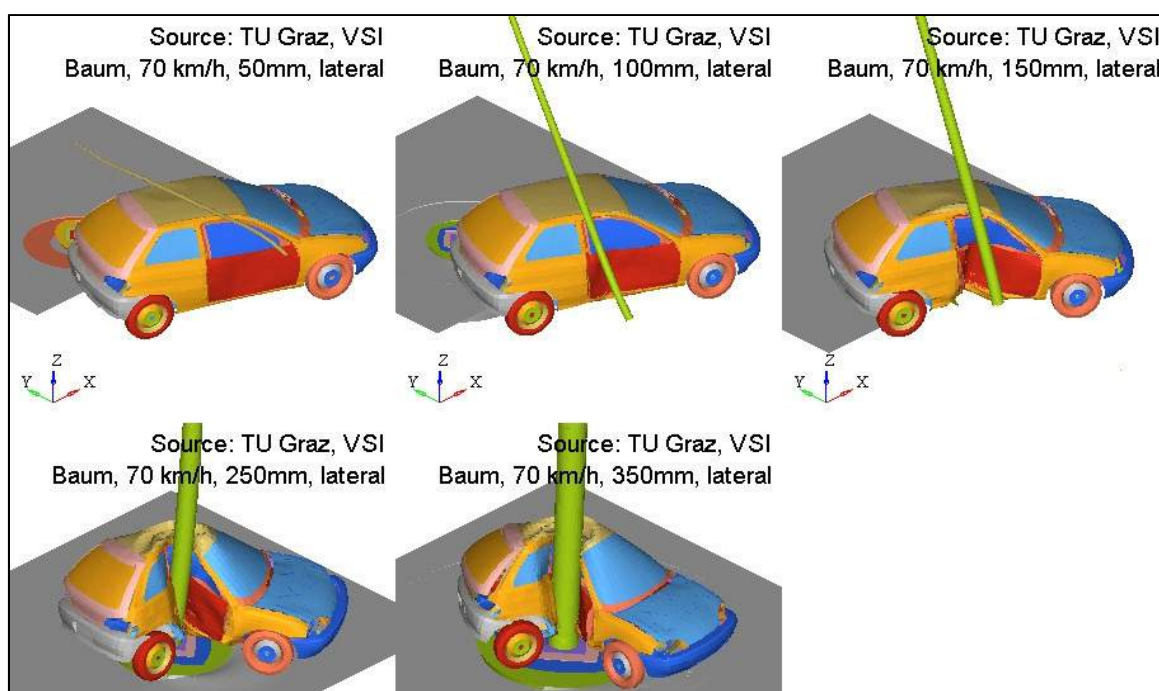


Abbildung 51: Vergleich der Deformationsbilder beim Seitenanprall an einen Baum bei unterschiedlichen Baumdurchmessern und einer Anprallgeschwindigkeit von 70 km/h

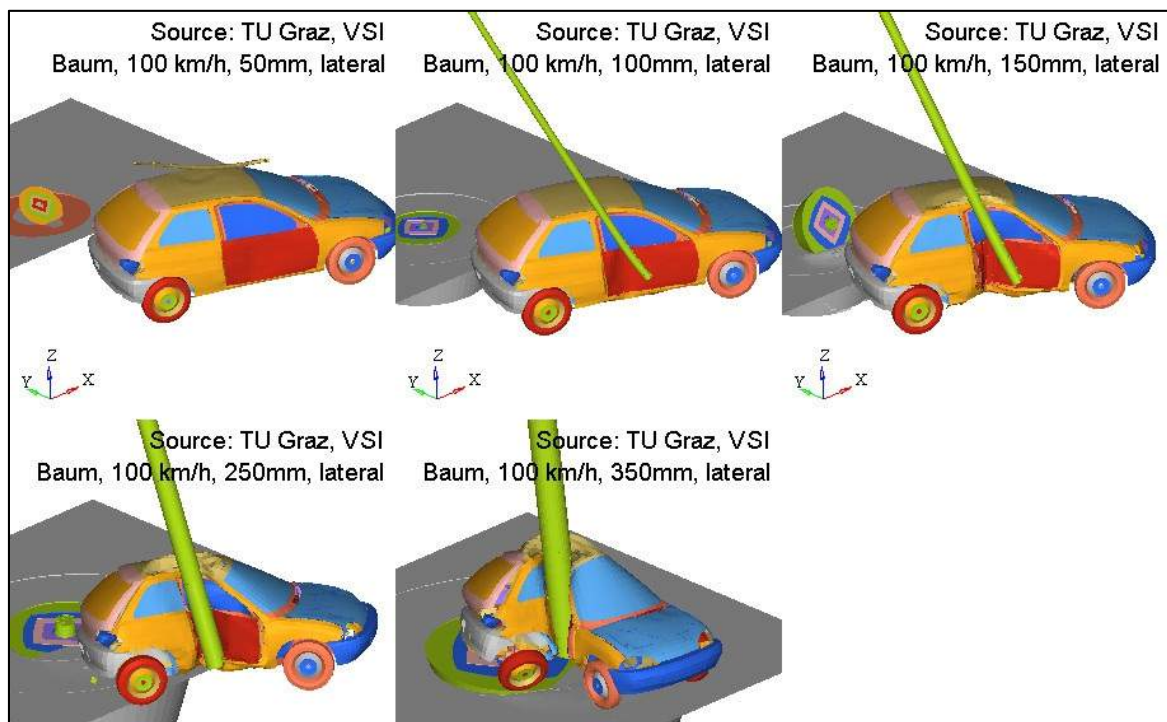


Abbildung 52: Vergleich der Deformationsbilder beim Seitenanprall an einen Baum bei unterschiedlichen Baumdurchmessern und einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h

Bis auf den seitlichen Anprall bei 350 mm Baumdurchmesser und 70 km/h wurde bei allen zugrundeliegenden Simulationen der Baum jeweils in der Nähe der Wurzel abgesichert.

Werden die Simulationsergebnisse mit dem sehr feinen Elementnetz bei einem Frontanprall bei 100 km/h und einem Baumdurchmesser von 150 mm mit dem gröberen Elementnetz verglichen, ist ein Anstieg des ASI-Wertes um 75% festzustellen. Diese Abweichung ist teilweise auf die Elementlöschungen des Materialmodells zurückzuführen, welche die Querschnittsflächen reduzieren und dadurch den Bruch beschleunigen. Der Grund für die Simulation nur eines einzigen Modells mit feinem Netz liegt in der benötigten Zeit eines Berechnungsdurchlaufs. Hierbei dauerte die Rechnung bei 96 verwendeten Prozessoren zumindest vier Tage für 100ms Modelllaufzeit.

Eine Betrachtung des ASI bei einem Baumanprall scheint im ersten Moment ausreichend. Wie bereits erwähnt wurde, darf die Möglichkeit von Intrusionen nicht unberücksichtigt bleiben. Ebenso wie bei den vorangegangenen Anprallobjekten kommt es auch beim Baumanprall, insbesondere bei einer seitlichen Kollision, zu Intrusionen in die Fahrgastzelle (siehe Abbildung 53). Bei Kollisionsgeschwindigkeiten von 70 km/h und Baumdurchmesser bis zu 100 mm liegen in der Simulation keine tiefen Intrusionen in die Fahrgastzelle vor. Bei 100 mm wird zwar der Türschweller leicht verformt, jedoch sollten keine der Intrusionen in die Fahrgastzelle reichen.

Bei einer seitlichen Kollision an einen Baum mit einem Durchmesser von etwa 150 mm wird der Türschweller ca. 250 mm verformt. Dadurch, dass sich während des Anpralls der Baum auf die Seite neigt, ist eine Intrusion auf der Höhe des Dachrahmens bei etwa 100 mm beobachtbar. Ein ähnliches Verformungsbild ist beim Seitenanprall mit 100 km/h und einem Baumdurchmesser von 150 mm feststellbar. Die Verformungstiefe am Türschweller reicht bis ca. 300 mm, auf der Höhe des Dachträgers liegt eine Intrusion von bis zu 100 mm vor. Bäume mit Durchmesser von 200 mm wurden nicht gerechnet. Es wird ein linearer Anstieg der Werte zwischen 150 mm und 250 mm angenommen.

Verletzungen bei Baumkollisionen selbst mit Durchmesser von 50 mm können nicht ausgeschlossen werden. Durch den Anprall selbst können Insassen mit Teilen des Fahrzeuginnenraums wie beispielsweise der B-Säule kollidieren. Durch vorhandene Airbag Systeme sollte die Verletzungsschwere jedoch verringert werden.

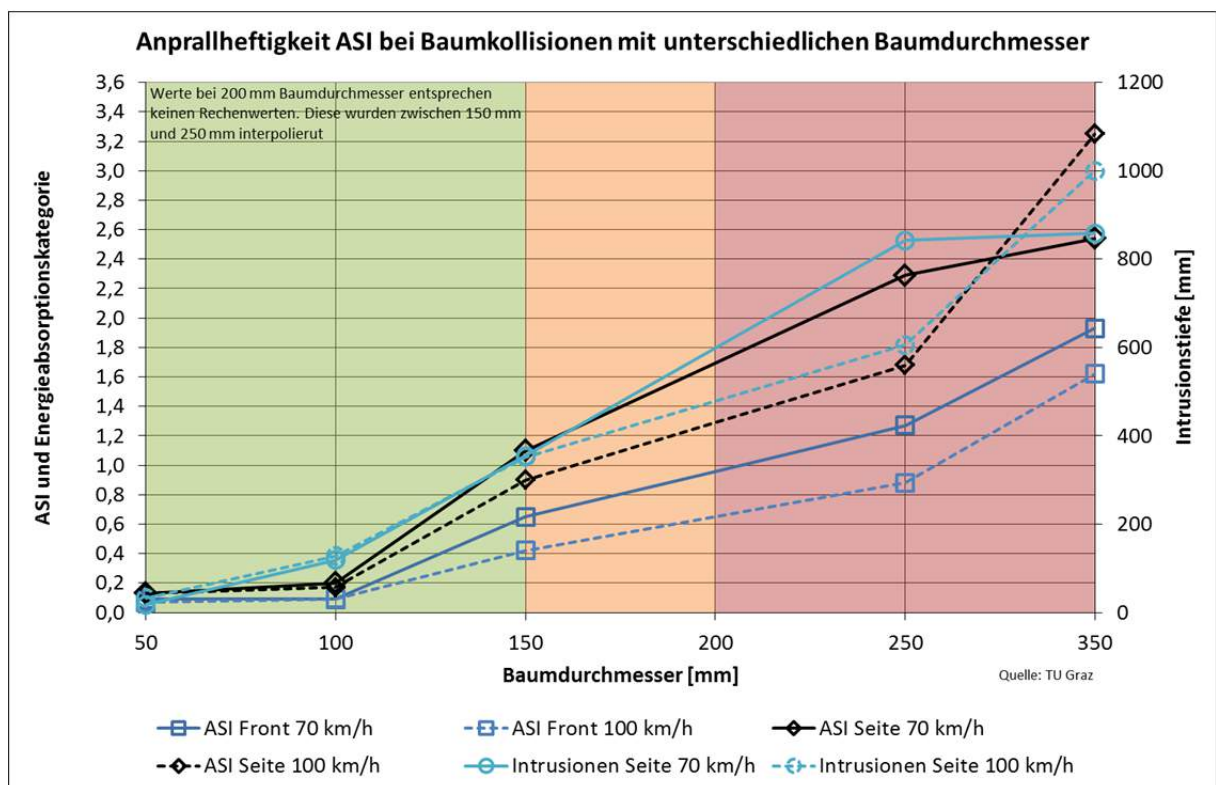


Abbildung 53: Anprallheftigkeit ASI bei Baumkollisionen mit unterschiedlichem Durchmesser und Anprallgeschwindigkeiten

4.3.6.4 Einschränkungen

- Es wurde nur ein Material berücksichtigt: Tanne (Weichholz)

- Das in LS-Dyna hinterlegte Materialmodell ist validiert. Jedoch sind Empfehlungen für Eingabeparameter, wie z.B. die Feuchte, für diese Simulationen übernommen worden. Dies kann durchaus zu abweichenden Ergebnissen führen.
- Erdreich, Wachstum und Umwelteinflüsse in Abhängigkeit von der Region können die Simulationsergebnisse verändern.
- Ebenfalls kann es zu nicht unbeträchtlichen Dichteabweichungen kommen die ebenfalls den ASI Wert anheben können.

4.3.7. Einschränkungen zu den Simulationen

Das für die Berechnung der einzelnen Kollisionsobjekte verwendete Fahrzeugmodell wurde mittels Geo Metro definiert. Dies entspricht einem Fahrzeug zwecks Prüfung von Fahrzeugrückhaltesystemen nach EN 1317 mit einer Masse von rd. 926 kg. Das verwendete Fahrzeug ist zwar nicht für alle Lastfälle optimiert, wird jedoch bei Anprallprüfungen nach EN 1317 verwendet. Die Ergebnisse der Simulationen lassen sich auf das Zusammenspiel des verwendeten Fahrzeugmodells mit den jeweiligen Kollisionsobjekten zurückführen. Werden andere Fahrzeugtypen für die Bewertung von diesen Kollisionsobjekten herangezogen, können sich die Ergebnisse deutlich von den gegenständlichen unterscheiden. Tendenziell wird aber für ein größeres und somit schwereres Fahrzeug die Insassenbelastung geringer ausfallen. Zur Absicherung der Ergebnisse wären stichprobenartig weitere Simulationen notwendig.

Neben der Wahl des Fahrzeuges gelten die Ergebnisse auch nur für die jeweiligen Materialdaten der verwendeten Hindernisse. Eine Extrapolation auf andere Materialdaten, konstruktive Ausführungen (z.B. Sollbruchstellen), Bodenbefestigungen etc. ist nicht möglich. Ebenfalls lässt sich keine Aussage tätigen, wenn das Fahrzeug in einem anderen Winkel auf das Objekt auftrifft bzw. mit einer niedrigeren/höheren Geschwindigkeit, da hierbei die energieübertragenden Bauteile und Strukturen nicht in gleicher Weise wirken. Die Anprallwinkel wurden entsprechend der Normen EN 1317 sowie EN 12767 gewählt. Erfolgt ein Anprall an ein Hindernis, wo die Anprallrichtung einen wesentlichen Einfluss auf die Insassenbelastung hat, können die Belastungen auf die Insassen auch deutlich von den Ergebnissen der gegenständlichen Studie abweichen. Bei einer Kollision an einen I-Träger, wie es beispielsweise bei Lärmschutzwänden mit vorheriger Leitschienenanrammung möglich ist, ist es möglich, dass der I-Träger nicht abgeschert wird und massive Intrusionen in die Fahrgastzelle vorliegen und es zu schwersten Verletzungen der Insassen kommt. Eine Kollision mit einem I-Träger der hier untersuchten Abmaße und Materialda-

ten unter einem Anprallwinkel von 20° lässt ein Abscheren des Bauteils aus der Simulation ableiten. Ob es sich nun im realen Unfallgeschehen mit abweichenden Materialien und anderen Fahrzeugen genauso verhalten wird, kann nicht gesagt werden.

Ähnliches lässt sich auch für Kollisionen mit Rohrrahmen und Gittersteherkonstruktion zusammenfassen.

Bei den Baumkollisionen wurde auf Grund von fehlenden Realtests auf Parameter aus der Literatur zurückgegriffen. Hierbei wurde ein validiertes Baummodell verwendet, welches einer Tanne entspricht. Für andere Holzarten sind (derzeit) keine Modelle vorhanden. Es könnten allerdings Prinzipversuche zur Validierung anderer Baumarten durchgeführt werden, um so weitere Holzarten zu untersuchen. Die aus der Literatur verfügbaren Parameter können nun für einen Fall begünstigend wirken, für den anderen jedoch nicht. Es hat sich ferner gezeigt, dass die Netzgröße beim Baum einen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Auf Grund der dazu benötigten gravierend längeren Simulationszeit wurde allerdings nur für einen Baumdurchmesser ein feineres Netz verwendet, wobei sich der ASI Wert fast verdoppelte.

Die Bewertung der Insassensicherheit erfolgte nach dem ASI bzw. durch Übertragungsfunktionen aus der Literatur auf den HIC. Der ASI wird aus Beschleunigungswerten, welche von Beschleunigungssensoren am Mitteltunnel gemessen werden, errechnet und mit einem HIC korreliert. Es wird allerdings der HIC nicht direkt über Beschleunigungswerte von Insassen (Dummy) errechnet. Es erfolgt lediglich eine Bewertung mittels Wahrscheinlichkeitsfunktionen aus der Literatur. Bei einem Anprall wird von den Beschleunigungssensoren am Mitteltunnel ein Beschleunigungssignal aufgezeichnet. Bei unterschiedlichen Anprallgeschwindigkeiten können Abweichungen im Deformationsverhalten auftreten, welche einen Einfluss auf diese Beschleunigungen haben. Beispielsweise kann bei einer Kollision mit einem Baum bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h das Fahrzeug vollständig zum Stillstand kommen und bei einer Anprallgeschwindigkeit von 70 km/h der Baum abgescheret werden und das Fahrzeug fährt mit 50 km/h weiter. In dem ersten Fall hat der Insasse im weitesten Sinne eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung von 50 km/h ertragen und im zweiten Beispiel lediglich 20 km/h. Ähnliches kann für den ASI gelten. Hierbei spielt das Deformationsverhalten (Falten, Knicken der Struktur) des Fahrzeugs eine wesentliche Rolle. Ein niedriger Beschleunigungsverlauf und daher ein niedriger ASI gehen lt. Literatur mit niedrigen HIC-Werten einher, jedoch ist der HIC ein auf Beschleunigungen reduziertes Verletzungskriterium welches nicht als einziges optimiert wird. Optimiert heißt in diesem Fall die Auslegung von Sicherheitssystemen im Fahrzeug

wie beispielsweise Gurtsystem, Airbag, etc. Ein niedriger HIC wird ebenfalls erreicht, wenn der gesamte Frontbereich deformiert wird. Die hier simulierten Anprallobjekte haben allerdings eine eher punktuelle Anprallsituation. Insbesondere bei der Seitenkollision ist die Bewertung der Insassensicherheit durch den ASI bzw. HIC nicht ausreichend, da tiefe Intrusionen vorliegen können, welche durch den Kontakt mit dem Insassen zu massiven Verletzungen führen.

Die Ergebnisse der Simulationen erfolgten auf Grund von Berechnungen und eine Extrapolation bzw. schätzen von anderen Geschwindigkeiten bzw. Anprallpositionen ist daher nicht möglich.

