



BENCHMARK

Beurteilung der Effizienz derzeit eingesetzter Absicherungsmaßnahmen von Tunnelnischen und -portalen beim PKW-Anprall

Graz, November 2019

BENCHMARK

Ernst Tomasch*, Simon Franz Heindl*, Anton Hinterkircher*, Gregor Gstrein*,
Alexander Hödl*, Hermann Steffan*, Ulrich Schneckenreither**

| | |
|-------------------|---|
| Acronym: | BENCHMARK |
| Project Ref: | Ausschreibung: Mobilität der Zukunft – VIF 2015; Projekt Nr. 854613 |
| Client: | Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) |
| Project Partners: | *) Technische Universität Graz, Institut für Fahrzeugsicherheit **) Dr. Steffan Datentechnik Gesellschaft m.b.H. |
| Date: | 25.11.2019 |
| Pages: | 87 |
| Confidentiality: | Public |
| Version: | Endbericht |
| Keywords: | Tunnelportal, Tunnel-Pannenbucht, Tunnelnische, Absicherungsmaßnahmen, Fahrzeugrückhaltesystem, Anpralldämpfer, Verletzungsrisiko Fahrzeuginsasse |
| Abstract: | Problemstellung: Im Österreichischen Verkehrssicherheitsprogramm 2011-2020 wird die Tunnelsicherheit als eigener Punkt festgehalten und eine Harmonisierung der Gestaltung der Tunnelportale als Ziel definiert. Ziel: Es sollen unterschiedliche Absicherungsmaßnahmen untersucht werden. Fazit: Derzeit erfüllt keine der untersuchten Absicherungsvarianten alle in diesem Forschungsprojekt zu Grunde gelegten Bewertungskriterien optimal. Die Absicherung durch ein schräg aufgestelltes 4 m Betonelement ist nicht zu empfehlen. Das 8 m Betonleitwandelement liegt in etwa am Niveau des nicht-rückleitenden Alpina F1-50. Die beste Gesamtbewertung wurde für den verfügbaren nicht-rückleitenden Anpralldämpferprototyp <Prototyp F1-80> festgestellt. Unter Bezugnahme weiterer zu berücksichtigender Kriterien wie z.B. Anlagenverhältnisse, Wirtschaftlichkeitsüberlegungen, Betriebsverhältnisse, etc. ist die effizienteste Absicherungsvariante zu wählen. |
| Approvals: | Project Manager: Technische Universität Graz, Institut für Fahrzeugsicherheit |

The information contained herein is the property of the Vehicle Safety Institute – Graz University of Technology and does not necessarily reflect the views or policies of the [Client] for whom this report was prepared. Whilst every effort has been made to ensure that the matter presented in this report is relevant, accurate and up-to-date, Vehicle Safety Institute at Graz University of Technology cannot accept any liability for any error or omission, or reliance on part or all of the content in another context.

ABSTRACT

Scope: In the past years the number of fatalities on Austrian motorways is decreasing. Although the Austrian Traffic Safety Programme 2011-2020 introduced tunnel safety as a major point. Tunnel portal and tunnel lay-by design should be harmonized and defined as a guideline. Further ASFINAG has mentioned tunnel safety in their traffic safety programme 2020.

Objective: Currently there are a number of measures available at tunnel lay-bys and –portals (e.g. crash cushions, concrete barriers, guardrails, etc.) to protect occupants of passenger cars in case of an accident. Nonetheless, there are no reliable studies concerning the effectiveness of those measures available. The present research project intended to find the most effective protection measure for tunnel lay-bys and –portals by applying scientific methods.

Conclusion: The assessment of different protection measures is based on one single test for each measure. Due to the high number of parameters results can vary in real tests and other results can be achieved if the impact configuration deviates from the tests.

At the moment no protection measure tested satisfy all within the project defined assessment criteria in an optimal way. The angular positioned 4 m concrete barrier as currently used in practice in tunnel lay-bys cannot be recommended. Protecting a tunnel lay-by using an angular positioned 8 m concrete barrier is at the level of the crash cushion F1-50. The prototype Alpina F1-80 showed the best results in the assessment.

Besides the assessment criteria defined within the project further criteria such as the on-site requirements (e.g. available space, etc.), maintenance, operational conditions, etc. the efficient measure should be used.

KURZFASSUNG

Problemstellung: Wie an der Entwicklung der Unfallzahlen festzustellen ist, nimmt die Anzahl an tödlichen Verkehrsunfällen auf Autobahnen und Schnellstraßen in den letzten Jahren stetig ab. Im Österreichischen Verkehrssicherheitsprogramm 2011-2020 wird die Tunnelsicherheit, insbesondere Tunnelportale und Tunnel-Pannenbuchten, als eigener Punkt festgehalten und eine Harmonisierung der Gestaltung der Tunnelportale als Ziel definiert. Ebenso ist die Tunnelsicherheit im Verkehrssicherheitsprogramm 2020 der ASFINAG als eine Maßnahme festgehalten.

Ziel: Zur Absicherung von Tunnel-Pannenbuchten und -portalen gibt es derzeit unterschiedliche Varianten (Anpralldämpfer, Betonleitwände, Leitschienen, etc.). Derzeit existieren jedoch keine genauen Kenntnisse über die Effizienz dieser unterschiedlichen Absicherungsvarianten. Durch das Forschungsvorhaben soll die effizienteste Form der Absicherung wissenschaftlich ermittelt werden.

Fazit: Die Beurteilung der unterschiedlichen Absicherungsmaßnahmen erfolgte auf je einem Realversuch. Durch die große Anzahl an Einflussparametern können Ergebnisse im Realversuch streuen und bei einer von den Versuchen abweichenden Anprallkonfiguration sind andere Ergebnisse möglich.

Derzeit erfüllt keine der Absicherungsvarianten alle in diesem Forschungsprojekt zu Grunde gelegten Bewertungskriterien optimal. Die Absicherung durch ein schräg aufgestelltes Betonelement, mit einer Länge von 4 m, ist nicht zu empfehlen. Die Gesamtbewertung für das 8 m Betonleitwandelement liegt am Niveau des nicht-rückleitenden Anpralldämpfer Alpina F1- 50. Die beste Gesamtbewertung wurde für den für das Projekt verfügbaren nicht-rückleitenden Anpralldämpferprototyp <Prototyp F1-80> festgestellt.