4.3.8. Schlussfolgerungen der Anprallsimulationen

Tabelle 38: Überblick über die Simulationsergebnisse nach Anprallobjekten

Kollisions- objekt	Material	Kollisions- szenario	Anprall- winkel [°]	Anprallge- schwindigkeit [km/h]	ASI	Intrusi- onen [mm]	Anmer- kungen	
Lichtmast	Alu	Frontal	0	70	4,4	-		
			0	100	3,6	-		
			45	100	0,6	-		
			90	100	1,9	-		
		Seitlich	45	70	3,0	-		
				100	4,4	-		
VZ auf I- Träger	Alu	Frontal	20	70	0,35	-		
				100	0,24	-		
					0,71	-	20% Versagen	
					3,19	-	kein Versagen	
				130	0,30	-		
		Seitlich	20	70	073	330		
				100	0,57	280		
					0,75	410	20% Versagen	
					2,79	-	kein Versagen	
				130	0,56	280		
Rohrrah- mensteher	Stahl	Frontal	20	70	0,18	-		
				100	0,19	-		
					0,32	-	50% Versagen	
					2,87	-	kein Versagen	
				130	0,24	-		
		Seitlich		20	70	0,41	140	
					100	0,41	220	
						0,67	280	50% Versagen
						2,31	-	kein Versagen
					130	0,43	255	

Kollisions- objekt	Material	Kollisions- szenario	Anprall- winkel [°]	Anprallge- schwindigkeit [km/h]	ASI	Intrusi- onen [mm]	Anmer- kungen
Gitter- steher	Stahl	Frontal	20	70	0,79	-	
				100	0,65	-	
					1,40	-	50% Versagen
					3,70	-	kein Versagen
				130	0,76	-	
		Seitlich	20	70	1,44	400	
				100	1,41	435	
					2,01	375	50% Versagen
					2,75	-	kein Versagen
				130	1,44	510	
Baum	Tanne	Frontal	0	70	0,09	-	Ø 50 mm
					0,09	-	Ø 100 mm
					0,65	-	Ø 150 mm
					1,27	-	Ø 250 mm
					1,93	-	Ø 350 mm
						-	
				100	0,07	-	Ø 50 mm
					0,09	-	Ø 100 mm
					0,42	-	Ø 150 mm
					0,88	-	Ø 250 mm
					1,62	-	Ø 350 mm
		Seitlich	0	70	0,13	20	Ø 50 mm
					0,20	120	Ø 100 mm
					1,10	355	Ø 150 mm
					2,29	840	Ø 250 mm
					2,54	860	Ø 350 mm
				100	0,13	35	Ø 50 mm
					0,17	130	Ø 100 mm
					0,91	350	Ø 150 mm
					1,68	605	Ø 250 mm
					3,24	1000	Ø 350 mm

Lichtmast

Bei der Anprallsimulation an einen Lichtmast (entsprechend der zur Verfügung stehenden Konstruktionszeichnungen) ist sowohl für den Front- als auch den Seitenanprall ein ASI von mehr als 1,9 zu verzeichnen.

VZ auf I-Träger

Die Simulationen des VZ auf I-Träger ergaben ASI Werte für den frontalen Anprall im Bereich zwischen 0,3 und 0,35. Im Falle eines Seitenanpralls lag der ASI zwischen 0,55 und 0,75. Es kommt allerdings zu Intrusionen in die Fahrgastzelle, welche bis ca. 330 mm reichen können. Wird die Seitenkollision mit 20% Versagenskriterium betrachtet, ergibt sich bei einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h ein ASI von 0,75. Die Intrusionen können dabei jedoch bis 410 mm in die Fahrgastzelle reichen.

Rohrrahmensteher

Der ASI für die Anprallsimulation an einen Rohrrahmen liegt bei Seitenkollisionen im Bereich von 0,4. Im Falle einer Frontkollision beträgt der ASI in etwa 0,2. Intrusionen in die Fahrgastzelle können für den Seitenanprall und einer Anprallgeschwindigkeit von 130 km/h bis zu 250 mm festgestellt werden. Für Anprallgeschwindigkeiten von 70 km/h wäre eine Intrusion bis zu ca. 150 mm möglich (basierend auf dem vorliegenden Simulationsmodell). Unter der Annahme eines 50% Versagenskriteriums ergibt sich beim Seitenanprall mit 100 km/h ein ASI von ca. 0,67 mit Intrusionstiefen bis zu ca. 280 mm.

Gittersteher

Erfolgt ein Anprall an einen Gittersteher mit der Fahrzeugfront, ist ein ASI Wert von bis zu 0,8 möglich. Bei einem Seitenanprall ist der ASI wesentlich höher und liegt im Bereich von 1,45. Zusätzlich sind bei Seitenkollisionen Intrusionen in die Fahrgastzelle möglich, welche bis zu 500 mm reichen können.

Bäume

Für Kollision mit Bäumen wurden unterschiedliche Kollisionsgeschwindigkeiten und Baumdurchmesser simuliert. Ab einem Baumdurchmesser von 150 mm steigen der ASI als auch die Intrusionstiefe deutlich an. Bei einer Seitenkollision mit 70 km/h bzw. 100 km/h Anprallgeschwindigkeit sind ASI Werte von etwa 0,9 bis 1,0 zu erwarten. Die Intrusionen in die Fahrgastzelle belaufen sich hierbei auf bis zu 400 mm. Bei einem Frontanprall und einem Baumdurchmesser von 250 mm liegt bei einer Anprallgeschwindigkeit von 70 km/h ein ASI von in etwa 1,2 in den Simulationen vor.

4.4 Risikobewertung im Vergleich

4.4.1. Überlegungen zu Abkommenswinkel und -geschwindigkeit

HOSCHOPF et. al [28] definiert die Bewegungsbahn des Massenmittelpunkts eines Fahrzeugs beim Abkommen von der Straße als Funktion des seitlichen Abstands zum Fahrbahnrand sowie der Geschwindigkeit (siehe Abbildung 54). Grundannahme hierbei ist, dass das Verhalten des Fahrzeugs lediglich vom Steuersystem abhängt. Der maximale Abkommenswinkel (welcher dem Geschwindigkeitswinkel des Fahrzeugs beim Abkommen entspricht), kann mit Hilfe der Zentripetalbeschleunigung und dem maximalen seitlichen Reibungskoeffizienten abgeleitet werden. Im Rahmen der Arbeit wurde festgestellt, dass sich der Abkommenswinkel mit steigendem Reibungskoeffizienten und größerem seitlichen Abstand erhöht bzw. mit zunehmender Geschwindigkeit verringert.

Weiters wurde ein Zusammenhang zwischen Fahrzeugabstand und Fahrbahnseite (bezogen auf den Kurvenradius) hergestellt. Der Abkommenswinkel lässt sich in Kurven als Funktion von Kurvenradius und Seitenabstand, unter der Annahme, dass das Fahrzeug nicht nach außen gelenkt wird, eruieren.

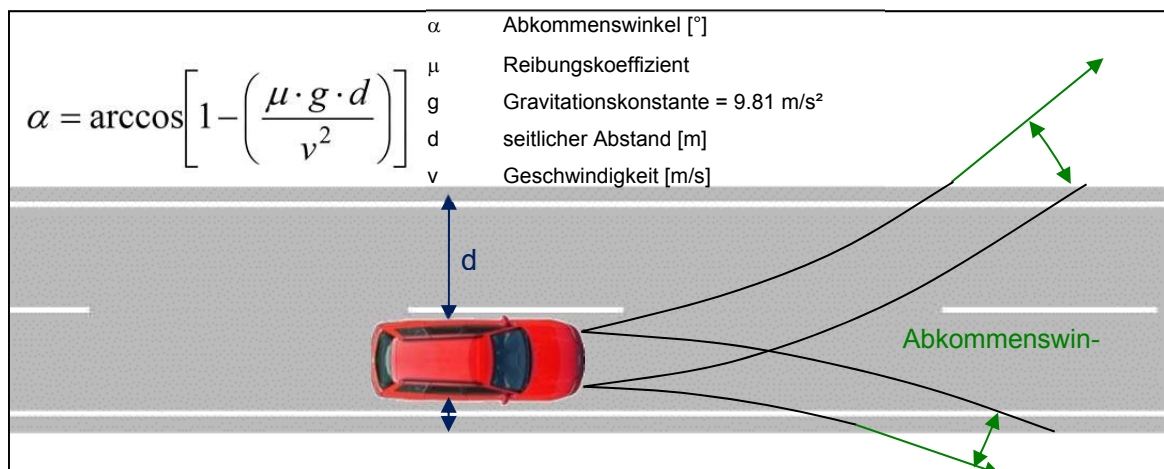


Abbildung 54: Theoretischer Abkommenswinkel in Bezug zum Seitenabstand auf gerader Fahrbahn

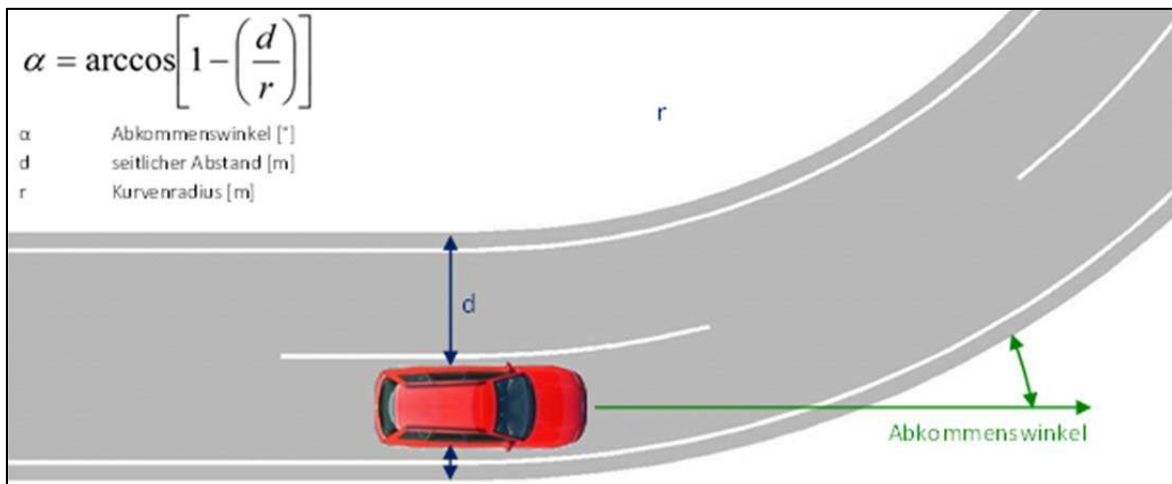


Abbildung 55: Theoretischer Abkommenswinkel in Bezug zum Seitenabstand bei Kurven

Diese Überlegungen gelten für das Einlenken und beziehen sich auf die Geschwindigkeitsrichtung des Fahrzeugs. Werden verschiedene Fahrmanöver durchgeführt (z.B. kombinierte Brems- und Lenkmanöver), können andere Situationen entstehen, wie beispielsweise ein Gieren des Fahrzeugs. Die Geschwindigkeitsrichtung und die Richtung des Fahrzeugs haben hierbei unterschiedliche Winkel, was zur Folge haben kann, dass das Fahrzeug seitlich gegen ein Objekt prallt. Diese Überlegungen gelten nicht für Situationen, wo das Fahrzeug schleudernd von der Fahrbahn abkommt.

Aus dem Vergleich der theoretischen Überlegungen mit Realunfalldaten lässt sich eine gute Übereinstimmung erkennen (siehe Abbildung 56 und Abbildung 57). Wie bei den theoretischen Überlegungen sinkt mit zunehmender Abkommensgeschwindigkeit der jeweilige Abkommenswinkel. Im theoretischen Modell wurde als Seitenabstand jener Abstand zum unbefestigten Fahrbahnrand gewählt, welcher sich beim Befahren des ersten Fahrstreifens (1 m ohne Pannestreifen bzw. 4 m unter Berücksichtigung des Pannestreifens) ergibt. Beim zweiten Fahrstreifen wird ein Seitenabstand von 7 m herangezogen. Mit zunehmendem Abstand des Fahrzeugs zum Fahrbahnrand nimmt auch der theoretisch mögliche Abkommenswinkel zu.

In Abbildung 56 und Abbildung 57 stellt jeder Punkt einen Realunfall dar, wobei durchaus auch mehrere Unfälle durch einen einzelnen Punkt repräsentiert sein können. In der Abbildung sind Abkommensunfälle dargestellt, unabhängig davon ob es zu einer Kollision mit einem FRS, einem Anprall an ein ortsfestes Hindernis oder einen Überschlag gekommen ist oder nicht. Es soll lediglich der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Winkel aufgezeigt werden.

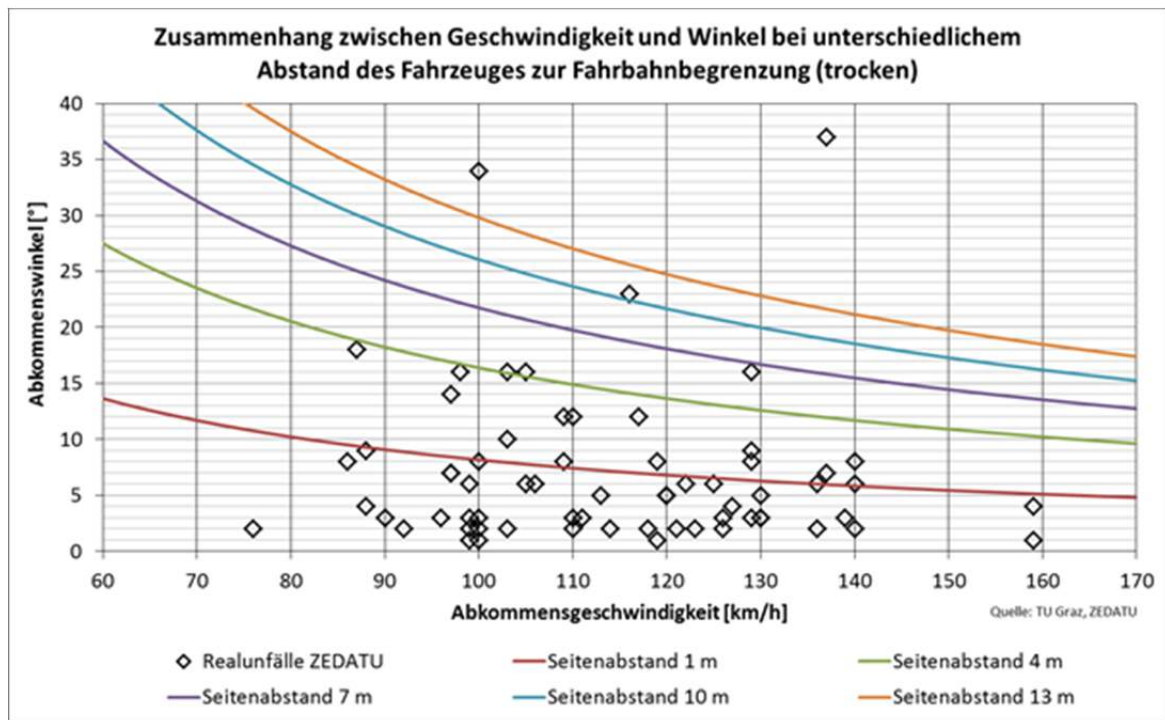


Abbildung 56: Zusammenhang zwischen Abkommensgeschwindigkeit und Abkommenswinkel von PKW bei unterschiedlichem Abstand zur Fahrbahnbegrenzung und trockener Straßen

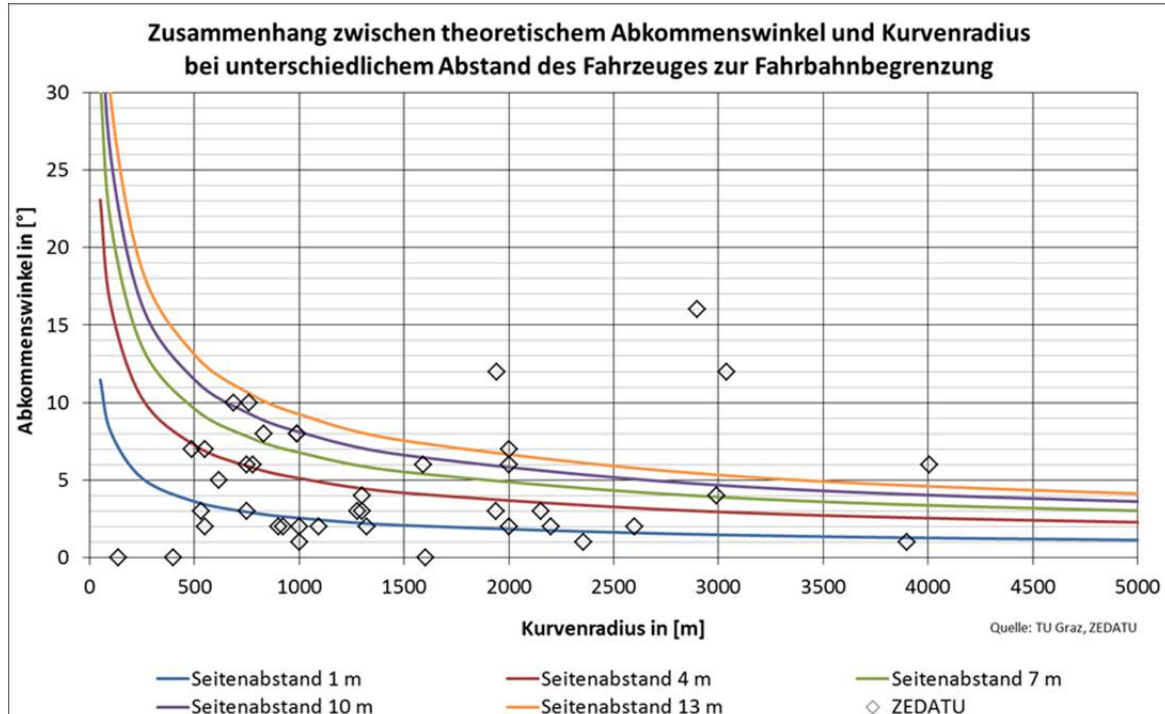


Abbildung 57: Zusammenhang zwischen Abkommensgeschwindigkeit und Abkommenswinkel von PKW bei unterschiedlichem Abstand zur Fahrbahnbegrenzung auf trockener Straße und Kurvenradius

Das arithmetische Mittel der Abkommengeschwindigkeit von Fahrzeugen ergibt einen Wert von 114,1 km/h (Standardabweichung (SD): 17,7 km/h) (siehe Abbildung 58). Der Mittelwert des Abkommenswinkels liegt hingegen bei 6,9° (SD=6,9°). Im Gegensatz dazu beträgt der Median⁶ der Abkommengeschwindigkeit rd. 113 km/h und der Medianabkommenswinkel liegt bei 5,0°. Die Einzelwerte sind Tabelle 39 zu entnehmen.

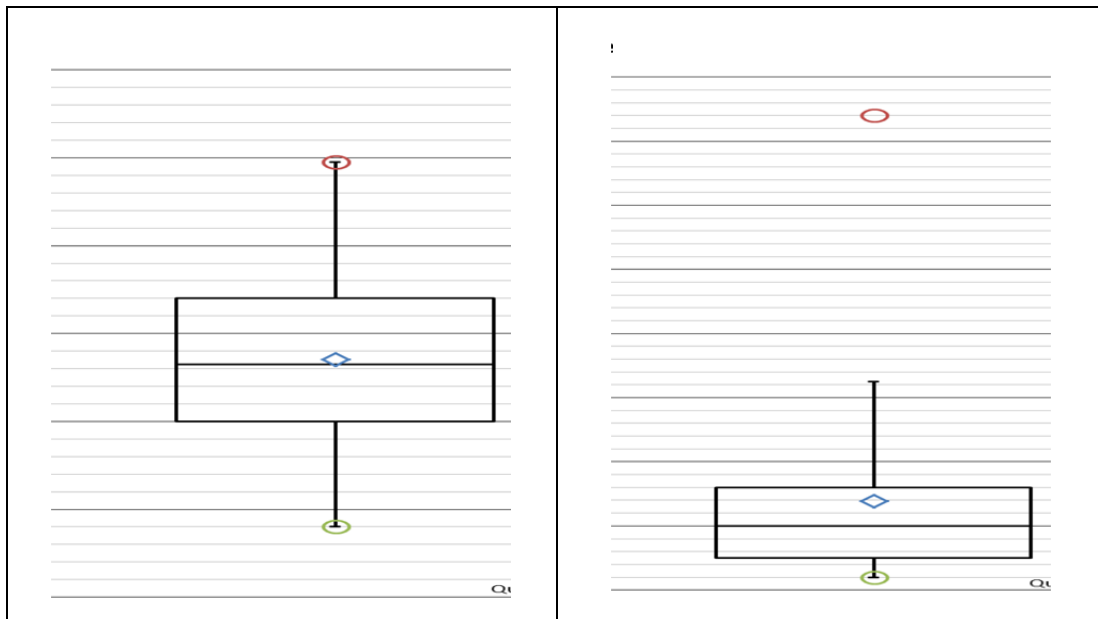


Abbildung 58: Verteilung der Abkommengeschwindigkeiten und Abkommenswinkel bei Realunfällen

Tabelle 39: Verteilung der Abkommengeschwindigkeiten und Abkommenswinkel bei Realunfällen

Kennwerte	Abkommengeschwindigkeit	Abkommenswinkel
	[km/h]	[°]
Mittelwert	114,1	6,9
Standardabweichung	17,7	6,9
5% Quantil	88,0	1,3
25% Quantil	100,0	2,5
50% Quantil	113,0	5,0
75% Quantil	128,0	8,0
85% Quantil	130,6	12,0
95% Quantil	140,0	17,4

Der Erstkontakt mit einem Hindernis erfolgt zu 56,7% mit der Front des Fahrzeugs (siehe Abbildung 59). Seitenkollisionen haben einen Anteil von rd. 24%. Kommt es zu einer Frontkollision, ist die Krafrichtung hauptsächlich zwischen 11 Uhr und 1 Uhr, wenn man

⁶Der Median teilt eine Liste von Werten genau in zwei gleich große Hälften.

das Fahrzeug aus der Vogelperspektive mithilfe des Ziffernblatts einer Uhr betrachtet (siehe Abbildung 60). Bei einer Seitenkollision hingegen liegt die Krafrichtung v.a. zwischen 1 Uhr und 11 Uhr bzw. 2 Uhr und 10 Uhr. Kollisionen mit der Fahrzeugseite erfolgen v.a. auf Grund eines vorhergehenden schleudernden Ereignisses.