Unter Bezugnahme auf die Bewertungskriterien, Anlagenverhältnisse, Wirtschaftlichkeitsüberlegungen, Betriebsverhältnisse, etc. ist die effizienteste Absicherungsvariante zu wählen.

EXECUTIVE SUMMARY

Scope: In the past years the number of fatalities on Austrian motorways is decreasing. Although the Austrian Traffic Safety Programme 2011-2020 introduced tunnel safety as a major point. Tunnel portal and tunnel lay-by design should be harmonized and defined as a guideline. Further ASFINAG has mentioned tunnel safety in their traffic safety programme 2020.

The guidelines RVS 09.01.24 and RVS 09.01.25 are developed to ensure a proper protection of tunnel lay-bys and portals. The scope of application is set in both guidelines to new plans for road tunnels and galleries. For redevelopment and improvement, both guidelines should apply *mutatis mutandis*, unless contrary to the principle of proportionality. Thus it is obvious that in practise the protection of tunnel lay-bys and portals differ from these guidelines.

Objective: Currently there are a number of measures available at tunnel lay-bys and –portals (e.g. crash cushions, concrete barriers, guardrails, etc.) to protect occupants of passenger cars in case of an accident. Nonetheless, there are no reliable studies concerning the effectiveness of those measures available. The present research project intended to find the most effective protection measure for tunnel lay-bys and –portals by applying scientific methods. The scenarios examined by Finite Element (FE) simulation and crash testing are stated as follows:

- tunnel lay-by
 - impact against an angular positioned (non RVS-compliant) 4 m concrete barrier as currently used in practice
 - impact against an angular positioned (RVS-compliant) 8 m concrete barrier
 - impact against a non-redirecting crash cushion (manufacturing type Alpina F1-50; design impact speed below 100 km/h)
 - impact against a non-redirecting crash cushion (prototype Alpina F1-80; design impact speed below 100 km/h)
- tunnel portal
 - impact against an system of 6 x 4 m concrete barrier elements following RVS 09.01.25 as currently used in practice

Method: The method is divided into three steps: Accident analysis and simulation, Finite Element Simulation and testing.

The accident analysis is used to define impact conditions such as impact angle, etc. The impact velocity is set to 100 km/h according to the speed limit valid for one-way traffic tunnels. FE models were used to simulate scenarios varying parameters like impact angle, impact point, degree of overlap, etc.

The vehicle models used are according to EN 1317. For tunnel lay-b scenarios a TB 11 (m=900 kg) is used, whereas for tunnel portal scenarios a TB 32 (m=1.500 kg) is used.

The protection measures were assessed by the results from FE analysis and crash tests. The assessment of traffic safety is done by various criteria like ASI, THIV, danger to other road users, intrusion into passenger compartment, etc.

Results: Both FE simulations and crash tests for the impact against an angular positioned (non RVS-compliant) 4 m concrete barrier as currently used in practice showed a take-off of the vehicle and a redirection of the vehicle into the traffic lane. If there is no secondary collision with other road users the vehicle will likely crash into the opposite (left) tunnel wall. During this uncontrolled vehicle motion the occupants will not be in an optimal and protective position anymore. The total rate for this protection principle is 4.95.

The results for an impact against an angular positioned 8 m concrete guide wall showed an improvement in occupant safety. The post-crash speed is, compared to the scenario using a 4m concrete barrier, significantly higher. If there is no secondary collision with other road users the vehicle will likely crash into the opposite (left) tunnel wall. The total rate for this protection principle is 3.62.

In both scenarios using concrete barriers the motion of the vehicle is uncontrolled and its final position is likely to be on the traffic lane.

For the impact against a crash cushion Alpina F1-50 no redirection of the vehicle into the traffic lane was observed. The vehicle is decelerated until standstill. No danger to other road users was observed. Nonetheless, the occupant load limits according to EN 1317 were, as this product was not designed for such an impact scenario, far exceeded. The total rate for this protection principle is between 3.00 and 3.42.

The analysis of the impact against a crash cushion prototype Alpina F1-80 showed a clear improvement compared to Alpina F1-50. The occupant load limits according to EN 1317 were exceeded, but were significantly lower than observed for Alpina F1-50. No redirection of the vehicle onto the traffic lane was observed. The total rate for this protection principle is between 2.67 and 3.08.

During the impact against a system of concrete barriers at a tunnel portal the occupant load limits were slightly exceeded. The vehicle was redirected into the traffic lane and into the tunnel. The final position, depending on the impact angle, may be on either traffic lane. Due to the short overall length for portal protection systems as used in practice the observed behaviour will not be comparable to impacts against systems tested according to EN 1317.

Conclusion: At the moment no protection measure tested satisfy all defined assessment criteria in an optimal way. The angular positioned 4 m concrete barrier as currently used in practice in tunnel lay-bys cannot be recommended. In some real accidents these barriers broke at impact which led to a further crash against the tunnel lay-by front end. Further, the redirection of the vehicle into the traffic lane is a high risk for other road users.

Protecting a tunnel lay-by using an angular positioned 8 m concrete barrier is performing better than the 4 m concrete barrier. No breakage of the system could be observed, but redirection of the vehicle into the traffic lane is a risk for other road users.

The protection of a tunnel lay-bys using crash cushions showed fair results. The crash cushion F1-50 performed better than the 8 m concrete barrier. However, the prototype Alpina F1-80 earned the best results in the assessment. There could no insights be gained for an impact against the side part of the cushion because no correspondent test has been conducted. However, the prototype was designed as non-redirecting crash cushion. Impact tests against the front of the system were conducted only. Within the present project no conclusion can be drawn concerning impacts with other than full front overlap.

Besides the assessment criteria defined within the project further criteria such as the on-site requirements (e.g. available space, etc.), maintenance, operational conditions, etc. the efficient measure should be used.

The protection of tunnel lay-bys using a 4m concrete barrier should be replaced in the short-term.