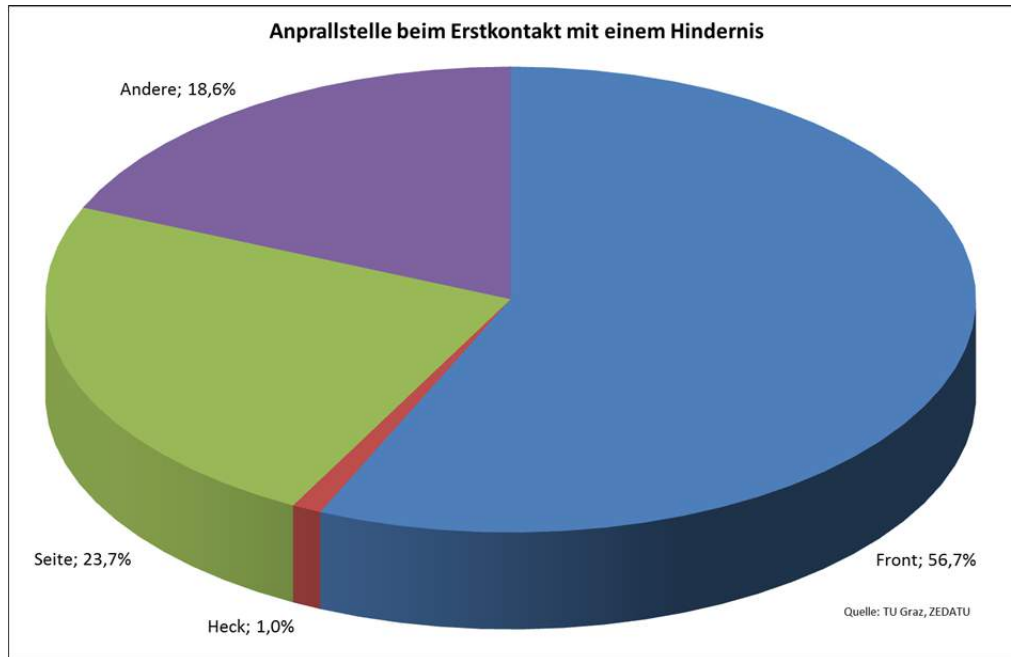


Abbildung 59: Anprallstelle am Fahrzeug beim Erstkontakt mit einem Hindernis am ASFINAG-Netz

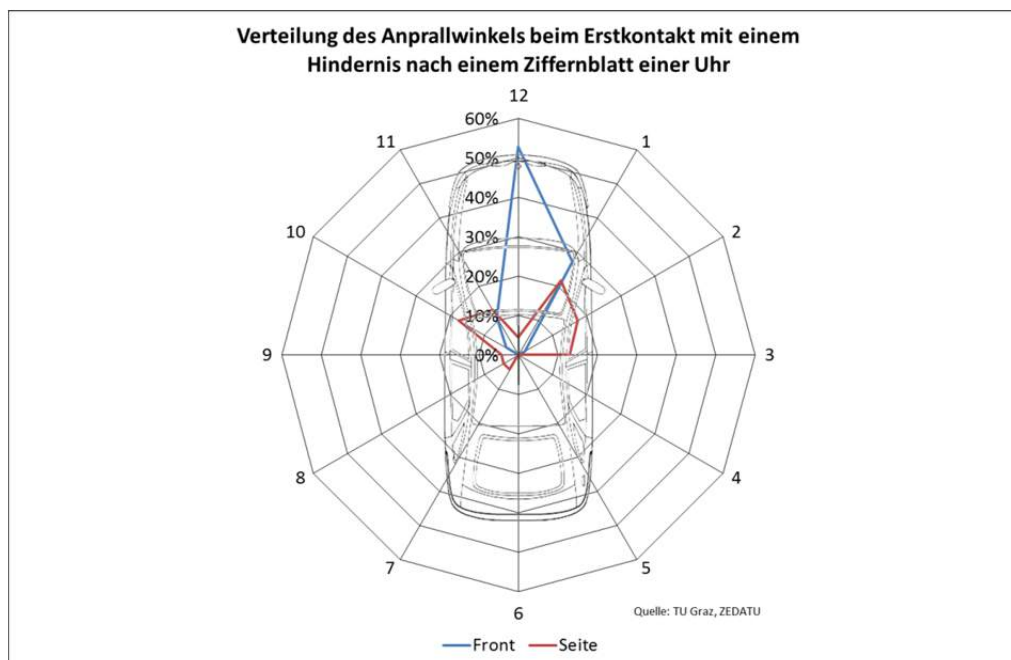


Abbildung 60: Anprallwinkel am Fahrzeug beim Erstkontakt mit einem Hindernis am ASFINAG-Netz

4.4.2. Überlegungen zur Abkommensdistanz am Fahrbahnrand

4.4.2.1 Theoretische Überlegungen

Sobald ein Fahrzeug von der Fahrbahn abkommt und eine Kollision mit einem ortsfesten Hindernis droht, sollte jedenfalls gewährleistet sein, dass der Anprall mit einem Geschwindigkeitsniveau geschieht, welches das Leben der Insassen nicht gefährdet.

Die heutigen Fahrzeuge sind auf bestimmte Testbedingungen optimiert (Euro NCAP [36] Frontaltest, Seitenkollision etc.), welche jedoch nicht die gesamte Bandbreite an Realunfällen abdecken [9]. Das Überleben der Insassen hängt in vielen Fällen davon ab, wie sich die Energie auf die energieabsorbierenden Strukturen (z.B. Längsträger) verteilt. Im EU Projekt RISER [9] wurde aus den zur Verfügung stehenden (Real-)Unfalldaten eine Kollisionsgeschwindigkeit von 40 km/h abgeleitet, welche ein ungesicherter Insasse überleben kann. Als Datenbasis dienten rekonstruierte Verkehrsunfälle der teilnehmenden Projektpartner. Hieraus wurde eine Kollisionsgeschwindigkeit ermittelt, welche als Grenzggeschwindigkeit für das Auftreten von schweren bzw. tödlichen Verletzungen herangezogen werden kann.

In einer zweiten Überlegung wird eine Kollisionsgeschwindigkeit von 64 km/h als Basis für die Dimensionierung der notwendigen (objektfreien) Seitenräume herangezogen. Diese Kollisionsgeschwindigkeit entspricht der Anprallgeschwindigkeit bei einem Euro NCAP Frontal-Crashtest und sollte von den Insassen bei Verwendung der (internen) Fahrzeugrückhaltesysteme (Sicherheitsgurt etc.) ohne schwerwiegende Verletzungen überlebbar sein. An dieser Stelle muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass diese Annahme nur unter der Voraussetzung gilt, dass die Kollisionsenergie vom Fahrzeug ideal absorbiert wird. Das heißt, energieabsorbierende Elemente wie beispielsweise Längsträger entfalten ihre volle Wirkung. Für Kollisionsobjekte, die so klein sind, dass ein Anprall zwischen den beiden Längsträgern möglich ist, sind in dieser Überlegung nicht zutreffend.

Der benötigte „Fahrzeugauslauf“ ergibt sich als eine Funktion der Geschwindigkeit, der Reibungsverhältnisse, des Abkommenswinkel sowie des Böschungswinkels (siehe Abbildung 61). Wird eine bestimmte Anprallgeschwindigkeit am Objekt für zulässig erachtet, kann diese ebenfalls mitberücksichtigt werden. Der Abstand e wird vom Fahrbahnrand bzw. der Böschungskante gemessen.

$$e = \frac{v^2 - v_k^2}{2 \cdot a} \cdot \sin(\varphi) = \frac{v^2 - v_k^2}{2 \cdot g \cdot (\mu \cdot \cos(\alpha) - \sin(\alpha))} \cdot \sin(\varphi)$$

e: Seitenabstand zum Kollisionsobjekt [m]

v: Abkommengeschwindigkeit [m/s]

v_k : Kollisionsgeschwindigkeit [m/s]

a: Verzögerung [m/s^2]

φ : Abkommenswinkel [$^\circ$]

g: Gravitationskonstante [$9,81 \text{ m/s}^2$]

μ : Reibungskoeffizient

α : Böschungswinkel [$^\circ$]

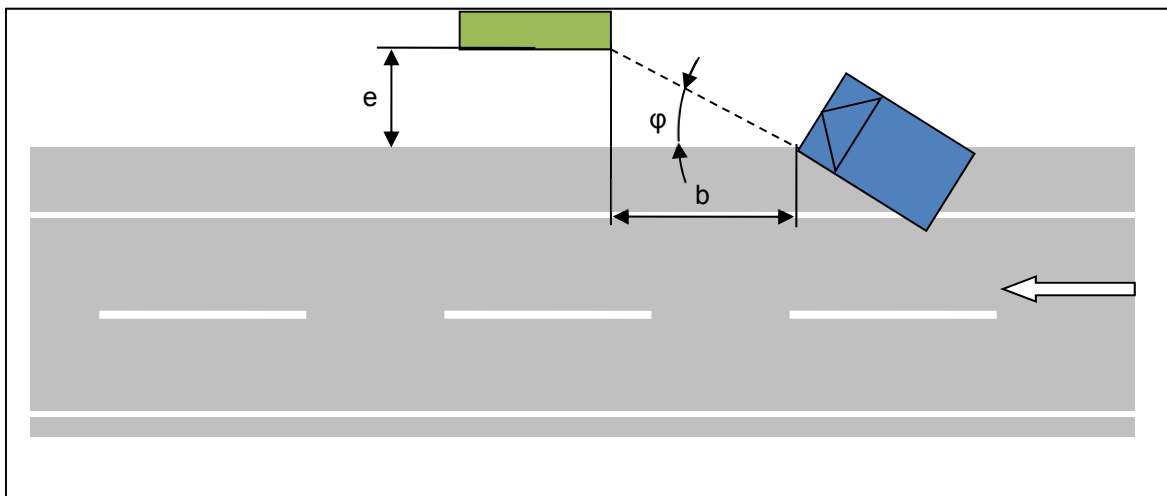


Abbildung 61: Bremsweg bei Abkommensunfällen und daraus abgeleiteter Seitenabstand

Für die Abschätzung des benötigten Seitenabstandes wurden folgenden Annahmen getroffen [28]:

- Im ungünstigsten Fall ergibt sich für ein abkommendes Fahrzeug ein Reibungskoeffizient von $\mu=0,3$ für nasses Gras (Ausnahme: eisiger Untergrund) und somit eine maximal mögliche Bremsverzögerung von $a=2,9 \text{ m/s}^2$.
- Die Verzögerung am Fahrbahnrand erfolgt ohne Lenkmanöver, die Bremsreaktion des Lenkers ist zu diesem Zeitpunkt bereits erfolgt (Reaktionsweg bleibt somit unberücksichtigt)⁷.
- Zulässige maximale Anprallgeschwindigkeit $v_k=40 \text{ km/h}$ bzw. 64 km/h
- Der seitliche Straßenbereich ist befahrbar, d.h. der Untergrund ist nicht weich, so dass sich beispielsweise Räder verhaken können.
- Gravitationskonstante $g=9,81 \text{ m/s}^2$

⁷ Die/Der Anhaltezeit/-weg ergibt sich aus der Reaktions-, Schwell- und Bremszeit/-weg

Der erforderliche seitliche Sicherheitsbereich (sogenannte Safety Zone) kann Abbildung 62 entnommen werden. Ein relativ niedriger Abkommenswinkel von 5° , eine Abkommensgeschwindigkeit von 100 km/h und eine zulässigen Kollisionsgeschwindigkeit von 40 km/h würden demzufolge einen Sicherheitsbereich von 9,5 m erfordern. Wird eine Kollisionsgeschwindigkeit von 64 km/h toleriert, beträgt die Sicherheitszone in etwa 7 m. Hierbei wird jedoch davon ausgegangen, dass der Abkommenswinkel auch tatsächlich beim Abkommen vorliegt.

In Abbildung 56 wurde dargelegt, dass der Abkommenswinkel mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt. Diesem Umstand wird in Abbildung 63 Rechnung getragen. Bei einem Seitenabstand des Fahrzeugs zum Fahrbahnrand von 4 m (entspricht in etwa der ersten Fahrspur) und einer Abkommensgeschwindigkeit von 100 km/h beträgt der Sicherheitsbereich 31 m. Es wird hierbei von einem ebenen Fahrbahnrand, einem Reibungskoeffizienten von $\mu=0,3$ und einer Kollisionsgeschwindigkeit von 40 km/h ausgegangen. Bei einer tolerierten Kollisionsgeschwindigkeit von 64 km/h, würde sich die erforderliche Breite der Sicherheitszone auf ca. 22 m reduzieren.

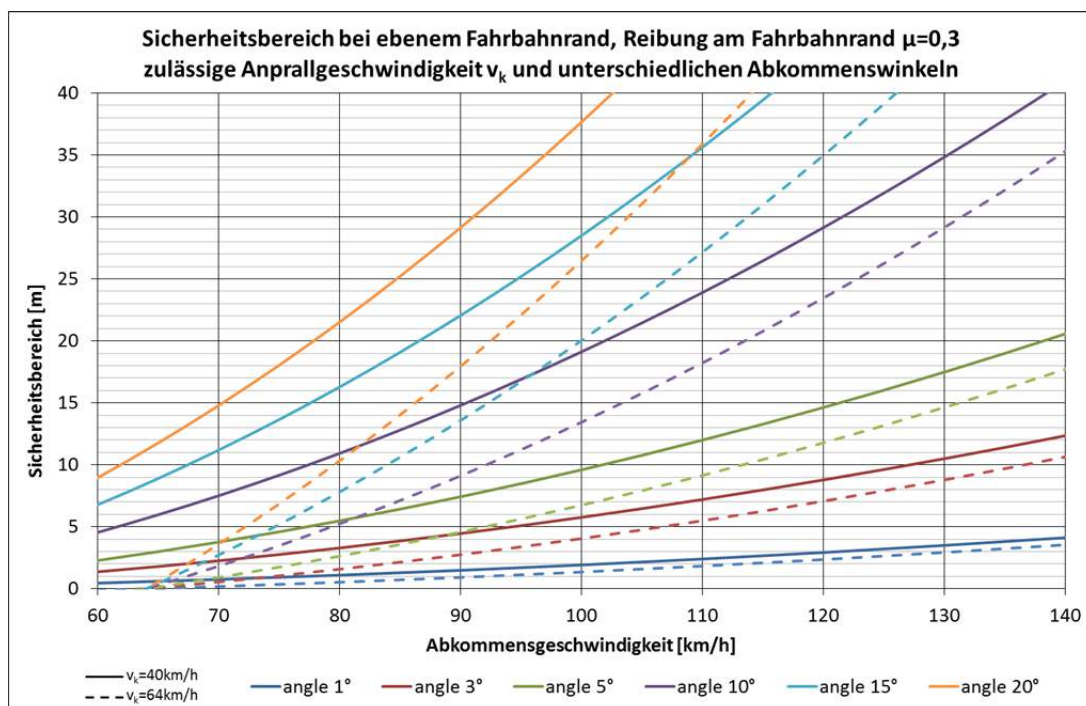


Abbildung 62: Sicherheitsbereich bei unterschiedlichem Abkommenswinkel, befahrbarem Fahrbahnrand und einer zulässigen Kollisionsgeschwindigkeit v_k

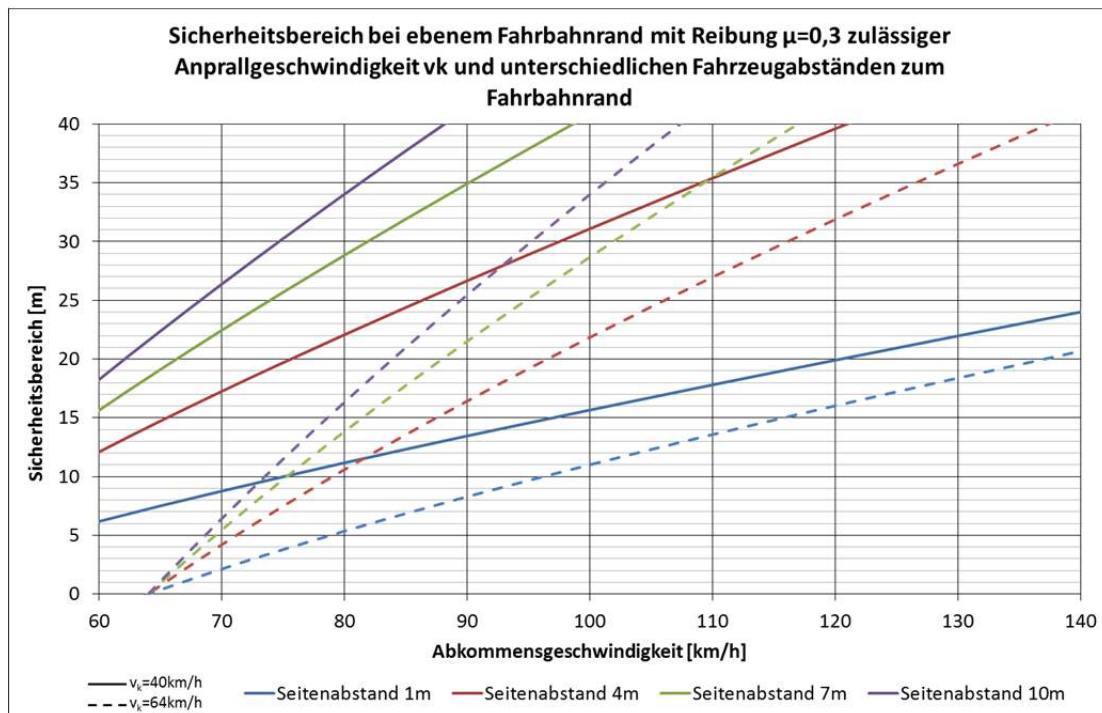


Abbildung 63: Sicherheitsbereich bei unterschiedlichem Seitenabstand des Fahrzeugs und erlaubter Kollisionsgeschwindigkeit v_k

Sofern eine Böschung am Fahrbahnrand vorliegt, ändert sich die erforderliche Breite der Sicherheitszone entsprechend Abbildung 64. Erfolgt ein Abkommen des Fahrzeugs unter einem Winkel von 5° , wäre bei einer Böschungsneigung von 2:1 und einer zulässiger Anprallgeschwindigkeit von 40 km/h eine Sicherheitszone von ca. 4 m notwendig. Eine tolerierte Kollisionsgeschwindigkeit von 64 km/h würde bei gleichen Anlageverhältnissen eine Sicherheitszone von 3 m notwendig machen.

Berücksichtigt man die theoretischen Abkommenswinkel aus Abbildung 56, wäre bei einem Fahrzeug auf dem ersten Fahrstreifen (Seitenabstand ca. 4 m) eine Sicherheitszone von 13 m erforderlich (siehe Abbildung 66). Bei einer zulässigen Kollisionsgeschwindigkeit von 64 km/h beträgt die Sicherheitszone ca. 9 m. Die gerechneten Ergebnisse für Böschungen mit einer bestimmten Steigung gelten nur für jene Situationen, wo die Böschung direkt an die Fahrbahn angrenzt. Sofern ein ebener befahrbarer Seitenstreifen vorliegt, ist dieser in den Auslegungen jedenfalls zu berücksichtigen.

Durch die Böschungsneigung reduziert sich die Sicherheitszone im Vergleich zu einem ebenen Fahrbahnrand von 31 m auf ca. 13 m unter der Annahme einer tolerierten Kollisionsgeschwindigkeit von 40 km/h. Bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 64 km/h verringert sich die erforderliche Sicherheitszone im Vergleich auf ca. 9 m.

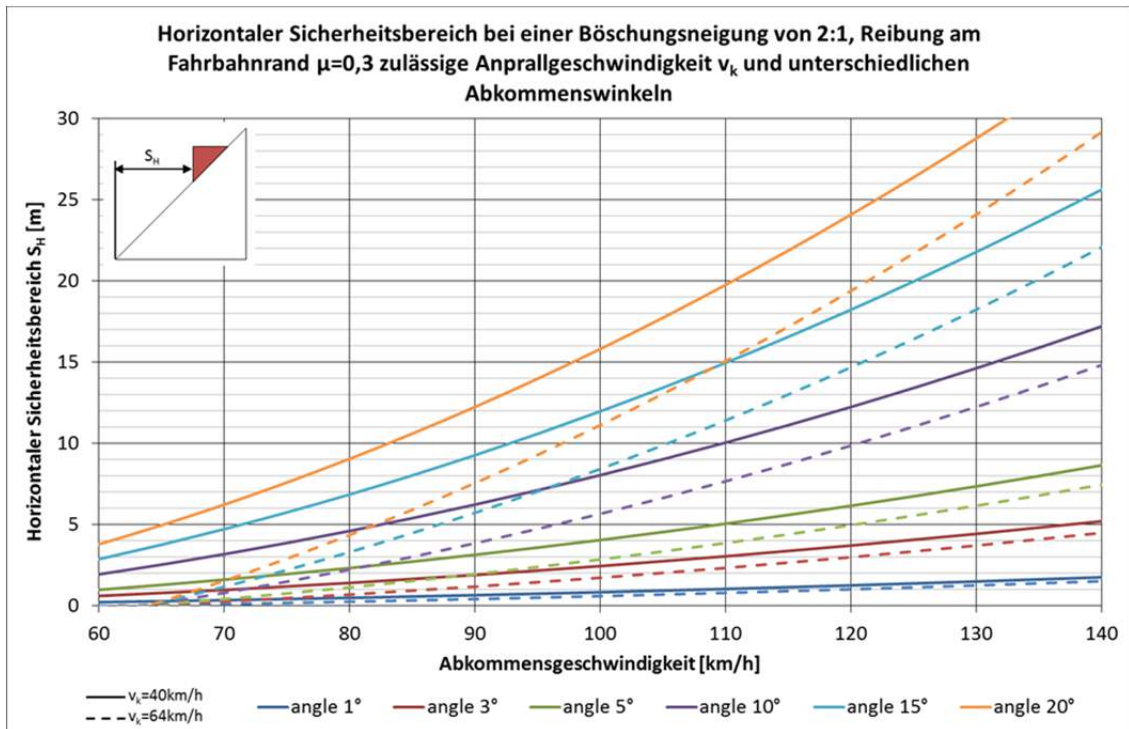


Abbildung 64: Horizontaler Sicherheitsbereich bei Abkommensunfällen mit unterschiedlichem Abkommenswinkel, Böschungsneigung von 2:1 und Kollisionsgeschwindigkeit v_k

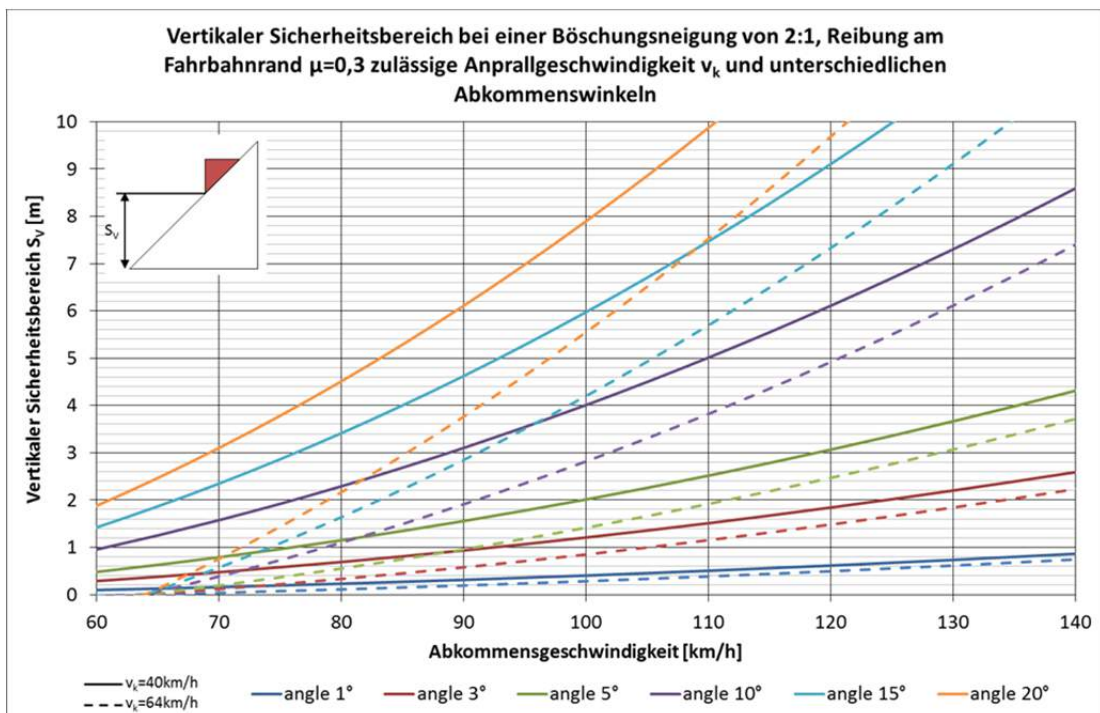


Abbildung 65: Vertikaler Sicherheitsbereich bei unterschiedlichen Seitenabständen unter der Voraussetzung einer befahrbaren Böschung, einer Steigung von 2:1 und Kollisionsgeschwindigkeit v_k

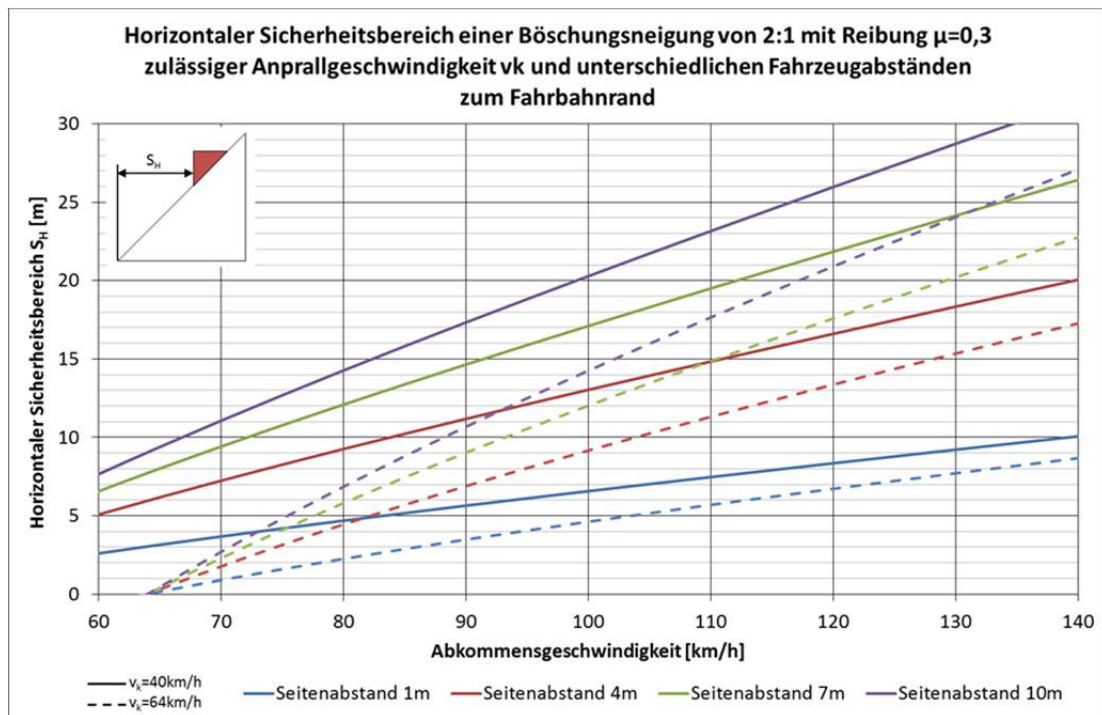


Abbildung 66: Horizontaler Sicherheitsbereich bei unterschiedlichen Seitenabständen unter der Voraussetzung einer befahrbaren Böschung, einer Steigung von 2:1 und Kollisionsgeschwindigkeit v_k

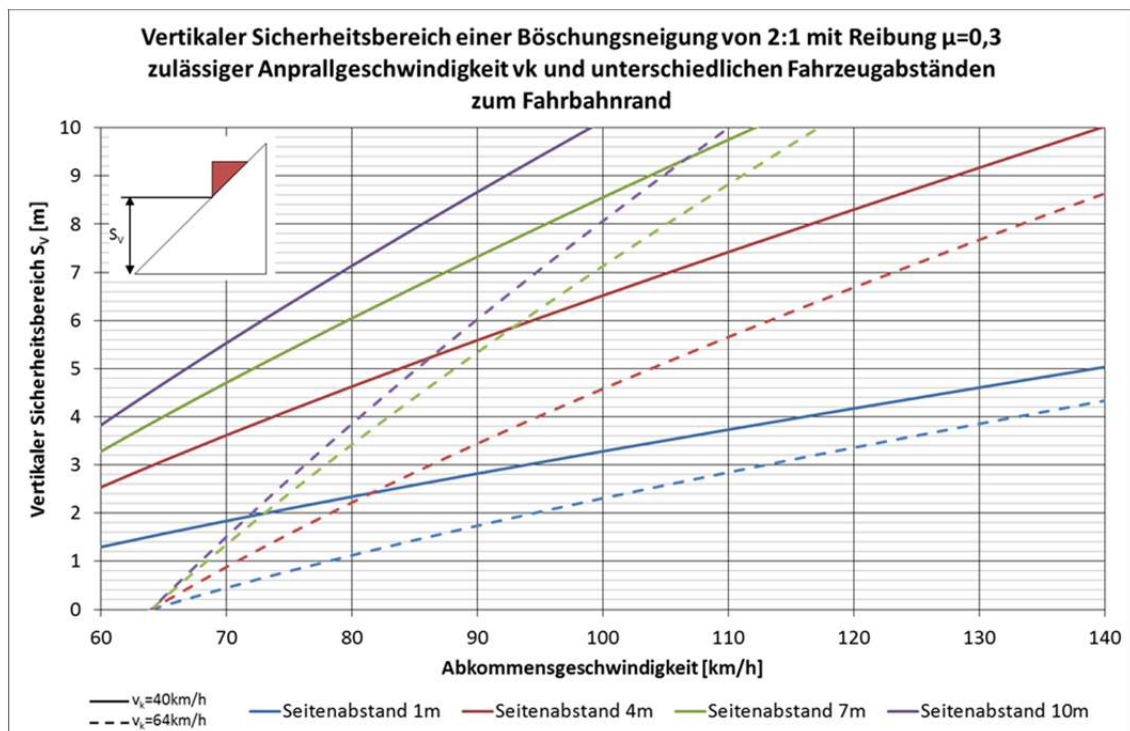


Abbildung 67: Vertikaler Sicherheitsbereich bei unterschiedlichen Seitenabständen unter der Voraussetzung einer befahrbaren Böschung, einer Steigung von 2:1 und Kollisionsgeschwindigkeit v_k

4.4.2.2 Simulation von Abkommensunfällen

a. Straßenobjekt

Ergänzend zu den theoretischen Überlegungen des Kapitels 4.4.2 wurde mit Hilfe einer Unfallsimulation die mögliche Fahrhöhe eines Fahrzeugs auf eine Böschung simuliert. Die Straße wurde als dreidimensionales Objekt, bestehend aus zwei Fahrstreifen sowie einem Randstreifen, modelliert. Eine zweispurige Fahrbahn wurde im gegenständlichen Fall als ausreichend erachtet, da im Rahmen der Simulation lediglich das Abkommen von der Fahrbahn bzw. das Befahren der Böschung untersucht wurde. Der Einfluss der Fahrbahnbreite ist hierbei von untergeordneter Bedeutung. Zur Ermittlung möglicher Abkommenswinkel ist jedoch auch die Fahrbahnbreite heranzuziehen (siehe Abbildung 54 und Abbildung 56).

Als Fahrbahnquerneigung wurden 4% angenommen. Angrenzend an die Fahrbahn wurde ein Bankett mit 10% Querneigung und eine Rasenmulde mit einer Muldentiefe von 0,3 m sowie einer Breite von 2,5 m angebracht. Daran grenzt ein 1 m breiter Streifen mit einer Querneigung von 10 %. Im Anschluss wurde ein Damm mit einem Steigungsverhältnis von 2:1 modelliert.

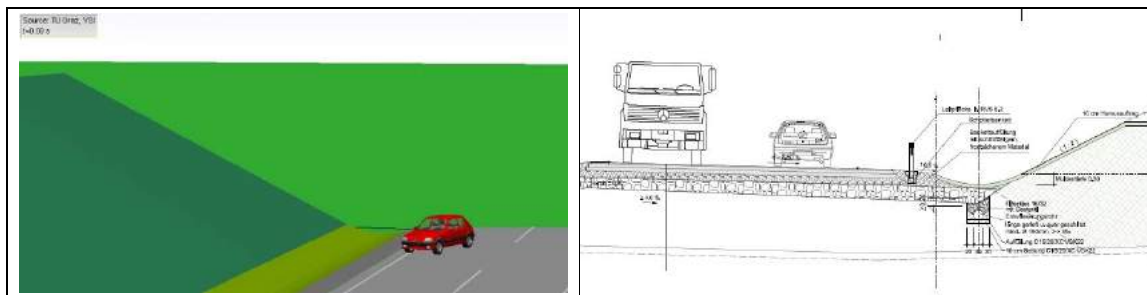


Abbildung 68: PC-Crash Modellaufbau bei einer Böschungsneigung von 2:1

b. Fahrzeug

Als Fahrzeuge wurden PKW mit 900 kg, 1500 kg und 2500 kg Gesamtgewicht herangezogen. Es wurden typische Fahrzeuggeometrien verwendet, wie sie auch für Unfallrekonstruktionen von Unfallsachverständigen verwendet werden und im Unfallrekonstruktionsprogramm PC Crash vorliegen. Dennoch ergibt sich aus der Versuchsanordnung nur eine Tendenz, da das Fahrzeugkollektiv weitaus größere Variationsmöglichkeiten aufweist und nicht alle Bauarten und Geometrien abgedeckt werden konnten.

4.4.2.3 Simulationsmatrix

Für den beschriebenen Modellaufbau wurde eine Simulationsmatrix erstellt, wobei Abkommensgeschwindigkeiten von 60 km/h – 140 km/h und unterschiedlichen Abkommens-

winkel (5°, 10°, 15°, 20°) untersucht wurden. Ebenso wurden die theoretisch möglichen Fahrzeugwinkel beim Abkommen entsprechend der Überlegungen aus Abbildung 56 simuliert, d.h. mit zunehmender Abkommengeschwindigkeit sinkt der theoretisch mögliche Abkommenswinkel. In der Simulation wurde angenommen, dass sich das Fahrzeug auf dem ersten Fahrstreifen befindet und sich der Abkommenswinkel daher entsprechend einem Seitenabstand von 4 m ergibt. Des Weiteren wurden unterschiedliche Fahrzeugmassen (900 kg, 1500 kg und 2500 kg) berücksichtigt.

Für die Simulationen wurden folgenden Annahmen gemäß [28] getroffen:

- Neigungsverhältnis der Böschung: 2:1
- Im ungünstigsten Fall ergibt sich für das abkommende Fahrzeug ein möglicher Reibungskoeffizient von $\mu=0,3$ (nasses Gras) und somit eine maximal mögliche Verzögerung von $a=2,9 \text{ m/s}^2$.
- Die Verzögerung entspricht dem Rollwiderstand
- Es erfolgt kein Lenkmanöver; dieses wird nur durch die Böschungsneigung bestimmt.
- Der seitliche Straßenbereich ist befahrbar, d.h. der Untergrund ist nicht weich, so dass sich Räder verhaken können.

Abbildung 69 zeigt, wie der notwendige Seitenbereich beim Abkommen des Fahrzeugs unter Annahme eines bestimmten Abkommenswinkel eruiert wurde. Es wurde hierfür die Position des Fahrzeugs zum Zeitpunkt des maximalen Seitenabstandes zum Böschungsbeginn vermessen. Der mögliche Seitenabstand hängt vom Abkommenswinkel, der Abkommengeschwindigkeit, den Reibungsverhältnissen sowie der Böschungsneigung ab.

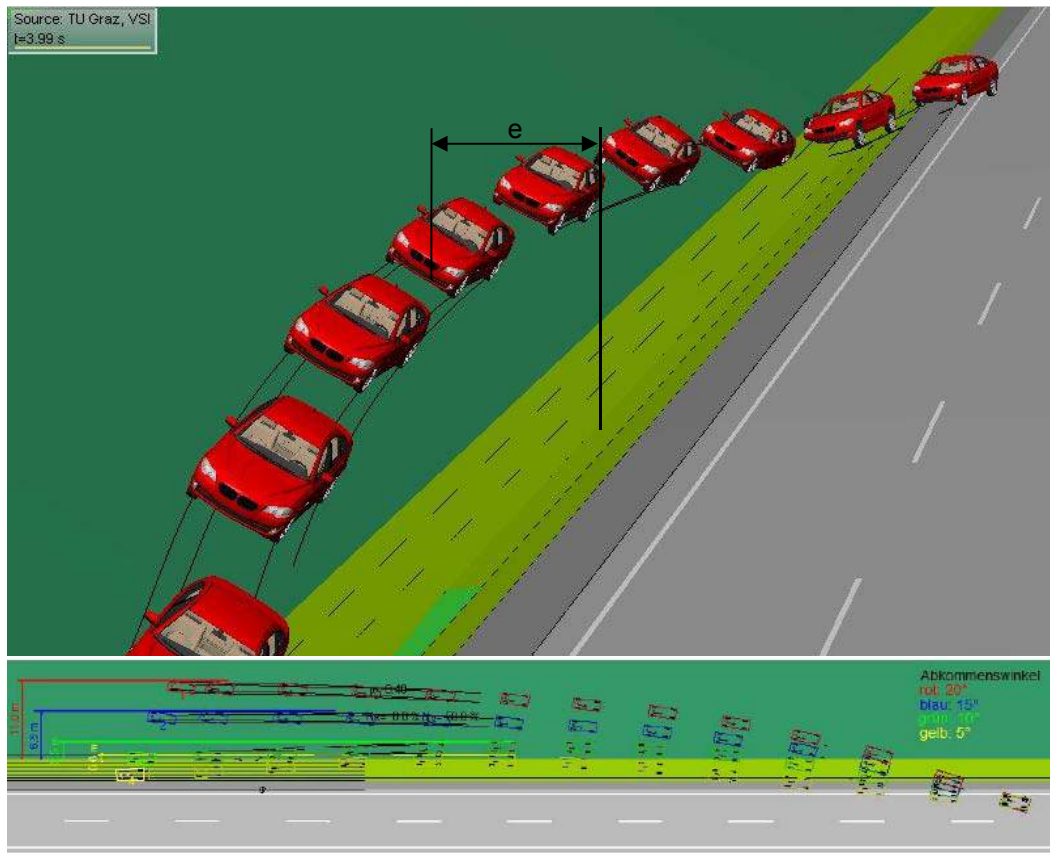


Abbildung 69: Sicherheitszone beim Befahren der Fahrbahnseite bei unterschiedlichem Abkommenswinkel

In Abbildung 70 sind die theoretischen Sicherheitsbereiche bei unterschiedlichen Abkommenswinkel und Abkommengeschwindigkeiten dargestellt. Des Weiteren ist die aus der Simulation hervorgehende Sicherheitszone bei geschwindigkeitsabhängigen Abkommenswinkel (siehe Abbildung 56) gekennzeichnet. Bei einem Abkommenswinkel von 15° bei 100 km/h Abkommengeschwindigkeit müsste eine Sicherheitszone zumindest 5 m betragen. Berücksichtigt man ferner die Überlegungen aus Kapitel 4.4.1 hinsichtlich abnehmender Abkommenswinkel bei zunehmenden Abkommengeschwindigkeiten, wäre im obigen Beispiel ein Sicherheitsbereich von rd. 5,5 m notwendig.