ZUSAMMENFASSUNG

Problemstellung: Wie an der Entwicklung der Unfallzahlen festzustellen ist, nimmt die Anzahl an tödlichen Verkehrsunfällen auf Autobahnen und Schnellstraßen in den letzten Jahren stetig ab. Im Österreichischen Verkehrssicherheitsprogramm 2011-2020 die Tunnelsicherheit, insbesondere Tunnelportale und Tunnel-Pannenbuchten, als eigener Punkt festgehalten und eine Harmonisierung der Gestaltung der Tunnelportale als Ziel definiert. Ebenso ist die Tunnelsicherheit im Verkehrssicherheitsprogramm 2020 der ASFINAG als eine Maßnahme festgehalten.

Mit den RVS 09.01.24 und RVS 09.01.25 existiert ein Regelwerk, welches eine Absicherung der Tunnel-Pannenbuchten und der Tunnelportale sicherstellen soll. Der Anwendungsbereich ist in beiden Vorschriften auf Neuplanungen von Straßentunneln und Galerien festgelegt. Bei Sanierungen und Verbesserungen sind beide Richtlinien sinngemäß anzuwenden, sofern dies dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit nicht widerspricht. Daher ist in der Praxis oft noch eine von den RVS 09.01.24 und RVS 09.01.25 abweichende Absicherung von Tunnel-Pannenbuchten und Tunnelportale möglich. Bei der Entwicklung der RVS 09.01.24 und RVS 09.01.25 standen keine objektiven Versuchsdaten zur Verfügung und damit auch die Kenntnis der tatsächlichen Wirksamkeit der Absicherungsvarianten. Aus Realunfällen und Videoanalysen wurde allerdings ein mögliches Durchbrechen der in der Praxis vorliegenden Absicherung festgestellt. Ferner konnte auch ein Zurückschleudern der Fahrzeuge auf die Fahrbahn festgestellt werden.

Da derzeit in der EN 1317 keine spezifischen Prüfbedingungen für Tunnel-Pannenbuchten enthalten sind, wurden die gewählten Prüfbedingungen lediglich an die EN 1317 angelehnt, aber aus realen Unfallszenarien abgeleitet.

Ziel: Zur Absicherung von Tunnel-Pannenbuchten und -portalen gibt es derzeit unterschiedliche Varianten (Anpralldämpfer, Betonleitwände, Leitschienen, etc.). Derzeit existieren jedoch keine genauen Kenntnisse über die Effizienz dieser unterschiedlichen Absicherungsvarianten. Durch das Forschungsvorhaben soll die effizienteste Form der Absicherung wissenschaftlich ermittelt werden.

Folgende Absicherungsvarianten werden, entsprechend der Ausschreibung und Festlegungen in den Projektbesprechungen, durch Finite-Elemente (FE) Simulation und Versuch bewertet:

- Tunnel-Pannenbucht
 - Anprall an einem schräg aufgestellten 4 m langen Betonleitwandelement
 - Anprall an einem RVS 09.01.24 konformen Betonelement 8 m langen Betonleitwandelement
 - Anprall an einen nicht-rückleitenden Anpralldämpfer des Alpina Typs F1-50
 - Anprall an einen nicht-rückleitenden Anpralldämpfer Prototyp F1-80

- Tunnelportal
 - Anprall an ein an die RVS 09.01.25 angelehntes und in der Praxis häufig verwendetes, vorgezogenes Fertigteil-Betonleitwandssystem zur Absicherung des Tunnelportals

Methode: Die zur Zielerreichung notwendigen Schritte umfassen die Unfallsimulation und Unfallanalyse zur Bestimmung von Eingangsdaten der Finiten Elementen (FE) Simulation sowie der nachfolgenden Realversuche. Aus der Unfallsimulation und der Unfallanalyse werden Anprallwinkel an die Absicherungsvariante festgelegt. Die Anprallgeschwindigkeit ist mit der zulässigen Geschwindigkeit in Richtungsverkehrstunnel mit 100 km/h definiert. Durch die Variationsmöglichkeiten in der FE Simulation werden unterschiedliche Anprallkonfigurationen wie beispielsweise Anprallwinkel, Anprallpunkt, Überdeckungsgrad, etc. simuliert. Der Fahrzeugtyp entspricht jenem der EN 1317. Für die Tunnel-Pannenbucht wird der TB 11 mit einer Masse von ca. 900 kg und für das Tunnelportal der TB 32 mit einer Masse von ca. 1.500 kg verwendet.

Die Bewertung der Absicherungsmaßnahmen erfolgt auf Grund von Ergebnissen aus FE Simulationen und Realversuchen. Die Bewertung der Verkehrssicherheit erfolgt über unterschiedliche Kriterien wie beispielsweise ASI, THIV, Gefährdung weiterer Verkehrsteilnehmer, Intrusionen in die Fahrgastzelle, etc.

Ergebnisse: Bei der Analyse des schräg aufgestellten Betonelements mit einer Länge von 4 m wurde in den FE Simulationen und Versuchen ein Aufsteigen und Abheben des Fahrzeugs nach der Kollision mit Zurückleitung des Fahrzeugs in die Fahrspur festgestellt. Sofern es nicht zu einer Kollision mit dem Nachfolgeverkehr kommt, prallt das Fahrzeug gegen die gegenüberliegende Tunnelwand. Dies ist mit einer unkontrollierten Fahrzeugbewegung verbunden und der Insasse befindet sich ebenfalls nicht mehr in einer optimalen Sitzposition. Die Gesamtbewertung ergibt sich für das 4 m Betonleitwandelement mit 4,95.

Obwohl die Ergebnisse für ein 8 m langes Betonleitwandelement beim Primäranprall bereits eine Verbesserung der Sicherheit für den Insassen zeigten, ist die Gefährdung des Nachfolgeverkehrs ein maßgeblicher negativer Faktor. Die Auslaufgeschwindigkeit nach der Kollision ist für diese Absicherungsmaßnahme höher, als beim 4 m Betonleitwandelement und das Fahrzeug kommt somit mit einer deutlich höheren Geschwindigkeit wieder zurück auf die Fahrspur. Entweder prallt das Fahrzeug gegen die gegenüberliegende Tunnelwand oder es kann zu einer Kollision mit dem Nachfolgeverkehr kommen. Das 8 m lange Betonleitwandelement wird mit 3,62 bewertet.

Bei beiden Varianten ist die Endlage des Fahrzeuges vollkommen unkontrolliert im Bereich der Fahrstreifen.