Eine theoretische Anprallgeschwindigkeit für den maximalen seitlichen Abstand zur Böschungskante ist Abbildung 71 zu entnehmen. Bei einer Abkommengeschwindigkeit von 100 km/h ist demnach eine Anprallgeschwindigkeit von etwa 80 km/h zu erwarten.

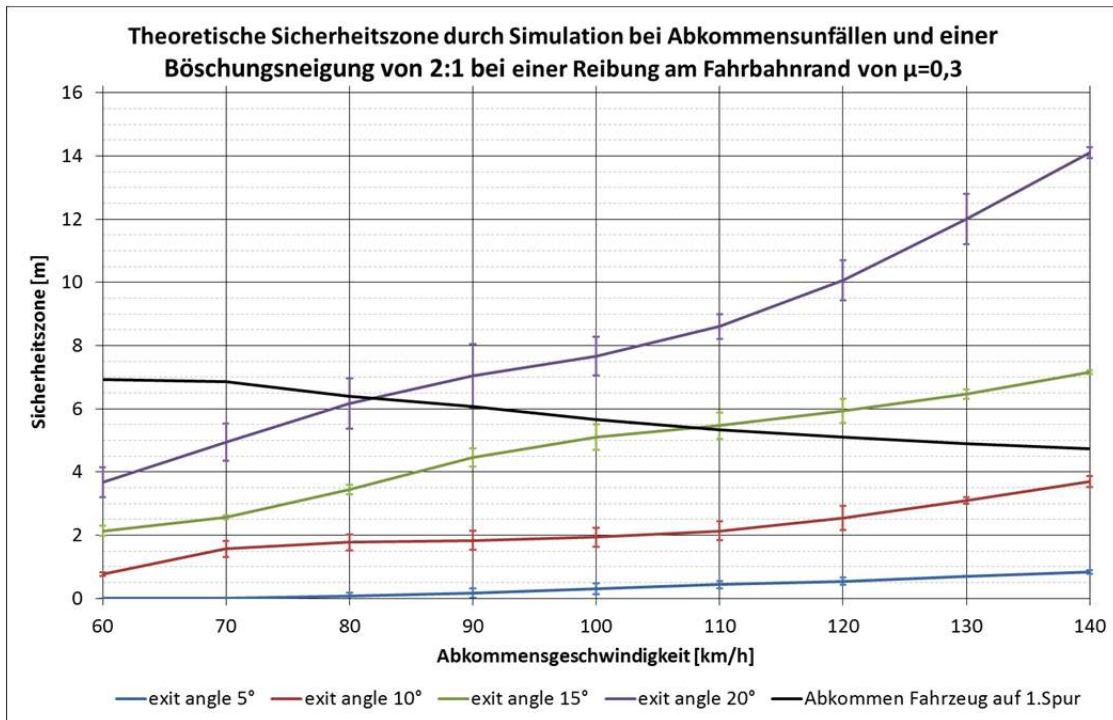


Abbildung 70: Theoretische Sicherheitszone durch Simulation von Abkommensunfällen bei einer Böschungsneigung von 2:1 und vorliegenden Reibungsverhältnissen $\mu=0,3$

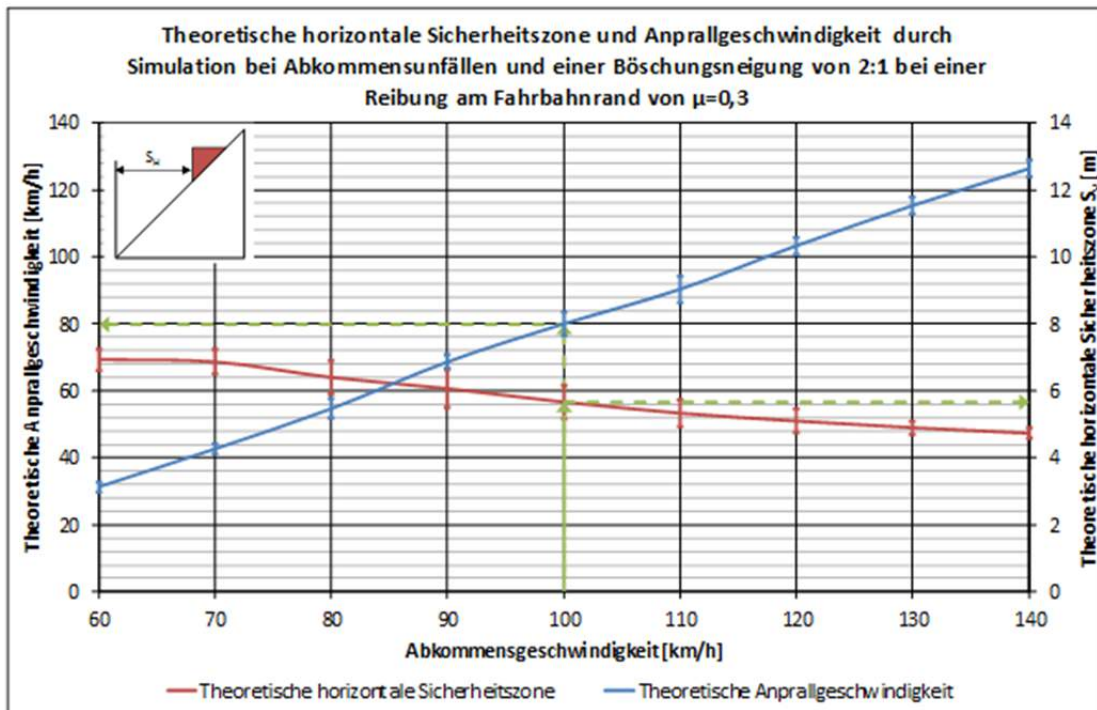


Abbildung 71: Theoretische horizontale Sicherheitszone und Anprallgeschwindigkeit durch Simulation von Abkommensunfällen bei einer Böschungsneigung von 2:1 und vorliegenden Reibungsverhältnissen $\mu=0,3$

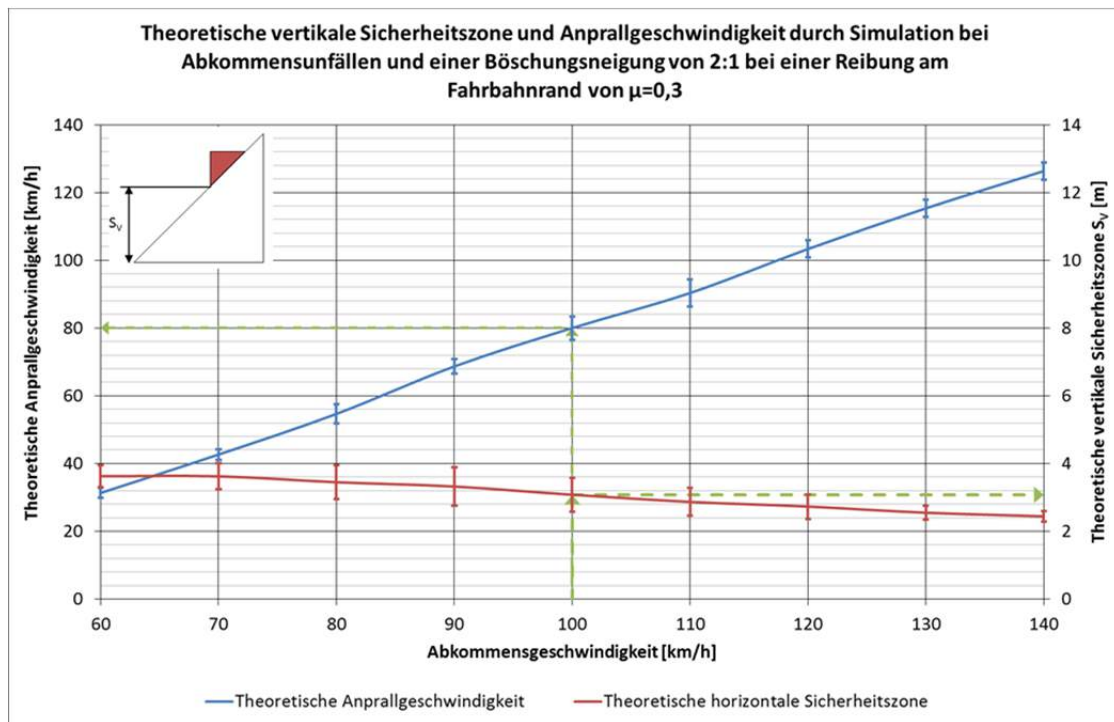


Abbildung 72: Theoretische vertikale Sicherheitszone und Anprallgeschwindigkeit durch Simulation von Abkommensunfällen bei einer Böschungsneigung von 2:1 und vorliegenden Reibungsverhältnissen $\mu=0,3$

5 ABSICHERUNGSMASSNAHMEN

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen der Kapitel 1–4 sowie der professionellen Einschätzung der im Projekt involvierten ASFINAG-Mitarbeiter, wurden potentielle Risikosituationen für Abkommensunfälle sowie kritische Straßenelemente identifiziert, die im Folgenden genauer analysiert werden. Für jede Risikosituation werden, sofern vorhanden, aktuelle Unfallzahlen ausgewertet, (gute und schlechte) Praxisbeispiele skizziert und potentielle Abhilfemaßnahmen diskutiert.

5.1 Ausfahrtsbereich (Trenninselspitz)

RISIKOGRUPPE	UNFALLTYP	MASSNAHMEN
Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn	Abkommen bei Kreuzung, Fahrbahnverzweigung oder Ausfahrt  Unfalltyp 031	• Bereitstellung einer ausreichend großen Sicherheitszone • Anpralldämpfer zur Absicherung von Ausfahrtswegweisern etc. • Leitschienen entlang der Fahrbahn-ränder

5.1.1. Risikosituation

Abfahrten von Autobahnen und Schnellstraßen weisen folgende Gefahren- und Risikopotentiale auf:

1. Fehlende Geschwindigkeitsadaption: Ende der 70-er Jahre führten SCHMIDT und TIFFIN [29] umfangreiche Untersuchungen zum Geschwindigkeitsverhalten von Verkehrsteilnehmern durch. Dabei wurde u.a. festgestellt, dass Kfz-Lenker nach einer längeren Fahrtzeit auf hohem Geschwindigkeitsniveau (> 110 km/h) eine Zeitspanne von ca. 5-6 Minuten benötigen, um ihre Fahrweise wieder an ein niedrigeres Tempolimit anzupassen. Abfahrten von Autobahnen und Schnellstraßen verzeichnen oftmals weit überhöhte Geschwindigkeiten, da die erforderliche Geschwindigkeitsadaption noch nicht stattgefunden hat.
2. Unerwartete Fahrstreifenwechsel und abrupte Bremsmanöver nach Überholvorgängen: Immer wieder ereignen sich schwere Unfälle im Bereich von Ausfahrten von Autobahnen und Schnellstraßen, da Kfz-Lenker unmittelbar nach einem Überholmanöver auf den rechten Fahrstreifen wechseln und gleichzeitig stark abbremsen, um die nachfolgende Abfahrt zu nehmen.
3. Orientierungsprobleme bei der Ausfahrt: Vor allem ortsunkundige Lenker müssen sich neu orientieren und sind nicht voll konzentriert bei der Fahraufgabe. In kritischen Situationen, in denen rasch gehandelt werden muss, kann es zu Reaktions- und Bremsverzögerungen kommen, welche in weiterer Folge zu Abkommensunfällen oder Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern führen.

5.1.2. Unfallzahlen

Das Unfallgeschehen im Abfahrtsbereich von Autobahnen und Schnellstraßen (Trenninselspitz) spielt im Vergleich zur Gesamtzahl der Unfälle mit Personenschaden eine untergeordnete Rolle. In der (Risiko-)Gruppe der Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahr-

bahn ereignete sich im Zeitraum 2002–2011 lediglich jeder 60. Unfall (1,6%) an Fahrbahnverzweigungen oder Ausfahrten. Ähnlich niedrige Werte finden sich auch in der Gruppe der Schwer- bzw. Leichtverletzten. Mit einem Anteil von 2% am Unfallgeschehen weisen die Getötetenzahlen jedoch einen signifikant höheren Wert auf, was auf die Vielzahl an starren Hindernisse im Trenninselpitz (Ausfahrtswegweiser etc.) zurückzuführen ist.

Tabelle 40: Vergleich der Unfallzahlen auf Autobahnen und Schnellstraßen

Verletzungsschwere	Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn	... davon Abkommen bei Fahrbahnverzweigung oder Ausfahrt	Anteile am Gesamtunfallgeschehen der jeweiligen Kategorie [%]
UPS	8.819	142	1,6
Getötete	449	9	2,0
Schwer Verletzte	4.001	57	1,4
Leicht Verletzte	8.110	130	1,6

Quelle: Statistik Austria, Auswertungen der Unfallstatistiken 2002-2011

5.1.3. Praxisbeispiele



Im Einzelfall überprüfen, ob Tragkonstruktion gemäß der Simulationsergebnisse ausgeführt wurde → falls ja: Keine Absicherung des Hinweiszeichens erforderlich.

Richtig

Chevrons an Leitschienen erleichtern die Orientierung während der Dunkelheit.

Falsch

Kurzer Absenker in Fahrtrichtung gemäß RVS 05.02.31 nicht zulässig. In folgenden Situationen dürfen Kurzabsenker angebracht werden:

- als Endabsenkung bei Richtungsfahrbahnen.
- bei überlappter Ausführung
- für Unterbrechungen bei Notrufsäulen, wenn eine Überlappung von Leitschienen nicht möglich ist.



Richtig

Keine Leitschienen notwendig, wenn Tragkonstruktion gemäß der simulierten Materialeigenschaften ausgeführt ist.



Richtig/Falsch

Überprüfen, ob Anpralldämpfer unbedingt erforderlich → Systemmontage nicht optimal (abkommendes Fahrzeug kollidiert seitlich mit Anpralldämpfer).



Richtig

Anpralldämpfer sichert Lärmschutzwand ab.



Richtig

Leitschienensystem ist gekoppelt mit Anpralldämpfer.

Falsch

Notwendigkeit des Anpralldämpfers nicht ersichtlich → örtliche Situation im Einzelfall immer zu Berücksichtigen.


Richtig

Anpralldämpfer sichert Überkopfwegweiser ab.


Falsch

Fehlende Einbindung der Leitschiene in den Anpralldämpfer.


Richtig

- Anpralldämpfer sichert Lärmschutzwand ab.
- Zusätzliches Leitschienensystem zur Absicherung der Tankstellen.



5.1.4. Maßnahmen

Bereitstellung einer ausreichend großen Sicherheitszone

Die Notwendigkeit von Schutzeinrichtungen ist zu prüfen, sobald sich potentiële Gefahrenstellen innerhalb eines kritischen Abstands zur Straße befinden. Die deutsche FGSV [16] unterscheidet z.B. folgende vier Gefahrenpotenziale:

- **Gefährdungsstufe 1:** Schutzbedürftige Bereiche mit besonderer Gefährdung Dritter (z.B. explosionsgefährdete Chemieanlagen, intensiv genutzte Aufenthaltsbereiche, nebenliegende Schnellbahnstrecken mit zugelassener Geschwindigkeit > 160 km/h, einsturzgefährdete Bauwerke).
- **Gefährdungsstufe 2:** Schutzbedürftige Bereiche mit Gefährdung (z.B. nebenliegende stark frequentierte Geh- und Radwege, nebenliegende Schienenwege mit mehr als 30 Zügen/24h, nebenliegende Straßen mit DTV > 500 Kfz/24h).
- **Gefährdungsstufe 3:** Hindernisse mit besonderer Gefährdung von Fahrzeuginsassen (z.B. nicht verformbare flächenhafte Hindernisse senkrecht zur Fahrtrichtung, nicht verformbare punktuelle Einzelhindernisse, Lärmschutzwände).
- **Gefährdungsstufe 4:** Hindernisse mit Gefährdung von Fahrzeuginsassen (z.B. noch verformbare, aber nicht umfahrbare/abscherbare punktuelle Einzelhindernisse, kreuzende Gräben, aufsteigende Böschungen (Neigung > 1:3), fallende Böschungen (Höhe > 3 m und Neigung > 1:3), Gewässer mit einer Tiefe > 1 m, Wildwasser).

Trenninselspitze und Ausfahrtsbereiche von Autobahnen und Schnellstraßen fallen in die Gefährdungsstufe 2 (nebenliegende Straße mit DTV > 500 Kfz/24h). Da die RPS dem Schutz unbeteiligter Dritter eine besonders hohe Bedeutung zumisst, gilt für die Gefährdungsstufe 1 und 2 ein erweiterter Abstand (AE).

Zwecks Klärung der Fragestellung, ob sich ein ortsfestes Hindernis im „Gefahrenbereich“ eines Trenninselspitz befindet, werden zwei Parameter herangezogen: Die Entfernung zum Fahrbahnrand und die Höhe über Straßenniveau (siehe Abbildung 73). Bei einem Trenninselspitz kann man im Regelfall von einer ebenerdigen Ausführung ($H=0$ m) ausgehen, wodurch der kritische Abstand $AE = 20$ m beträgt. D.h., ist der entsprechende (Abkommens)Bereich frei von ortsfesten Hindernissen, kann laut RPS 2009 auf zusätzliche Schutzeinrichtungen verzichtet werden.