Bei der Absicherung der Tunnel-Pannenbucht durch einen nicht-rückleitenden Anpralldämpfer Alpina F1-50 erfolgte keine Zurückleitung des Fahrzeugs auf die Fahrspur. Das Fahrzeug wird vollständig vom Anpralldämpfer verzögert. Es konnte keine Gefährdung Dritter festgestellt werden. Die Grenzwerte für

Insassenbelastung nach den Kriterien der EN 1317 werden allerdings weit überschritten, da dieser Anpralldämpfer für die Anprallkonfiguration nicht ausgelegt ist. Die Gesamtbewertung liegt zwischen 3,00 und 3,42.

Die Auswertung des Anprallversuchs an dem zur Verfügung gestellten Anpralldämpfer <Prototyp F1-80> zeigte eine deutliche Verbesserung des Insassenschutzes im Vergleich zum Alpina F1-50. Die Insassenbelastung nach den Kriterien der EN 1317 wurden noch überschritten, jedoch sind diese signifikant niedriger als beim F1-50. Ebenfalls ist dieser <Prototyp F1-80> ein nicht-rückleitender Anpralldämpfer und das Fahrzeug wird nach dem Anprall nicht auf die Fahrbahn zurückgeschleudert. Die Gesamtbewertung liegt zwischen 2,67 und 3,08.

Beim Anprall an ein Betonleitwandsystem zur Absicherung des Tunnelportals waren die Insassenwerte nach der EN 1317 geringfügig über den Grenzwerten. Das Fahrzeug wird in Fahrtrichtung abgelenkt und wird in den Tunnel hinein gelenkt. Die Endlage des Fahrzeugs kann, je nach realem Anprallwinkel, auf der ersten Fahrspur sein oder aber auch auf anderen Fahrspuren zu liegen kommen. Das Verhalten des Fahrzeugs entspricht aufgrund der in der Praxis gewählten kurzen Aufstelllänge jedoch sicher nicht dem Verhalten wie es auch beim Anprall an ein nach EN 1317 getestetes FRS der Fall sein würde.

Fazit: Die Beurteilung der unterschiedlichen Absicherungsmaßnahmen erfolgte auf je einem Realversuch. Durch die große Anzahl an Einflussparametern können Ergebnisse im Realversuch streuen und bei einer von den Versuchen abweichenden Anprallkonfiguration sind andere Ergebnisse möglich.

Derzeit erfüllt keine der Absicherungsvarianten alle definierten Bewertungskriterien optimal. Die derzeitige Absicherung durch ein schräg aufgestelltes Betonelement mit einer Länge von 4 m in der Tunnel-Pannenbucht, ist nicht zu empfehlen. Hier wurde bereits bei Verkehrsunfällen ein Durchbrechen des Elements beim Anprall festgestellt und es erfolgt dadurch ein Anprall an die Tunnel-Pannenbuchtstirnwand. Das Fahrzeug steigt nach dem Anprall hoch und verdreht sich in der Flugphase um die Längsachse. Anschließend kollidiert das Fahrzeug mit der gegenüberliegenden Tunnelwand.

Im Gegensatz zum 4 m langen Betonleitwandelement schneidet das 8 m lange Betonleitwandelement deutlich besser ab. Die Gesamtbewertung ist in etwa am Niveau des nicht-rückleitenden Anpralldämpfers F1-50.

Die Absicherung der Tunnel-Pannenbucht durch einen Anpralldämpfer hat gut abgeschnitten, insbesondere hat in der Gesamtbewertung der getestete <Prototypen F1-80> nicht-rückleitenden Anpralldämpfer am besten abgeschnitten. Erkenntnisse zum Verhalten des Anpralldämpfers bei einem Anprall eines Fahrzeugs an die Seite des Anpralldämpfers sind nicht verfügbar. Hierzu fehlt ein entsprechender Anpralltest. Der entsprechende Anpralldämpfer ist allerdings als nicht-rückleitendes System konzipiert. Es wurde nur ein Anpralltest an die Stirnseite des Anpralldämpfers durchgeführt. In diesem

Zusammenfassung

Projekt kann somit noch keine Aussage getroffen werden, wie sich ein Anprall mit einer Teilüberdeckung des Fahrzeugs (es trifft beispielsweise nur die rechte Fahrzeughälfte den Anpralldämpfer) auf die Verkehrssicherheit auswirkt.

Jedenfalls sollte die Absicherung der Tunnel-Pannenbucht zumindest die in dieser Untersuchung festgestellte optimalste Absicherungsvariante mindestens erfüllen, bestenfalls jedoch übertreffen. Die praxisgängige Lösung mit einer Absicherung der Tunnel-Pannenbucht durch ein 4 m langes Betonleitelement ist jedenfalls kurzfristig zu ersetzen.