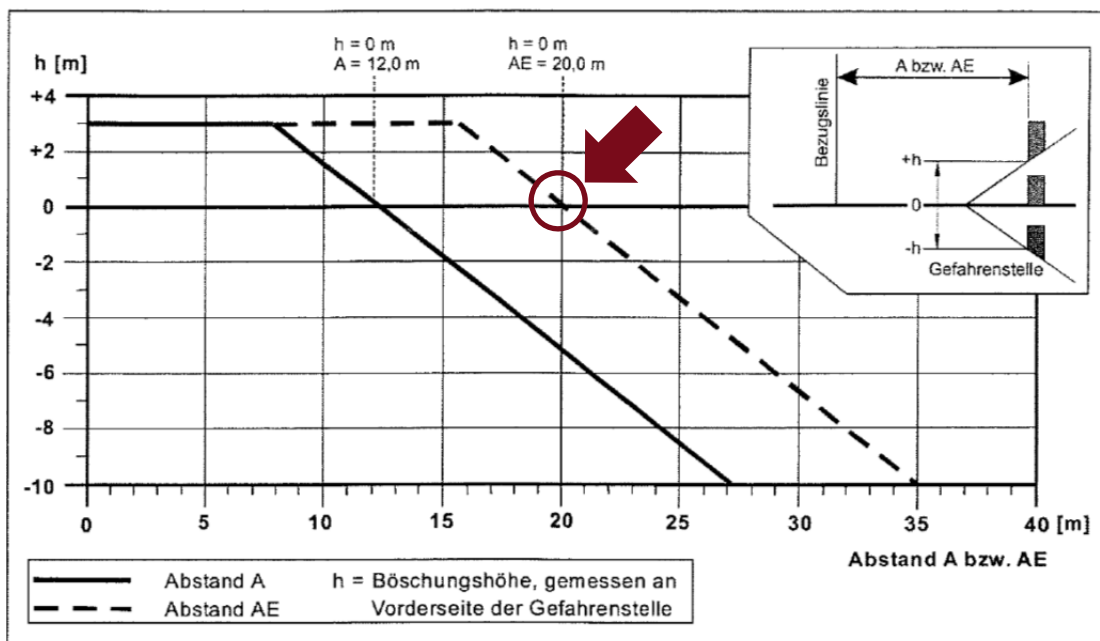


Abbildung 73: Kritische Abstände für Autobahnen und Straßen mit $V_{zul} > 100$ km/h [16]

Simulationsergebnisse der TU Graz (siehe S. 116) kommen ebenfalls zu dem Schluss, dass bei ebener Strecke und einer zulässigen Kollisionsgeschwindigkeit von max. 64 km/h ein Sicherheitsabstand von rd. 22 m erforderlich ist. Hierbei sei jedoch angemerkt, dass eine Anprallgeschwindigkeit von 64 km/h auf einen Euro NCAP Test ausgelegt ist, wobei energieabsorbierende Teile wie beispielsweise Längsträger ihre volle Leistungsfähigkeit entfalten können. Das heißt unter der Annahme, dass das Fahrzeug das Anprallobjekt optimal trifft (Anprallwinkel 0° , zumindest 40% Überdeckung). Bei realen Unfallsituationen ist allerdings von einer der Euro NCAP Testkonfiguration abweichenden Anprallsituation auszugehen und hierbei eher eine Anprallgeschwindigkeit von 40 km/h zu Grunde zulegen wäre.

Anpralldämpfer zur Absicherung von Ausfahrtswegweisern

Die RVS 05.02.31 [30] unterscheidet bei der Wahl der Leistungsstufe von Anpralldämpfer zwischen „normaler“ und „hoher“ Gefährdung (siehe Tabelle 41), wobei die RVS nicht

definiert, was darunter genau zu verstehen ist. Diese Unterscheidung festzulegen obliegt dem jeweiligen Planer, um eine gewisse Flexibilität bei der Maßnahmensetzung zu ermöglichen. Auf Grund der geringen Zahl an Abkommensunfällen von Kfz in Ausfahrtsbereichen (siehe Kapitel 5.1.2) ist als Basiswert für die Bemessung die Leistungsstufe 80 heranzuziehen.

Tabelle 41: Mindestanforderung für die Wahl der Leistungsstufe von Anpralldämpfer

Zul. Höchstgeschwindigkeit für Pkw [km/h]	Leistungsstufe [-]	
	Normale Gefährdung	Hohe Gefährdung
≤ 80	50	50
≤ 100	50	80
> 100	80	100

Quelle: RVS 05.02.31, 2011, S.4

ELVIK [31] hat im Rahmen einer Metaanalyse (Zusammenfassung der Ergebnisse verschiedener Studien zu ein und demselben Sachverhalt mit quantitativen, statistischen Mitteln) festgestellt, dass Anpralldämpfer eine signifikante Verringerung der Verletzungsschwere bewirken. Wie man Tabelle 42 entnehmen kann, sinkt die Zahl der Getöteten um 69%, wobei die statistische Schwankungsbreite bei $\pm 9\%$ liegt. Das heißt, mit einer 95%-igen Wahrscheinlichkeit verringert sich die Zahl der durch einen Anprall an ein ortsfestes Hindernis getöteten Verkehrsteilnehmer um 51-87%.

Tabelle 42: Sicherheitseffekte von Anpralldämpfer bei Anprall an ein ortsfestes Hindernis

Verletzungsschwere	Mittelwert	95% Konfidenzintervall	Ergebnis statistisch signifikant
Getötete	-69%	[-51%; -87%]	Ja
Verletzte	-69%	[-63%; -75%]	ja

Quelle: Clearinghouse CMF, <http://www.cmfclearinghouse.org>

Leitschienen entlang der Fahrbahnränder

Leitschienen dienen insbesondere der Absicherung linienhafter Gefahrenstellen (z.B. Böschungen, Baumreihen, Gewässer) entlang von Fahrbahnrändern. Primäres Ziel dieser Maßnahme ist es, die Verletzungsschwere von Abkommensunfällen zu reduzieren, weniger diese zu vermeiden⁸. Leitschienen kommen in der Regel dann zum Einsatz, wenn das

⁸Laut ELVIK 2004 [31] reduzieren Leitschienen in bestimmten Situationen allein durch ihr Vorhandensein das Auftreten von (Abkommens-) Unfällen, da Fahrzeuglenker einen größeren Abstand zum Fahrbahnrand einhalten.

Abkommensrisiko besonders hoch ist bzw. eine Kollision mit einem Objekt hoher Steifigkeit droht. In solch einer Situation ist es – zumindest bez. der Verletzungsschwere – vorteilhafter, wenn das Fahrzeug mit der im Vergleich „weicheren“ Leitschiene anstatt mit dem starren Hindernis kollidiert.

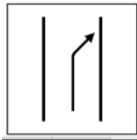
ELVIK hat im „Handbook of Road Safety Measures“ [31] verschiedene Studien hinsichtlich der Wirksamkeit von Leitschienen analysiert. Die Resultate dieser Meta-Studie sind auszugsweisen in der Tabelle 43 zusammengefasst.

Tabelle 43: Sicherheitseffekte von Leitschienen entlang des Fahrbahnrandes auf Abkommensunfälle

Beschreibung der Maßnahme	Verletzungsschwere	Mittelwert	95% Konfidenzintervall	Ergebnis statistisch signifikant
Neu errichtete Leitschienen entlang der Fahrbahnrande	Unfall mit Todesfolge	-44%	[-54%; -32%]	ja
	Unfall mit Verletzten	-47%	[-52%; -41%]	ja
Umrüstung auf Leitschienen mit einem höheren Wirkungsbereich	Unfall mit Todesfolge	-41%	[-66%; +2%]	nein
	Unfall mit Verletzten	-32%	[-42%; -20%]	ja

Quelle: ELVIK, 2004, S.253 [31]

5.2 Bäume und Sträucher

RISIKOGRUPPE	UNFALLTYP	MASSNAHMEN
Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn	81% der untersuchten Baumunfälle weisen den Unfalltyp „Abkommen rechts auf der Geraden“ auf  Unfalltyp 011	• Bereitstellung einer ausreichend großen Sicherheitszone (Abstand zur Fahrbahn) • Leitschienen entlang der Fahrbahnrande • Positionierung von Bäumen und Sträuchern auf Böschungen • Entfernen von Bäumen

5.2.1. Risikosituation

Bäume und Sträucher als gestaltendes Element des Straßenraums genießen in der Verkehrsplanung eine sehr hohe Bedeutung. Neben Aspekten des Landschaftsbilds und der Stabilisierung des Straßenkörpers wird in der Literatur insbesondere die verkehrsleitende Funktion von Bäumen(z.B. optische Linienführung in Kurvenbereichen) hervorgehoben.

Bäume am Straßenrand bewirken im Allgemeinen keine unmittelbare Gefährdung, können jedoch die Unfallfolgen bei einem Abkommen von der Fahrbahn erheblich verschlimmern. Neue Bäume am Fahrbahnrand wachsen oftmals schneller zu gefährlichen Hindernissen heran, als dies durch Unfallbeobachtungen erkannt werden kann.

5.2.2. Unfallzahlen

Die amtliche Unfallstatistik (Unfallzählblatt) gestattet es nicht, das Merkmal „Baumunfall“ als Unfallumstand auszuwählen. Erst mit Inkrafttreten des neuen Unfallprotokollierungssystems der Exekutive (UDM) im Jänner 2012 wird es zukünftig möglich sein, detaillierte Unfallanalysen nach Anprallobjekten durchzuführen. Aus diesem Grund gibt es derzeit keine gesicherten Erkenntnisse bez. Häufigkeit und Schadensausmaß von Baumkollisionen am ASFINAG-Netz. Im Rahmen des Projekts RISKANT wurden jedoch Unfallskizzen mehrerer Jahre ausgewertet, um ein „klareres“ Bild der Risikosituation zu erlangen.

Von 176 untersuchten Abkommensunfällen mit Anprall an ein ortsfestes Hindernis, waren rd. 15% auf Kollisionen mit Bäumen zurückzuführen und stellen gemäß Tabelle 4 den häufigsten „Kollisionsgegner“. Baumkollisionen zeichnen sich durch eine sehr hohe Verletzungsschwere aus: Bei den untersuchten Unfällen (n=27 UPS) wurden jeweils 1/3 der beteiligten Verkehrsteilnehmer getötet bzw. schwer verletzt oder leicht verletzt. Baumunfälle zählen – was die Verletzungsschwere anbelangt – zu den gefährlichsten ortsfesten Hindernissen.

5.2.3. Praxisbeispiele



Falsch

- Pappeln zu knapp am Fahrbahnrand bzw. nicht durch Leitschienen gesichert.
- Kurzes Anfangselement der Leitschiene.

	Richtig • Bäume auf Böschung positioniert. • Flacher Straßengraben ermöglicht Ausweichmanöver bei Abkommen von der Fahrbahn (fehlerverzeihende Straße).
	Richtig/Falsch Prüfung notwendig, ob Bäume in Abhängigkeit von (Fahrbahn-)Abstand, Baumdurchmesser und Abkommensrisiko abzusichern sind.
	Falsch Bäume im Mittelstreifen → hohes Gefährdungspotential bei Abkommensunfällen.
	Falsch Bäume im Mittelstreifen stören Sichtbeziehungen und stellen (mit der Zeit) ein ortsfestes Hindernis dar.



5.2.4. Maßnahmen

Bereitstellung einer ausreichend großen Sicherheitszone (Abstand zur Fahrbahn)

Im Kapitel 4.4.2 wurden Überlegungen hinsichtlich der Größe der Sicherheitszone angestellt, welche eine bestimmte Anprallgeschwindigkeit zulässt. Hierbei wurde auch ein Abkommenswinkel berücksichtigt, der sich aus dem Abstand des Fahrzeugs zum Fahrbahnrand ergibt. Eine Abkommensgeschwindigkeit von 100 km/h und eine zulässigen Kollisionsgeschwindigkeit von 40 km/h resultiert demnach in einer Sicherheitszone von 31 m Breite, sofern sich das Fahrzeug auf dem ersten Fahrstreifen befindet. Dieser Sicherheitsbereich verringert sich auf 22 m, wenn die zulässigen Kollisionsgeschwindigkeit 64 km/h beträgt. Diese Werte gelten jedoch nur für ebene befahrbare Seitenbereiche.

Sofern eine Böschung an der Fahrbahnseite mit einer Böschungsneigung von 2:1 besteht, ist bei einer Anprallgeschwindigkeit von 40 km/h ein horizontaler Sicherheitsbereich von 13 m notwendig, was einem vertikalen Sicherheitsbereich von 6,5 m entspricht. Der horizontale Sicherheitsbereich wäre bei einer Anprallgeschwindigkeit von 64 km/h etwa 9 m bzw. entspricht einem vertikalen Sicherheitsbereich von 4,6 m.

Durch Unfallsimulationen wurden diese theoretischen Überlegungen erweitert. Hierbei ergibt sich bei einer Abkommensgeschwindigkeit von 100 km/h und einer Böschungsneigung von 1:2 ein horizontaler Seitenbereich von knapp 6 m. Die simulierte Anprallgeschwindigkeit beträgt hierbei ca. 80 km/h. Der vertikale Sicherheitsbereich ergibt sich bei dieser Konstellation zu etwa 3,1 m. Ein vertikaler Sicherheitsbereich mit einer theoretischen Anprallgeschwindigkeit, welche in einem Bereich zwischen 60 und 80 km/h liegt, würde etwa 3,5 m betragen. In diesem Seitenbereich sollten sich keine ortsfesten Hindernisse befinden, welche bei einem Anprall schwerwiegende Verletzungen hervorrufen würden.

Leitschienen entlang der Fahrbahnränder

Siehe Kapitel 5.1.4

Entfernen von Bäumen

Im EU Projekt RISER wurden verschiedene Kollisionsobjekte nach ihrer Anprallwahrscheinlichkeit und der auftretenden Verletzungsschwere klassifiziert. Baumkollisionen weisen ein besonders hohes Verletzungsrisiko bei gleichzeitig hohem Anteil an beobachteten Kollisionen auf (siehe Abbildung 74). Die strichlierten Linien kennzeichnen dabei Linien gleichen Risikos. Mittels „No object“ werden all jene Fälle bezeichnet, bei denen es zu einem Fahrzeugüberschlag gekommen ist. Betrachtet man Fahrzeugrückhaltesysteme („Safety Barrier“) gesondert, liegt trotz einer ähnlich hohen Kollisionswahrscheinlichkeit wie bei Bäumen, die Verletzungsschwere bei lediglich einem Drittel. Das Risiko für schwerwiegende Verletzungen ist daher deutlich niedriger.

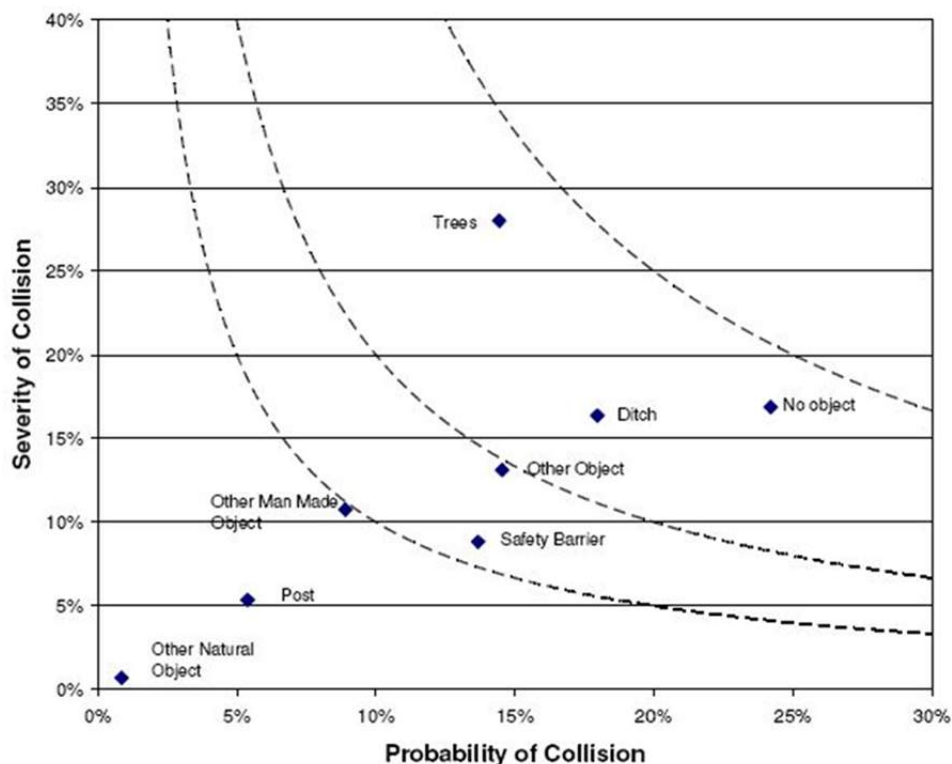


Abbildung 74: Zusammenhang zwischen Kollisionswahrscheinlichkeit und -schwere [37]

In weitere Folge wurden in RISER nationale Regelungen hinsichtlich Bäume am Straßenrand evaluiert (siehe Tabelle 44). Ein gefährlicher Baumdurchmesser wurde mit einem Durchmesser zwischen 10 cm und 30 cm als gefährliches Objekt eingestuft, wobei im Durchschnitt Bäume ab 10 cm Durchmesser als gefährlich gelten. Ein Durchmesser von 30 cm wäre nur dann erlaubt, wenn sich der Baum zumindest 4,5 m von der Fahrbahn entfernt befindet (GB).

Tabelle 44: Überblick, wann unterschiedliche nationale Bestimmungen Bäume für den Straßenverkehr als potentiell gefährlich einstufen

GEFÄHRDUNG	FI	FR	DE	GB ¹	NL	ES	SE
Baum, Baumstumpf [m]	>0,1	>0,1 Baumstumpf >0,2	>0,07	>0,3 ²	>0,08	Y	>0,1
Baumreihe, Wald	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y

¹ <4,5 m von der Fahrbahn

² gemessen 30cm über Boden

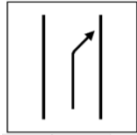
Zusätzlich zu den analysierten nationalen Richtlinien konnten in RISER etwa 211 Abkommensunfälle ausgewertet werden. Dabei konnten 30 Alleinunfälle mit Bäumen ausgewertet werden. 19 davon waren mit tödlichem Ausgang, sieben Unfälle mit schwer und vier mit leicht Verletzten. Die Bäume waren zwischen 2,0 m und 10,8 m von der Fahrbahn entfernt und der Durchmesser lag zwischen 0,15 m und 1,0 m. Die Autoren in RISER kamen zum Schluss, dass kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Baumdurchmesser und Entfernung zur Fahrbahn existiert. Der kleinste Baumdurchmesser, welcher zu tödlichen Verletzungen führte lag bei 0,2 m wobei der Fahrzeuglenker in diesem Fall den Sicherheitsgurt nicht angelegt hatte. Der kleinste Baumdurchmesser, welcher zu tödlichen Verletzungen führte und alle Insassen angegurtet waren lag bei 0,3 m. Die größte Entfernung eines Baumes in einem tödlichen Unfall zur Fahrbahn war bei 6,8 m. Kollisionsgeschwindigkeiten bei tödlichen Unfällen konnten zwischen 75 km/h und 140 km/h rekonstruiert werden, wobei die niedrigste Kollisionsgeschwindigkeit, welche noch schwere Verletzungen hervorgerufen hat mit 45 km/h festgestellt wurde.

In einer ersten Ausgabe der American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) wurden Bäume und Baumstümpfe mit einem Durchmesser von 0,1m als gefährlich eingestuft [40]. Diese mussten sich zumindest sechs Meter von der Fahrbahn entfernt befinden. In einer neueren Regelung des U.S. Department of Transportation (USDOT) dürfen sich derartige Bäume und Baumstümpfe nicht innerhalb von neun Meter von der Fahrbahn befinden [41]. Baumdurchmesser mit einem hohen Risiko für schwere Verletzungen wurden auch von PLEDGE analysiert [42]. Es wurde ein Baumdurchmesser von 0,165 m als gefährlich eingestuft.

Ähnliche Ergebnisse werden auch in der gegenständlichen Studie festgestellt. Ein Baumdurchmesser wird insbesondere für einen seitlichen Anprall ab einem Durchmesser von 150 mm kritisch. Hierbei ist nicht der ASI ausschlaggebend, sondern die auftretenden Intrusionen in die Fahrgastzelle bewirken schwerste Verletzungen. Entsprechend Abbildung 59 sind rund ein Viertel der Abkommensunfälle mit seitlichen Kollisionen verbunden.

Hierbei können Intrusionen bis etwa 400 mm in die Fahrgastzelle reichen. Bei Baumdurchmesser von 150 mm und möglicher frontaler Kollisionen ist eine Überwachung des Streckenabschnitts empfehlenswert. Bäume mit einem Durchmesser ab 200 mm wären in kritischen Bereichen zu entfernen bzw. abzusichern. Beruhend auf Erfahrungen von Sachverständigen ist ab diesem Durchmesser mit einem verhakten Stoß zu rechnen. Dabei sind schwerste Verletzungen nicht auszuschließen.