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | EINLEITUNG | 1 |
| <hr/> | | |
| 1.1 | Problemstellung | 1 |
| 1.2 | Motivation | 4 |
| 1.3 | Ziele | 6 |
| 2 | STAND DER TECHNIK | 7 |
| <hr/> | | |
| 2.1 | Derzeitige Absicherungsmaßnahmen nach RVS | 7 |
| 2.1.1 | Tunnel-Pannenbucht | 7 |
| 2.1.2 | Tunnelportal | 8 |
| 2.2 | Fahrzeugdynamik bei Abkommensunfällen | 8 |
| 2.3 | Bewertung der Insassenbelastung in Simulation und Versuch | 9 |
| 3 | METHODE | 11 |
| <hr/> | | |
| 3.1 | Geometrische Randbedingungen | 11 |
| 3.2 | Fahrdynamische Randbedingungen | 12 |
| 3.2.1 | Theoretische Überlegungen | 12 |
| 3.2.2 | Analyse von Unfalldaten | 14 |
| 3.2.3 | Lastmatrix Anprallwinkel | 15 |
| 3.3 | Finite-Elemente Simulation | 18 |
| 3.3.1 | Fahrzeuge | 18 |
| 3.3.2 | Fahrzeugrückhaltesysteme (FRS) | 19 |
| 3.3.3 | Tunnel-Pannenbucht | 19 |
| 3.3.4 | Tunnelportal | 21 |
| 3.3.5 | Anprallparameter | 21 |
| 3.3.6 | Simulationsmatrix | 24 |
| 3.4 | Versuch | 26 |
| 3.4.1 | Testfahrzeuge | 26 |
| 3.4.2 | Fahrzeugrückhaltesysteme | 26 |
| 3.4.3 | Tunnel-Pannenbucht | 26 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.4.4 | Tunnelportal | 26 |
| 3.4.5 | Anprallparameter | 26 |
| 3.4.6 | Testmatrix | 27 |
| 3.5 | Bewertung der Absicherungsvarianten | 28 |
| 3.5.1 | Bewertungskriterien | 28 |
| 3.5.2 | Nutzwertanalyse | 35 |
| 3.5.3 | Nutzen-Kosten-Analyse | 36 |
| 4 | ERGEBNISSE | 38 |
| <hr/> | | |
| 4.1 | Finite-Elemente Simulation | 38 |
| 4.1.1 | Tunnel-Pannenbucht | 38 |
| 4.1.2 | Tunnelportal | 41 |
| 4.2 | Versuch | 42 |
| 4.3 | Bewertung der Absicherungsvarianten | 43 |
| 4.3.1 | Nutzwertanalyse | 43 |
| 4.3.2 | Nutzen-Kosten-Analyse | 45 |
| 5 | DISKUSSION | 47 |
| <hr/> | | |
| 5.1 | Allgemeine Erkenntnisse von Realversuch und FE-Simulation | 47 |
| 5.1.1 | Betonleitelemente | 47 |
| 5.1.2 | Vergleich der Einbaulängen der Absicherungsmaßnahmen | 48 |
| 5.2 | Tunnel-Pannenbucht | 50 |
| 5.2.1 | Betonleitwandelement 4 m | 50 |
| 5.2.2 | Betonleitwandelement 8 m | 52 |
| 5.2.3 | Anpralldämpfer „Alpina F1-50“ | 54 |
| 5.2.4 | Anpralldämpfer „Alpina Prototyp F1-80“ | 56 |
| 5.3 | Tunnelportal | 57 |
| 6 | SCHLUSSFOLGERUNGEN | 59 |
| 7 | AUSBLICK | 61 |
| 1. | REFERENCES | 63 |

A.1 Testprotokoll Anfahrversuche

I

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Historische Entwicklung der Unfallzahlen seit 2002 | 1 |
| Abbildung 2: Verkehrsunfälle nach Unfalltype am gesamten A+S Netz | 2 |
| Abbildung 3: Grundriss einer einseitig angeordneten Pannenbucht mit Leitwand [8] | 7 |
| Abbildung 4: Grundriss einer Pannenbucht mit Betonleitwand [3] | 11 |
| Abbildung 5: Theoretischer Zusammenhang von Geschwindigkeit zu Winkel bei unterschiedlichem Seitenabstand des Fahrzeuges auf geraden Straßenabschnitten und auf trockener Fahrbahn ($\mu_y=0,8$) | 13 |
| Abbildung 6: Theoretischer Zusammenhang zwischen Abkommenswinkel und Kurvenradius bei unterschiedlichem Seitenabstand des Fahrzeuges | 14 |
| Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Abkommengeschwindigkeit und Abkommenswinkel auf Autobahnen und Schnellstraßen und auf Freilandstraßen (links) [21]. Abkommenswinkel in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 90 km/h und 110 km/h auf Autobahnen (rechts). | 15 |
| Abbildung 8: Fahrzeugmodelle zur Anprallsimulation an FRS [28–30] | 18 |
| Abbildung 9: Betonleitwand (H2) | 19 |
| Abbildung 10: Tunnelprofil lt. RVS 09.01.24 | 20 |
| Abbildung 11: Tunnel-Pannenbucht im Simulationsmodell | 20 |
| Abbildung 12: Simulationsmodell des FRS am Tunnelportal | 21 |
| Abbildung 13: Aufstellwinkel eines Betonleitelements | 22 |
| Abbildung 14: Anprallpunkte und Anprallwinkel an einem Betonleitelement | 22 |
| Abbildung 15: Positionen des Betonelements in der Tunnel-Pannenbucht | 23 |
| Abbildung 16: Anprallsituation "Small Overlap" | 23 |
| Abbildung 17: Simulationsmodell Tunnel-Pannenbucht | 24 |
| Abbildung 18: Simulationsmodell Tunnelportal | 25 |
| Abbildung 19: Primäranprall des Fahrzeuges an die Absicherungsmaßnahme | 29 |
| Abbildung 20: Massive Deformation der Fahrgastzelle nach einem Anprall | 30 |
| Abbildung 21: Schematische Darstellung von Anprallpunkten an einer Absicherungsmaßnahme | 31 |
| Abbildung 22: Risiko bei einem schrägen Anprall an ein Anpralldämpfersystem | 32 |
| Abbildung 23: Risiko bei einem seitlichen Anprall durch einen Freiraum zwischen Anpralldämpfer-system und Tunnel-Pannenbuchtenwand | 32 |
| Abbildung 24: Freigelegte Kante der Tunnel-Pannenbucht durch Verschieben der Absicherungs-maßnahme | 33 |
| Abbildung 25: Bruch der Absicherungsmaßnahme (FE- Simulation) | 33 |
| Abbildung 26: Kippen einer Absicherungsmaßnahme zufolge einer Kollision | 33 |
| Abbildung 27: Simulationsergebnis Tunnel-Pannenbucht (TB11, Betonelement 4m) | 39 |
| Abbildung 28: Simulationsergebnis Tunnel-Pannenbucht (TB11, Betonelement 8m) | 40 |
| Abbildung 29: Simulationsergebnis Tunnel-Pannenbucht (TB11, Betonelement 4m, Small Overlap) | 40 |
| Abbildung 30: Simulationsergebnis Tunnelportal (TB32) | 41 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 31: Vergleich der Ergebnisse von Versuch und Simulation am Beispiel der Winkelabhängigkeit des ASI beim Anprall an Betonleitwände | 47 |
| Abbildung 32: Vergleich der Ergebnisse von Versuch und Simulation am Beispiel der Winkelabhängigkeit des THIV beim Anprall an Betonleitwände | 48 |
| Abbildung 33: Abhängigkeit des ASI vom notwendigen Bauraums der Absicherungsmaßnahme | 49 |
| Abbildung 34: Abhängigkeit des THIV vom notwendigen Bauraums der Absicherungsmaßnahme | 49 |
| Abbildung 35: Fahrzeugkinematik beim Anprall an das Betonleitwandelement 4m | 50 |
| Abbildung 36: Fahrzeugkinematik beim Anprall an das Betonleitwandelement 8m | 52 |
| Abbildung 37: Fahrzeugkinematik beim Anprall an den Anpralldämpfer „Alpina F1-50“ | 55 |
| Abbildung 38: Fahrzeugkinematik beim Anprall an den Anpralldämpfer „Alpina Prototyp F1-80“ | 56 |
| Abbildung 39: Fahrzeugkinematik beim Anprall an Betonleitelemente vor einem Tunnelportal | 58 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | |
|--|----|
| Tabelle 1-1: Unfallgeschehen in Tunnels mit einer Länge von über 200 m auf Autobahnen und | 3 |
| Tabelle 1-2: Entwicklung des Unfallgeschehens in Tunnels ab einer Länge von über 500 m auf Autobahnen und | 3 |
| Tabelle 3-1: Aufstellwinkel der Betonleitwände in Abhängigkeit der Elementlänge | 11 |
| Tabelle 3-2: Theoretische Anprallwinkel in Tunnel-Pannenbuchten bei unterschiedlichen Kurvenradien und Elementlängen | 16 |
| Tabelle 3-3: Theoretische Anprallwinkel bei Tunnelportalen bei unterschiedlichen Kurvenradien und Verzugswinkel des Rückhaltesystems | 17 |
| Tabelle 3-4: Simulationsmatrix Tunnel-Pannenbucht | 24 |
| Tabelle 3-5: Simulationsmatrix Tunnelportal | 25 |
| Tabelle 3-6: Testmatrix | 27 |
| Tabelle 3-7: Gewichtung der Bewertungskriterien | 35 |
| Tabelle 4-1: Simulationsergebnisse Tunnel-Pannenbucht | 38 |
| Tabelle 4-2: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Anprallversuchen | 42 |
| Tabelle 4-3: Nutzen-Analyse der unterschiedlichen Absicherungsmaßnahmen | 44 |
| Tabelle 4-4: Nutzen-Kosten-Analyse unterschiedlicher Planfälle zur Absicherung von Tunnel-Pannenbuchten | 45 |
| Tabelle 4-5: Nutzen-Kosten-Analyse unterschiedlicher Planfälle zur Absicherung von Tunnelportalen | 46 |

1 EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

Wie die Entwicklung der Unfallzahlen zeigt, nehmen die Verkehrsunfälle stetig ab (Abbildung 1). Seit 2002 haben sich die tödlichen Verkehrsunfälle am ASFINAG Netz um nahezu 2/3 reduziert, wobei in den letzten fünf Jahren eher eine Stagnierung festzustellen ist; mit einer leicht steigenden Tendenz an Verkehrsunfällen in den letzten vier Jahren. Mit Einführung des Unfalldatenmanagements (UDM) 2012 erfolgte eine Umstellung der Unfalldatenerhebung. Aufgrund der geänderten Erhebungsmethode und eines erweiterten beziehungsweise geänderten Merkmalskatalogs ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse bis 2011 mit jenen ab 2012 nicht zulässig.

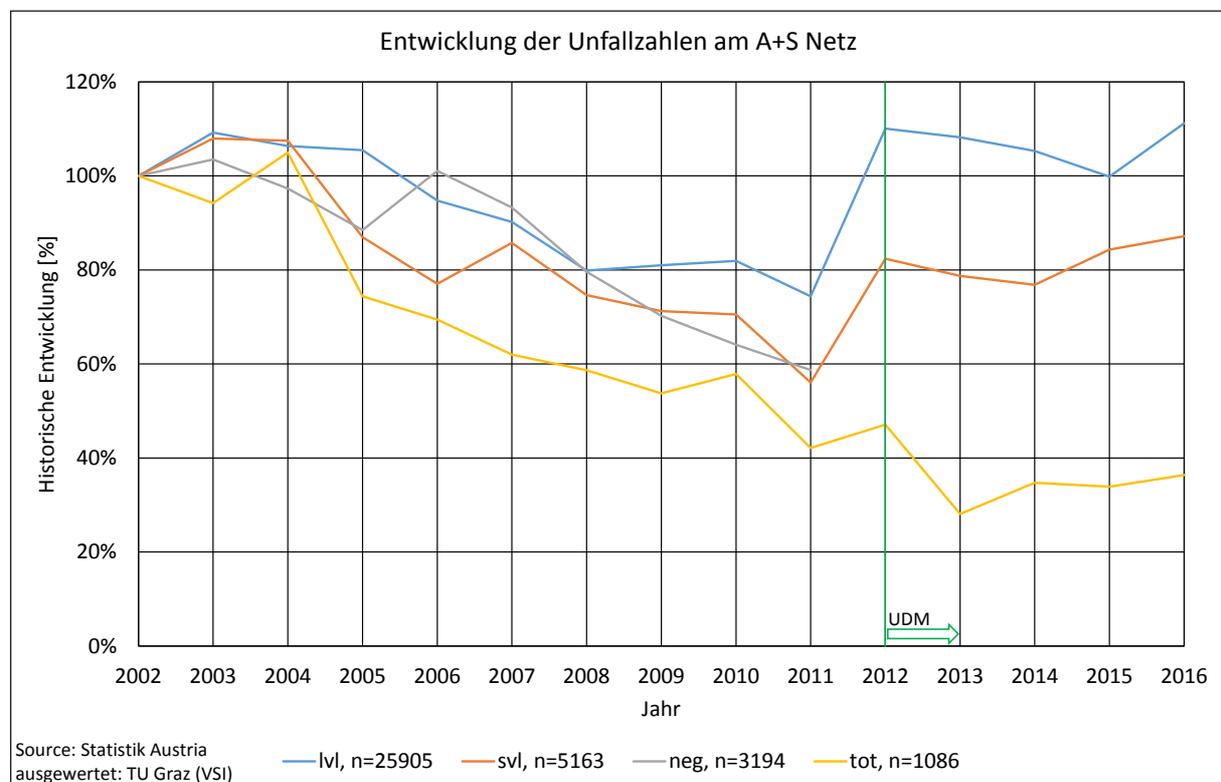


Abbildung 1: Historische Entwicklung der Unfallzahlen seit 2002

Der dominierende Unfalltyp am Autobahn- und Schnellstraßennetz (A+S Netz) sind Unfälle im Richtungsverkehr mit rd. 57% gefolgt von Alleinunfällen (Abkommensunfällen) mit rd. 38% (Abbildung 2). Ferner sind noch Unfälle im Begegnungsverkehr (rd. 2%) aber auch Unfälle mit Fußgängern (rd. 1,3%) festzustellen. Naturgemäß sind Fußgängerunfälle und Unfälle im Begegnungsverkehr am gefährlichsten (Quotient aus Anteil verletzt zu Anteil tot). Bei gleichem Risiko würden beide Anteilsbalken einen gleich hohen Wert aufweisen. So ist aber der Anteil der Unfälle mit tödlichem Ausgang weitaus höher als jener mit verletzten Personen. Ähnlich verhält es sich mit Abkommensunfällen. Hierbei ist das Risiko

getötet zu werden höher, als eine Verletzung davonzutragen. Umgekehrt verhält es sich bei den Unfällen im Richtungsverkehr. Hier ist das Risiko einer tödlichen Verletzung geringer.

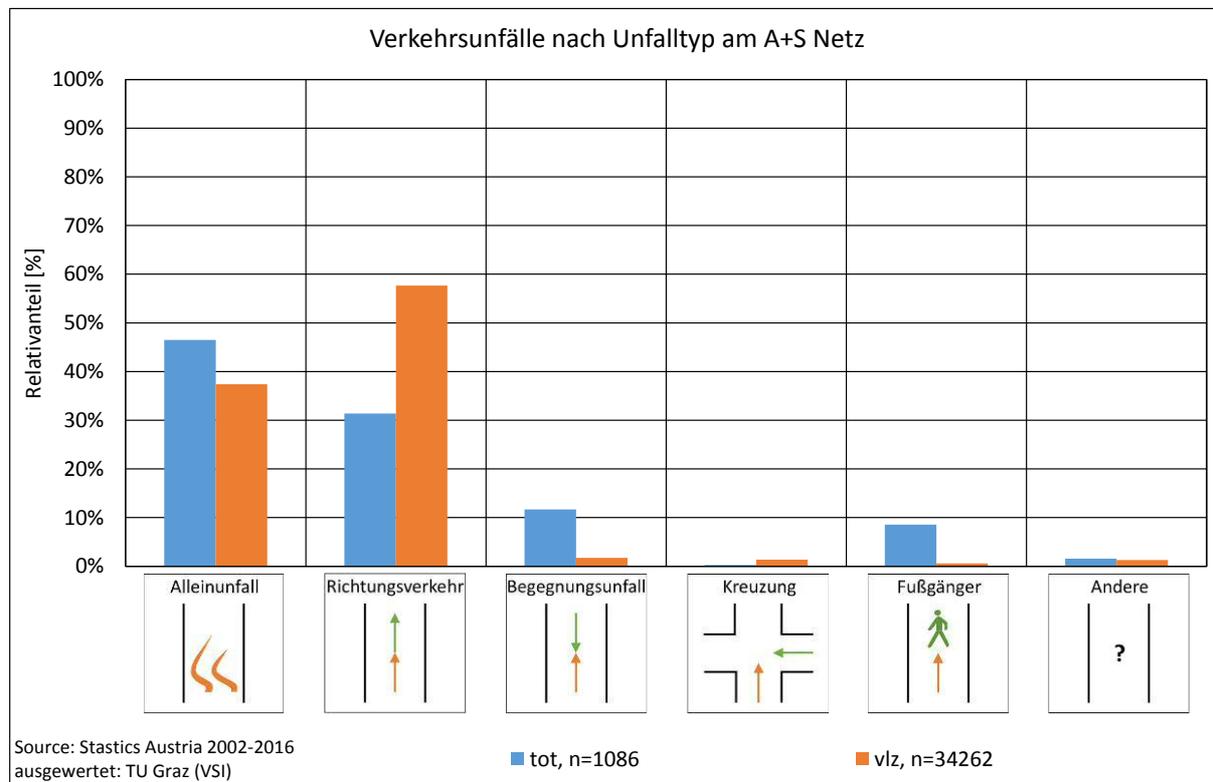


Abbildung 2: Verkehrsunfälle nach Unfalltype am gesamten A+S Netz