5.3 Brückenfundamente und -pfeiler

RISIKOGRUPPE	UNFALLTYP	MASSNAHMEN
Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn	Alle untersuchten Kollisionen weisen den Unfalltyp „Abkommen rechts auf der Geraden“ auf  Unfalltyp 011	Absicherung mittels Leitschienen oder Betonleitwänden

5.3.1. Risikosituation

Brückenfundamente und -pfeiler stellen aufgrund ihrer zumeist massiven Ausführung sowie der verwendeten Baumaterialien ein erhebliches Gefährdungspotential für Verkehrsteilnehmer dar, die von der Fahrbahn abkommen. Aus diesem Grund empfiehlt der Entwurf zur RVS 02.02.41 (Schutz vor Unfällen mit ortsfesten Objekten), Brückenfundamente und -pfeiler mittels passiver Maßnahmen abzusichern.

5.3.2. Unfallzahlen

Allein-/Abkommensunfälle mit Aufprall an Brückenfundamente bzw. -pfeiler weisen von allen – im Rahmen des Projekts – untersuchten Kollisionsobjekten die höchsten Verletzungsschweren auf. Da im Unfallzählblatt der Statistik Austria nicht vorgesehen ist, das Merkmal „Kollision mit Brücke“ als Unfallumstand auszuwählen, wurde wiederum eine Sonderauswertung der vorhandenen Unfallskizzen durchgeführt, um zu validen Ergebnissen hinsichtlich der Verletzungsschwere zu gelangen. Bei insgesamt 13 Kollisionen mit Brückenpfeilern erlitten mehr als die Hälfte (55%) der Verkehrsteilnehmer tödliche Verletzungen, 9% wurden schwer und 36% leicht verletzt (siehe Abbildung 11).

5.3.3. Praxisbeispiele

	Richtig Durchgehende Absicherung von Lärmschutzwand, Brückenfundament und Notrufnische.
	Richtig • Terminal am Beginn der Leitschienen. • Wegweiser wurde innerhalb der höchsten Aufhaltstufe positioniert. <u>HANDLUNGSEMPFEHLUNG</u> Wenn Beschilderung notwendig, dann dort platzieren, wo grundsätzlich abzusichern ist (z.B. Brückenpfeiler).
	Richtig Leitschienenband in Böschung verzo-gen.
	Richtig Brückenpfeiler sehr gut abgesichert.

	Richtig Absicherung mittels Betonleitwände → Kollision mit Brückenpfeiler (Hinterfahren des Rückhaltesystems) wird effektiv verhindert.
	Richtig Brückengeländer optimal abgesichert.
	Falsch • Betonleitwand zu kurz → Hinterfahren möglich. <u>HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN</u> • Aufstelllänge der Betonleitwände erhöhen. • Terminal statt Langabsenker, damit „aufreitendes“ Fahrzeug nicht gegen Brückenpfeiler prallt.

	Falsch Leitschienenlänge zu kurz, um Kollision mit Brückengeländer zu verhindern. <u>HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN</u> • Terminal als Anfangselement verwenden.
	Falsch Leitschienen zu kurz! <u>HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN</u> • Leitschiene verlängern und Richtung Böschung verziehen bzw. Terminal als Anfangselement verwenden.

5.3.4. Maßnahmen

Absicherung mittels Betonleitwänden

In der internationalen Literatur finden sich keine Studien, die den (Verkehrssicherheits-) Effekt von Betonleitwänden zur Randabsicherung evaluieren. ELVIK [31] liefert lediglich eine Zusammenfassung (Meta-Analyse) von Forschungsarbeiten, die Betonleitwände als Mitteltrennung (Median) untersucht haben. Die Studienergebnisse ergeben hinsichtlich der Auswirkungen auf das Unfallgeschehen kein einheitliches Bild bzw. sind diese z.T. nicht signifikant und somit statistisch belastbar. Auch lassen sich die Ergebnisse nicht 1:1 auf den rechten Fahrbahnrand übertragen.

Absicherung mittels Leitschienen

Siehe Tabelle 43.

5.4 Lärmschutzwände

RISIKOGRUPPE	UNFALLTYP	MASSNAHMEN
Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn	Unbekannt	Absicherung mittels Leitschienen oder Betonleitwänden

5.4.1. Risikosituation

Lärmschutzwände stellen ebenso wie Brückenfundamente und -pfeiler ein erhebliches Gefährdungspotential für Verkehrsteilnehmer dar, die von der Fahrbahn abkommen. Aus diesem Grund empfiehlt der Entwurf zur RVS 02.02.41 (Schutz vor Unfällen mit ortsfesten Objekten) eine Absicherung mittels passiver (Verkehrssicherheits-)Maßnahmen (Leitschienen, Betonleitwände).

5.4.2. Unfallzahlen

In der amtlichen Unfallstatistik sind keine Angaben bez. Kollisionen mit Lärmschutzwänden enthalten. Die Analyse der Unfallskizzen ergab insgesamt fünf Unfälle mit Personenschaden, bei denen 40% der Verkehrsteilnehmer tödlich und 60% leicht verletzt wurden.

5.4.3. Praxisbeispiele

	Falsch Leitschienen zu kurz → Gefahr, dass abkommende Fahrzeuge die Leitschiene hinterfahren und mit der Lärmschutzwand kollidieren. <u>HANDLUNGSEMPFEHLUNG</u> Leitschienen verlängern bzw. in Böschung verziehen.
	Falsch - Leitschiene zu kurz <u>HANDLUNGSEMPFEHLUNG</u> - Leitschienen verlängern. - Terminal zur Absicherung des Anfangsstückes bzw. Leitschiene in Böschung verziehen.

	Falsch • Langabsenker (1:12) passt aber: • Terminal als Anfangsstück besser, da Gefahr des Aufgleitens und anschließende Kollision mit Front der Lärmschutzwand.
	Falsch Leitschiene gehört in Böschung „verzo-gen“ bzw. verlängert und mit einem Terminal abgesichert.
	Richtig/Falsch Prüfen, welche Art von Hinweiszei-chen-träger → ggf. Leitschienen verlängern.
	Falsch • Leitschiene zu kurz → Gefahr des Aufgleitens und anschließender Kollision mit Hinweiszeichen.

5.4.4. Maßnahmen

Absicherung mittels Betonleitwänden

Siehe 5.3.4.

Absicherung mittels Leitschienen

Siehe Tabelle 43.

6 BEWERTUNGSVERFAHREN FÜR ORTSFESTE HINDERNISSE IM ASFINAG-NETZ

6.1 Definition von ASI-Matrizen nach Kollisionsobjekten

KOLLISIONS-TYP	ANPRALL-GESCHWINDIGKEIT [Km/h]	ANPRALL-WINKEL [°]	MATERIAL	SEITLICHER ABSTAND	HÖHE ÜBER FAHRBAHNNEAU	ASI
Lichtmast						
Frontal	70	0	Alu	Fahrbahnrand	Straßenniveau	4,4
Frontal	100	0	Alu	Fahrbahnrand	Straßenniveau	3,6
Rohrrahmensteher						
Frontal	70	20	Stahl	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,18
Frontal	100	20	Stahl	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,19
Frontal	130	20	Stahl	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,24
Gittersteherkonstruktion						
Frontal	70	20	Stahl	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,79
Frontal	100	20	Stahl	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,65
Frontal	130	20	Stahl	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,76
VZ auf Aluminium I-Träger						
Frontal	70	20	Alu	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,35
Frontal	100	20	Alu	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,34
Frontal	130	20	Alu	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,30

Definition von ASI-Matrizen nach Kollisionsobjekten (Forts.)

KOLLISIONS-TYP	ANPRALL-GESCHWINDIGKEIT [Km/h]	BAUM-DURCHMESSER [mm]	MATERIAL	SEITLICHER ABSTAND	HÖHE ÜBER FAHRBAHNNNIVEAU	ASI
Baum						
Frontal	70	50	Tanne	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,09
Frontal	70	100	Tanne	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,09
Frontal	70	150	Tanne	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,65
Frontal	70	250	Tanne	Fahrbahnrand	Straßenniveau	1,27
Frontal	70	350	Tanne	Fahrbahnrand	Straßenniveau	1,93
Frontal	100	50	Tanne	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,07
Frontal	100	100	Tanne	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,09
Frontal	100	150	Tanne	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,42
Frontal	100	250	Tanne	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,88
Frontal	100	350	Tanne	Fahrbahnrand	Straßenniveau	1,62

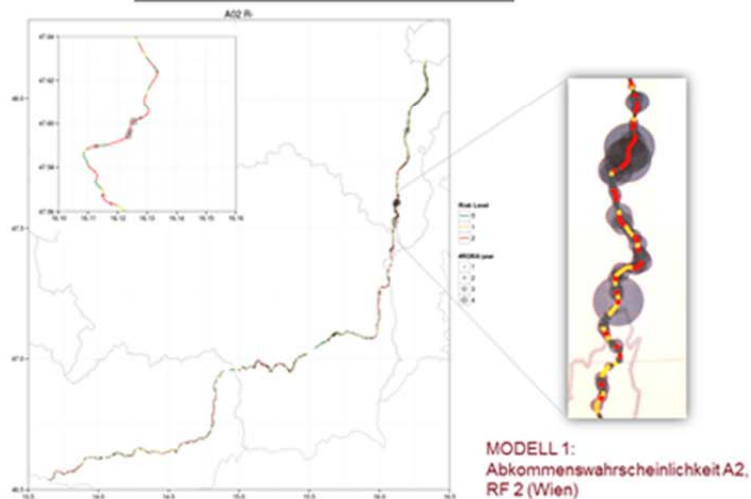
6.2 Berechnung des Kollisionsrisikos

RISIKO = Eintrittswahrscheinlichkeit x Ausmaß der Konsequenz

KAPITEL 3
Modellierung von
Abkommensunfälle

X

KAPITEL 4
Risikobewertung
von Anprallobjekten



Level 0 Geringe Abkommenswahrscheinlichkeit
Level 1 Mittlere Abkommenswahrscheinlichkeit
Level 2 Hohe Abkommenswahrscheinlichkeit

Eingangsparameter zur Bestimmung des ASI

KOLLISIONSTYP	ANPRALLGESCHWINDIGKEIT [km/h]	ANPRALLWINKEL [°]	MATERIAL	SEITLICHER ABSTAND	HÖHE ÜBER FAHRBAHNNEVEAU	ASI
Lichtmast						
Frontal	70	0	Alu	Fahrbahnrand	Straßenniveau	4,4
Frontal	100	0	Alu	Fahrbahnrand	Straßenniveau	3,6
Rohrrahmensteher						
Frontal	70	20	Stahl	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,18
Frontal	100	20	Stahl	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,19
Frontal	130	20	Stahl	Fahrbahnrand	Straßenniveau	0,24

6.3 Bewertung der spezifischen Risikosituation

Maßgeblich für die Beurteilung des Verletzungsrisikos sind verschiedene, in der Fahrzeugsicherheit sowie im Infrastrukturbereich verwendete, Bewertungskriterien. Hierbei handelt es sich um objektivierbare (nach AIS codierte) Verletzungsschweren und entsprechende Verletzungskriterien wie z.B. HIC und ASI.

Der HIC wird aufgrund der Kopfbeschleunigung bei einem Anprall errechnet. Ein üblicher Grenzwert ist ein HIC von 1.000. Dies entspricht einer 50%-igen Wahrscheinlichkeit, eine AIS 3 Verletzung zu erleiden. Mit zunehmendem HIC erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, schweren Verletzungen zu erleiden. Nach PRASSAD und MERTZ ist bei einem HIC von 3.000 jedenfalls mit tödlichen Verletzungen zu rechnen.

Der ASI wird bei der Bewertung von Fahrzeugrückhaltesystemen im Straßenbau sowie zur Evaluierung von Kunstbauten am Fahrbahnrand verwendet. Der ASI wird aus den Beschleunigungssignalen des Fahrzeugs ermittelt. Gemäß EN 1317 werden Fahrzeugrückhaltesysteme in verschiedene Anprallheftigkeitsklassen unterteilt, wobei der ASI maßgebend für die Klassifizierung ist. Die Anprallheftigkeitsstufe wird auf Basis von Anprallversuchen ermittelt, wobei schwere Fahrzeuge für die Durchbruchssicherheit und leichte Fahrzeuge für die Insassensicherheit relevant sind. Um die Anprallheftigkeitsstufe „A“ zu erreichen, darf der ASI einen Wert von 1,0 nicht übersteigen. Eine Anprallheftigkeit der Stufe „B“ erzielt ein System dann, wenn der $ASI \leq 1,4$ ist. Die Anprallheftigkeitsstufe „C“ erfolgt bei einem $ASI \leq 1,9$. Darüber hinaus gehende ASI-Werte werden keinem System zugeordnet.

Der ASI dient u.a. auch als Bewertungskriterium für die passive Sicherheit von Tragkonstruktionen für die Straßenausstattung nach EN 12767. Hierbei wird nach verschiedenen Energieabsorptionskategorien unterschieden und als Höchstwert bei einer hochenergieabsorbierenden Struktur der ASI mit 1,4 definiert. Für nicht energieabsorbierende Strukturen ist der ASI mit 1,2 festgelegt. Diese beiden Werte, welche bei der höchsten Insassensicherheitsstufe relevant sind, sind auf alle Fälle einzuhalten, wenn eine Energieabsorptionsklasse für Kunstbauten nach EN 12767 geprüft wird.

In der nachfolgenden Abbildung ist ein mögliches Beurteilungsschema in Abhängigkeit unterschiedlicher ASI-Grenzwerte und Abkommenswahrscheinlichkeiten skizziert. Dieses kann zur Beurteilung des objektspezifischen Verletzungsrisikos auf Autobahnen herangezogen werden.

Die Grenzwerte und Schwellwerte sind vom Straßenbetreiber im Rahmen des unternehmensinternen Sicherheitsmanagement eigenständig festzulegen.

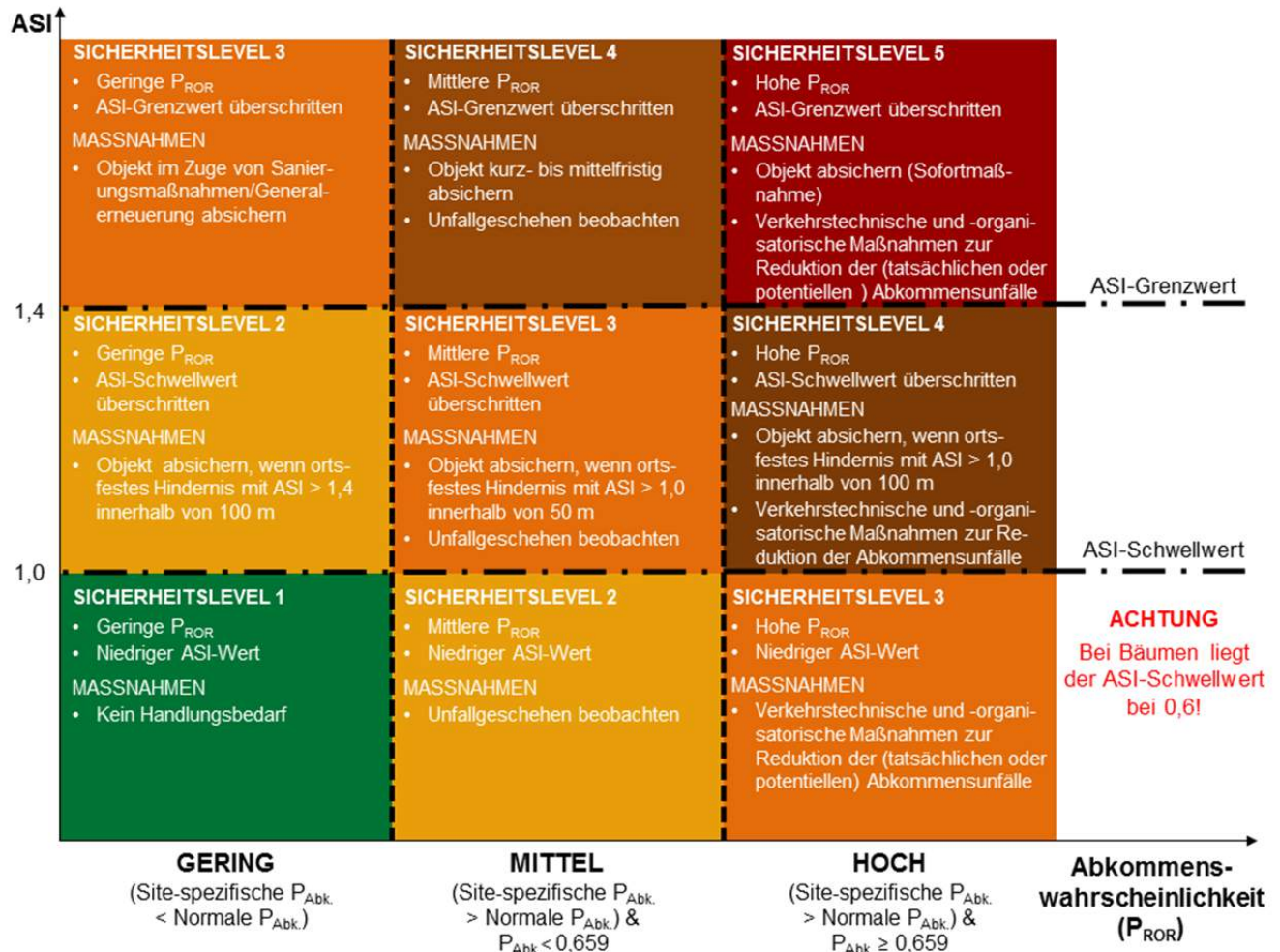


Abbildung 75: Vorschlag für eine Beurteilungsmatrix zur Ableitung von Handlungsempfehlungen

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, INNOVATION UND TECHNOLOGIE (BMVIT): „Österreichisches Verkehrssicherheitsprogramm 2011–2020“, 1.Auflage, 2011.
- [2] KURATORIUM FÜR VERKEHRSSICHERHEIT (KFV): „Status-quo-Analyse & Strategieentwicklung für ein Verkehrssicherheitsprogramm der ASFiNAG“, Endbericht Version 3.0, Wien, 2008.
- [3] TOMASCH; E. et al.: „Sicherheitsbeurteilung der Anfangselemente von Leitschienen und Betonleitwänden“, In: Forschungsarbeiten aus dem Verkehrswesen, Band 203, BMVIT, Wien, 2010.
- [4] ASFiNAG-Verkehrssicherheitsprogramm 2020, Download unter: www.asfinag.at/verkehrssicherheit/verkehrssicherheitsprogramm, Abfragedatum: 19.12.2011.
- [5] AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO): “Highway Safety Manual”, 1st Edition, 2010.
- [6] J. A. NELDER, R. W. M. WEDDERBURN, “Generalized Linear Models,” Journal of the Royal Statistical Society, Series A, General, Vol. 135, pp. 370–384, 1972.
- [7] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE • SCHIENE • VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Stadtverkehr, Arbeitsausschuss Verkehrssicherheit: „Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau (RVS) 02.02.21, Verkehrssicherheitsuntersuchung“, Wien, 2004.
- [8] HERRY, M. et al.: „Unfallkostenrechnung Straße 2007 unter Berücksichtigung des menschlichen Leids“, In: Forschungsarbeiten aus dem Verkehrswesen, Band 177, BMVIT, 2008.
- [9] EUROPEAN COMMISSION (EC): “Roadside Infrastructure for Safer European Roads (RISER), D06: European Best Practice for Roadside Design: Guidelines for Roadside Infrastructure on new and existing roads”, February, 2003. Download unter: http://ec.europa.eu/transport/roadsafety_library/publications/riser_guidelines_for_road_side_infrastructure_on_new_and_existing_roads.pdf.
- [10] LEE, J.; MANNERING, F.: „Impact of roadside features on the frequency and severity of run-off-roadway accidents. An empirical analysis“, In: Accident Analysis and Prevention, No. 34 (2002), p.149–161.