Eine kritische Stelle (neben anderen) am A+S Netz stellen Tunnelbereiche (Tunnel (ab 100m), Galerie (halboffener Tunnel) und Unterführung) dar. Insbesondere ungesicherte Tunnelportale oder Tunnel-Pannenbuchten können durch die massive Bauweise keine kinetische Energie, in Form einer plastischen Verformung, abbauen. Hierbei muss das anprallende Fahrzeug die gesamte Energie aufnehmen, welche in weiterer Folge zum Teil an den Insassen weitergeleitet wird. Je nach Fahrzeugtyp, Anprallgeschwindigkeit und Anprallsituation (Anprallwinkel, Anprallstelle am Fahrzeug, etc.) können hierbei schwerwiegende Verletzungsfolgen auftreten.

In den Jahren 2012 bis 2016 wurden in Tunnels mit einer Länge von über 200 m durchschnittlich zwei bis drei Personen in Tunnelunfällen getötet (Tabelle 1-1). Dies kann sich auf alle zuvor genannten Unfalltypen beziehen. Eine Unterscheidung der Unfalltypen ist in der Studie von Strnad und Schmied [1] nicht angegeben. Es ist jedoch eine Zunahme der Verkehrsunfälle in Tunnels festzustellen, wobei jedoch die Anzahl der Getöteten tendenziell abnimmt. Bei Tunnelunfällen mit einer Länge von über 500 m werden durchschnittlich ein bis zwei Personen pro Jahr getötet (Tabelle 1-2). Wiederum ohne Unterscheidung nach den Unfalltypen. Nach Strnad und Schmied [1] sind die höchsten Unfallraten für Tunnel mit einer Länge von mehr als 500 m im Portalbereich, gefolgt vom Einfahrtsbereich festzustellen. Nach unveröffentlichten Auswertungen des BMVIT wurden 2013 bis 2018 sieben Verkehrstote

Einleitung

beim Anprall an ein Tunnelportal festgestellt. Es konnten keine Getöteten bei einem Unfall in einer Pannenbucht in diesem Zeitraum festgestellt werden. Verkehrstote wurden hierbei gemäß der Verkehrsunfallstatistik gezählt [2].