- [11] TOMASCH, E. et al.: "Required length of guardrails before hazards", In: Accident Analysis and Prevention, No. 43 (2011), p. 2112–2120.
- [12] EUROPEAN COMMISSION (EC): "Road Infrastructure Safety Protection – Core Research and Development for Road Safety in Europe; Increasing Safety and Reliability of Secondary roads for a sustainable surface transport (RIPCORD-ISEREST) ", D2.1: Accident Prediction Models and Road Safety Impact Assessment: A State-of-the-Art, 2005. Download unter: <http://ripcord.bast.de/>
- [13] HAUER, E.: „Observational Before-After Studies in Road Safety: Estimating the effect of highway and traffic engineering measures on road safety“, 1st edition, Oxford OX UK, Tarrytown NY USA, Pergamon, 1997.
- [14] NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (NCHRP): "Guidelines for Guardrail Implementation", Report 638, Transportation Research Board, Washington D.C., 2009.
- [15] HAUER, E.; PERSAUD, B.N.: "A common bias in before and after accident comparisons and its elimination", Transportation Research Record 905, 164–175, Transportation Research Board, Washington D.C., 1983.
- [16] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV), Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement: "Richtlinien für passive Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme (RPS), Köln, 2009.
- [17] MCCULLAGH, P.; NELDER, J.A.: „Generalized Linear Models“, 2nd Edition, Chapman & Hall/CRC Press, 1999.
- [18] LORD, D.; MANNERING, F.: "The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives," Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 44, no. 5, pp. 291–305, Jun. 2010.
- [19] MAHER, M.J.; SUMMERGILL, I.: "A comprehensive methodology for the fitting of predictive accident models," Accident Analysis & Prevention, vol. 28, no. 3, pp. 281–296, May 1996.
- [20] SHANKAR, V.; MANNERING, F.; BARFIELD, W.: "Effect of roadway geometrics and environmental factors on rural freeway accident frequencies," Accident Analysis & Prevention, vol. 27, no. 3, pp. 371–389, 1995.

- [21] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, INNOVATION UND TECHNOLOGIE (BMVIT), Abteilung IV/ST1: „Abschnittsverzeichnis Autobahnen und Schnellstraßen“, Stand: 1. August 2011.
- [22] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGsinstitut: ÖNORM EN 1317, Teil 1–8, Wien.
- [23] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGsinstitut: ÖNORM EN 12767 “Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen für die Straßenausstattung - Anforderungen und Prüfverfahren“, Wien, 2008.
- [24] SHOJAATI, M.: “Correlation between injury risk and impact severity index ASI”, 3rd Swiss Transport Research Conference, Ascona, March 19–21, 2003.
- [25] KLOOTWIJK, C.W.; HOOGVELT, R.H.: “Sensitivity of Car with Guardtail Impacts with a Multibody Simulation Tool”, 2007.
- [26] LAPPI-SEPPÄLÄ, M.: „Untersuchungen über die Schlankheit der Kiefer“, Institut für Forsttaxation an der Universität Helsinki, 1929.
- [27] JONSSON, M.: “Energy absorption of trees in a rockfall protection forest”, Royal Institute of Technology - Stockholm, Dissertation, 2007.
- [28] HOSCHOPF H., KUNNERT B., MOSER A., TOMASCH E., STEFFAN H.: „Ermittlung der notwendigen Aufstelllängen für Leitschienen in Kurvenbereichen unter Berücksichtigung der typischen Auslaufbewegung unterschiedlicher Fahrzeuge“, In: Forschungsarbeiten aus dem Verkehrswesen, Band 158, BMVIT, Wien, 2007.
- [29] SCHMIDT, F.; TIFFIN, J.: “Distortion of driver’ estimates of automobile speed as a function of speed adaptation”, Journal of Applied Psychology, Vol. 53. American Psychological Association, Washington, DC, 1969, pp.536–539.
- [30] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE • SCHIENE • VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Straßenbetrieb und Straßenausrüstung, AA Rückhaltesysteme: „RVS 05.02.31: Rückhaltesysteme – Anforderungen und Aufstellung“, Wien, 2011.
- [31] ELVIK, R; VAA, T.: “Handbook of Road Safety Measures”, Oxford, United Kingdom, Elsevier, 2004.
- [32] AIS Codebook 2005, update 2008
- [33] SHOJAATI M.: “ASI-Messmethode”, 1999

- [34] <http://www.nhtsa.gov/cars/rules/rulings/80g/80gii.html> (2013-06-27)
- [35] <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html> (2013-06-27)
- [36] www.euroncap.com (2013-06-28)
- [37] EUROPEAN COMMISSION (EC): “Roadside Infrastructure for Safer European Roads (RISER), Final Report, February, 2003.
- [38] STURT R., FELL Ch.: “The influence of ASI on injury risk in impacts with roadside safety barriers”, 2012. Download unter:
http://www.crow.nl/Infradagen_2012/%28112%29%20Roadsidebarriers%20-%20Influence%20ASI%20on%20injury%20risk-%20final%20version.pdf
- [39] GABAUER, DJ; GABLER, HC: “Comparison of roadside crash injury metrics using event data recorder”, In: Accident Analysis & Prevention, Vol. 40 (2008), p. 548–558.
- [40] AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO): “A Policy of Interstate Landscape Development for the national System of Interstate and Defense Highways”, 1961.
- [41] U.S. Department of Transportation (USDOT): “Vegetation Control for Safety: A Guide for Street and Highway Maintenance Personnel”, USDOT, Washington DC, 1992.
- [42] PLEDGE, A.: “The Passive Revolution Guidelines” (Draft for Consultation)

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Darstellung der Arbeitspakete im zeitlichen Ablauf und Meilensteinplan	12
Abbildung 2: Selektion potentieller Risikogruppen (Target Accident Groups, TAG) zur Modellierung von Abkommensunfällen	14
Abbildung 3: Verteilung der Abkommensunfälle im AS-Netz nach Unfalltypen	16
Abbildung 4: Anteil der Abkommensunfälle und Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn am gesamten Unfallgeschehen auf Autobahnen und Schnellstraßen (2002–2011)	19
Abbildung 5: Vergleich der Verletzungsschweren beim Anprall an ortsfeste Hindernisse und Leiteinrichtungen	21
Abbildung 6: Analyse der Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn sowie sonstige Unfälle auf Autobahnen und Schnellstraßen nach Straßenzustand	22
Abbildung 7: Analyse der Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn (Risikogruppe) auf Autobahnen und Schnellstraßen nach Längsneigung	23
Abbildung 8: Analyse der Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn im AS-Netz in Abhängigkeit von Kurvenradien	24
Abbildung 9: Vergleich der Unfälle der Risikogruppe (TAG) sowie der sonstigen Unfälle auf Autobahnen und Schnellstraßen nach Hauptfahrbahn/Rampe	25
Abbildung 10: Anteil der erkannten Anprallobjekte aufgrund der Unfallskizzen	26
Abbildung 11: Verletzungsmuster nach Art des Kollisionsobjektes	28
Abbildung 12: Schema eines Risikomodells zur Prognose von Abkommensunfällen	29
Abbildung 13: Hochrangiges Straßennetz in Österreich	37
Abbildung 14: Abkommenslängen bei tödlichen Verkehrsunfällen auf Autobahnen	37
Abbildung 15: Verteilung der Unfallanzahlen im Autobahnnetz und angepasste theoretische Verteilungen (250 m Segmentierung)	39
Abbildung 16: Anzahl der Fahrstreifen im Autobahnnetz	41
Abbildung 17: Geschwindigkeitsbereiche im Autobahnnetz	42
Abbildung 18: Jährlicher JDTV-Verlauf auf der A2 (2000-2010)	44
Abbildung 19: Im Modell berücksichtigte Autobahnabschnitte	45
Abbildung 20: Risikolevels für Abkommensunfälle entlang der A2 Südatautobahn (Richtung R-) und spezielle Betrachtung des Wechselabschnitts	50
Abbildung 21: Empirische Verteilung des relativen Risikos für Abschnitte mit Handlungsbedarf auf der A2 Südatautobahn	50
Abbildung 22: Zusammenhang zwischen AIS-Einzelverletzungsschwere und Überlebenswahrscheinlichkeit	58
Abbildung 23: Risikofunktionen für unterschiedliche Verletzungsschweren nach [34]	59
Abbildung 24: Zusammenhang zwischen ASI und HIC ([24],[33])	60
Abbildung 25: Zusammenhang zwischen ASI und Geschwindigkeit bzw. HIC [25]	60

Abbildung 26: Zusammenhang zwischen HIC und ASI [38]	61
Abbildung 27: Risikofunktionen schwere Verletzungen von MAIS 3+ zu erleiden in Zusammenhang mit dem ASI und THIV	62
Abbildung 28: Geo Metro, FE Model	71
Abbildung 29: Anprallobjekt Lichtmast und konstruktive Ausführung	72
Abbildung 30: Simulationsmodell der Anbindung an die Grundplatte des Lichtmastes	73
Abbildung 31: Startpositionen des Fahrzeugs beim Anprall an den Lichtmast	74
Abbildung 32: Deformationen am Fahrzeug in den verschiedenen Situationen	76
Abbildung 33: Verkehrszeichen auf I-Träger	78
Abbildung 34: Darstellung der frontalen und lateralen Anprallkonfigurationen	78
Abbildung 35: Deformationsbild beim Anprall an ein VZ auf I-Träger (Standard)	82
Abbildung 36: Vergleich der Deformationsbilder beim Front- und Seitenanprall (100 km/h) mit VZ auf I-Träger und unterschiedlichen Versagenskriterien	82
Abbildung 37: Anprallheftigkeit (ASI) und Intrusionen bei Anprallsimulation VZ auf I-Träger	83
Abbildung 38: Darstellung des Rohrrahmens	84
Abbildung 39: Darstellung der frontalen und lateralen Anprallkonfiguration beim Rohrrahmen	84
Abbildung 40: Deformationsbild beim Anprall an einen Rohrrahmen (Standard)	88
Abbildung 41: Vergleich der Deformationsbilder beim Front- und Seitenanprall mit einem Rohrrahmen und unterschiedlichem Versagenskriterium	88
Abbildung 42: Anprallheftigkeit (ASI) und Intrusionen bei Anprallsimulation mit Rohrrahmen	89
Abbildung 43: Aufbau Gittersteherkonstruktion	89
Abbildung 44: Darstellung der frontalen und lateralen Anprallkonfiguration mit eingezeichnetem Geschwindigkeitsvektor	90
Abbildung 45: Deformationsbild beim Anprall an die Gittersteherkonstruktion (Standard)	93
Abbildung 46: Anprallheftigkeit ASI und Intrusionen bei Anprallsimulation an einen Gittersteher	94
Abbildung 47: Vergleich der Deformationsbilder beim Front- und Seitenanprall mit einem Gittersteher und unterschiedlichem Versagenskriterium	95
Abbildung 48: Darstellung der frontalen und lateralen Anprallkonfiguration bei Baumkollisionen	96
Abbildung 49: Vergleich der Deformationsbilder beim Frontanprall an einen Baum bei unterschiedlichen Baumdurchmessern und einer Anprallgeschwindigkeit von 70 km/h	99
Abbildung 50: Vergleich der Deformationsbilder beim Frontanprall an einen Baum bei unterschiedlichen Baumdurchmessern und einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h	100
Abbildung 51: Vergleich der Deformationsbilder beim Seitenanprall an einen Baum bei unterschiedlichen Baumdurchmessern und einer Anprallgeschwindigkeit von 70 km/h	100
Abbildung 52: Vergleich der Deformationsbilder beim Seitenanprall an einen Baum bei unterschiedlichen Baumdurchmessern und einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h	101
Abbildung 53: Anprallheftigkeit ASI bei Baumkollisionen mit unterschiedlichem Durchmesser und Anprallgeschwindigkeiten	102

Abbildung 54: Theoretischer Abkommenswinkel in Bezug zum Seitenabstand auf gerader Fahrbahn	109
Abbildung 55: Theoretischer Abkommenswinkel in Bezug zum Seitenabstand bei Kurven.....	110
Abbildung 56: Zusammenhang zwischen Abkommensgeschwindigkeit und Abkommenswinkel von PKW bei unterschiedlichem Abstand zur Fahrbahnbegrenzung und trockener Straßen	111
Abbildung 57: Zusammenhang zwischen Abkommensgeschwindigkeit und Abkommenswinkel von PKW bei unterschiedlichem Abstand zur Fahrbahnbegrenzung auf trockener Straße und Kurvenradius	111
Abbildung 58: Verteilung der Abkommensgeschwindigkeiten und Abkommenswinkel bei Realunfällen.....	112
Abbildung 59: Anprallstelle am Fahrzeug beim Erstkontakt mit einem Hindernis am ASFINAG-Netz	113
Abbildung 60: Anprallwinkel am Fahrzeug beim Erstkontakt mit einem Hindernis am ASFINAG-Netz	113
Abbildung 61: Bremsweg bei Abkommensunfällen und daraus abgeleiteter Seitenabstand	115
Abbildung 62: Sicherheitsbereich bei unterschiedlichem Abkommenswinkel, befahrbarem Fahrbahnrand und einer zulässigen Kollisionsgeschwindigkeit v_k	116
Abbildung 63: Sicherheitsbereich bei unterschiedlichem Seitenabstand des Fahrzeugs und erlaubter Kollisionsgeschwindigkeit v_k	117
Abbildung 64: Horizontaler Sicherheitsbereich bei Abkommensunfällen mit unterschiedlichem Abkommenswinkel, Böschungsneigung von 2:1 und Kollisionsgeschwindigkeit v_k	118
Abbildung 65: Vertikaler Sicherheitsbereich bei unterschiedlichen Seitenabständen unter der Voraussetzung einer befahrbaren Böschung, einer Steigung von 2:1 und Kollisionsgeschwindigkeit v_k	118
Abbildung 66: Horizontaler Sicherheitsbereich bei unterschiedlichen Seitenabständen unter der Voraussetzung einer befahrbaren Böschung, einer Steigung von 2:1 und Kollisionsgeschwindigkeit v_k	119
Abbildung 67: Vertikaler Sicherheitsbereich bei unterschiedlichen Seitenabständen unter der Voraussetzung einer befahrbaren Böschung, einer Steigung von 2:1 und Kollisionsgeschwindigkeit v_k	119
Abbildung 68: PC-Crash Modellaufbau bei einer Böschungsneigung von 2:1	120
Abbildung 69: Sicherheitszone beim Befahren der Fahrbahnseite bei unterschiedlichem Abkommenswinkel	122
Abbildung 70: Theoretische Sicherheitszone durch Simulation von Abkommensunfällen bei einer Böschungsneigung von 2:1 und vorliegenden Reibungsverhältnissen $\mu = 0,3$	123
Abbildung 71: Theoretische horizontale Sicherheitszone und Anprallgeschwindigkeit durch Simulation von Abkommensunfällen bei einer Böschungsneigung von 2:1 und vorliegenden Reibungsverhältnissen $\mu = 0,3$	123

Abbildung 72: Theoretische vertikale Sicherheitszone und Anprallgeschwindigkeit durch Simulation von Abkommensunfällen bei einer Böschungsneigung von 2:1 und vorliegenden

Reibungsverhältnissen $\mu = 0,3$ 124

Abbildung 73: Kritische Abstände für Autobahnen und Straßen mit $V_{zul} > 100$ km/h [16] 130

Abbildung 74: Zusammenhang zwischen Kollisionswahrscheinlichkeit und –schwere [37] 136

Abbildung 75: Beurteilungsmatrix zur Ableitung von Handlungsempfehlungen 150

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Kriterien zur Selektion von Abkommensunfällen.....	15
Tabelle 2: Unfallgeschehen auf Autobahnen und Schnellstraßen (2002–2011)	18
Tabelle 3: Analyse der Risikogruppe nach Anprallobjekten.....	20
Tabelle 4: Verwendung aktueller Befahrungsvideos (RoadSTAR) zwecks Identifikation zusätzlicher Anprallobjekten.....	27
Tabelle 5: Für die Modellbildung berücksichtigte Autobahnen	36
Tabelle 6: Übersicht der für die Modellierung verwendeten Variablen	40
Tabelle 7: Übersicht über verwendeten Geschwindigkeitsvariablen und Pannestreifeninformationen	41
Tabelle 8: Übersicht über die verwendeten Indikatorvariablen zur Identifikation von Anschlussstellen, Knoten, Raststationen und Halteplätzen.....	43
Tabelle 9: Übersicht über die verwendeten Variablen zur Modellierung der Verkehrsstärke	43
Tabelle 10: Selektiertes Modell für Abkommensunfälle (TAG) auf Non-Event Sections	47
Tabelle 11: Selektiertes Modell für Abkommensunfälle (TAG) auf Event Sections	47
Tabelle 12: Selektiertes Modell für sämtliche Unfälle auf Non-Event Sections	48
Tabelle 13: Selektiertes Modell für sämtliche Unfälle auf Event Sections	48
Tabelle 14: Ergebnis der Modellrechnung für Abkommensunfälle im Streckenabschnitt.....	52
Tabelle 15: Ergebnis der Modellrechnung für alle Unfälle im Streckenabschnitt.....	52
Tabelle 16: Ergebnis der Modellrechnung für Abkommensunfälle im Knoten	54
Tabelle 17: Ergebnis der Modellrechnung für alle Unfälle im Knoten	55
Tabelle 18: Verletzungsschwere nach AIS	57
Tabelle 19: Prüfparameter und Aufhaltestufen für Schutzeinrichtungen	64
Tabelle 20: Kriterien für die Anprallprüfungen.....	65
Tabelle 21: Anprallheftigkeitsstufen	65
Tabelle 22: Geschwindigkeitsklasse	68
Tabelle 23: Energieabsorptionskategorie.....	68
Tabelle 24: Insassensicherheit.....	68
Tabelle 25: Lastmatrix für FE Simulationen verschiedener Anprallobjekte	70
Tabelle 26: Vergleich des FE Modells mit Real-Fahrzeugversuchen hinsichtlich der Steifigkeit	71
Tabelle 27: Simulationsmatrix Anprallobjekt Lichtmast.....	74
Tabelle 28: Ergebnisse der Anprallsimulationen an einen Lichtmast	75
Tabelle 29: Berechnungsdetails der Lichtmastsimulation	76
Tabelle 30: Anprallsimulationen für die I-Trägerkonstruktion.....	80
Tabelle 31: Simulationsergebnisse für Anprall an ein VZ auf I-Träger	81
Tabelle 32: Anprallsimulationen für die Rohrrahmenkonstruktion	86
Tabelle 33: ASI Werte für alle Anprallkonfigurationen mit dem Rohrrahmen	87

Tabelle 34: Anprallsimulationen für die Gittersteherkonstruktion.....	91
Tabelle 35: ASI Werte für alle Standard-Anprallkonfigurationen mit einem Gittersteher	92
Tabelle 36: Anprallsimulationsmatrix Baum	98
Tabelle 37: ASI Werte für Baumkollisionen.....	99
Tabelle 38: Überblick über die Simulationsergebnisse nach Anprallobjekten	106
Tabelle 39: Verteilung der Abkommensgeschwindigkeiten und Abkommenswinkel bei Realunfällen	112
Tabelle 40: Vergleich der Unfallzahlen auf Autobahnen und Schnellstraßen.....	126
Tabelle 41: Mindestanforderung für die Wahl der Leistungsstufe von Anpralldämpfer	131
Tabelle 42: Sicherheitseffekte von Anpralldämpfer bei Anprall an ein ortsfestes Hindernis	131
Tabelle 43: Sicherheitseffekte von Leitschienen entlang des Fahrbahnrandes auf Abkommensunfälle.....	132