Tabelle 1-1: Unfallgeschehen in Tunnels mit einer Länge von über 200 m auf Autobahnen und Schnellstraßen (Quelle: [1])

| | Unfälle mit Personenschaden | Verunglückte | Getötete |
|------|-----------------------------|--------------|----------|
| 2002 | 95 | 156 | 13 |
| 2003 | 93 | 154 | 4 |
| 2004 | 133 | 231 | 6 |
| 2005 | 112 | 201 | 7 |
| 2006 | 69 | 128 | 4 |
| 2007 | 96 | 180 | 3 |
| 2008 | 84 | 155 | 6 |
| 2009 | 60 | 121 | 7 |
| 2010 | 75 | 108 | 4 |
| 2011 | 48 | 80 | 5 |
| 2012 | 110 | 168 | 7 |
| 2013 | 99 | 173 | 3 |
| 2014 | 105 | 167 | 3 |
| 2015 | 110 | 163 | 1 |
| 2016 | 137 | 213 | 3 |

Tabelle 1-2: Entwicklung des Unfallgeschehens in Tunnels ab einer Länge von über 500 m auf Autobahnen und Schnellstraßen (Quelle: [1])

| | Gegenverkehr | | | Richtungsverkehr | | |
|------|-----------------------------|--------------|----------|-----------------------------|--------------|----------|
| | Unfälle mit Personenschaden | Verunglückte | Getötete | Unfälle mit Personenschaden | Verunglückte | Getötete |
| 2006 | 14 | 20 | 3 | 54 | 106 | 1 |
| 2007 | 20 | 51 | 0 | 71 | 119 | 3 |
| 2008 | 23 | 49 | 0 | 56 | 99 | 6 |
| 2009 | 27 | 74 | 4 | 27 | 39 | 2 |
| 2010 | 18 | 27 | 0 | 40 | 56 | 3 |
| 2011 | 13 | 29 | 4 | 29 | 41 | 1 |
| 2012 | 28 | 56 | 4 | 78 | 105 | 2 |
| 2013 | 24 | 45 | 2 | 71 | 123 | 1 |
| 2014 | 12 | 21 | 2 | 82 | 120 | 1 |
| 2015 | 11 | 19 | 1 | 83 | 121 | 0 |
| 2016 | 14 | 41 | 0 | 113 | 158 | 1 |
| | 204 | 432 | 20 | 704 | 1.087 | 21 |

1.2 Motivation

Bei einem Anprall eines Fahrzeugs an eine ungesicherte Tunnel-Pannenbucht oder an ein ungesichertes Tunnelportal ist mit massiven Beschädigungen des Fahrzeugs und einhergehend mit tiefen Intrusionen in die Fahrgastzelle zu rechnen. Es bieten die derzeitigen Absicherungsmaßnahmen offensichtlich keinen ausreichenden Schutz vor schwerwiegenden Verletzungen. Daher wurde im Österreichischen Verkehrssicherheitsprogramm 2011-2020 des BMVIT die Tunnelsicherheit als eigener Punkt festgehalten und eine Harmonisierung der Gestaltung der Tunnelportale als Ziel definiert. Ebenso ist die Tunnelsicherheit im Verkehrssicherheitsprogramm 2020 der ASFINAG als eine Maßnahme festgehalten.

Die regelkonforme Absicherung der Tunnel-Pannenbucht entsprechend der RVS 09.01.24 [3] in Richtungsverkehrstunneln ist mit einer Betonleitwand unter einem maximalen Verzugswinkel von 20° und einer Mindesthöhe von 100 cm auszuführen. Die Tunnel-Pannenbuchten in Gegenverkehrstunneln sind auf der in Fahrtrichtung gesehenen rechten Stirnwand mit einem nicht zurückleitenden Anpralldämpfer abzusichern.

Die Absicherung des Tunnelportals soll gemäß RVS 09.01.25 [4] für Richtungsverkehrstunnels mit einem Fahrzeugrückhaltesystem (FRS) erfolgen.

Hinsichtlich der Geschwindigkeitsanforderungen an die Anpralldämpfer sind die Regelungen der RVS 05.02.31 [5] zu beachten.

In Tunnel-Pannenbuchten wird in Bestandstunneln ein einzelnes Betonleitwandelement mit einer Länge von vier Metern und einer Höhe von 100 cm unter einem Aufstellwinkel von etwa 45° aufgestellt. Diese Anordnung soll die Stirnseite der Tunnel-Pannenbucht mit einer Frontalbreite von etwa 2,7 m absichern.

In Unfallanalysen kann ein

- Durchbrechen der Betonleitwand,
- Kippen der Betonleitwand und damit verbundenes Hochsteigen des Fahrzeugs mit einem frontalen Anprall an die Tunnel-Pannenbuchtenstirnwand,
- Anprall an das Betonleitwandelement mit geringer Überdeckung und einer darauffolgenden Rotationsbewegung des Fahrzeugs in die Fahrspur,
- etc.

festgestellt werden, weshalb diese Absicherungsmethode aus verkehrssicherheitstechnischer Sicht als kritisch anzusehen ist.

Einleitung

Bei Tunnelportalen erfolgt entsprechend der RVS 09.01.25 eine Absicherung der rechten Portalseite mit einem FRS in Form von Stahlleitschienen oder Betonleitwänden. Hierbei sollten die Anforderungen der RVS 05.02.31 [5] im Hinblick auf beispielsweise Aufstelllänge, Verzugswinkel, etc. berücksichtigt werden. Auf Grund von örtlichen Verhältnissen kann aber eine ausreichende Aufstelllänge des FRS nicht immer erreicht werden und Abweichungen von den Anforderungen der RVS 09.01.25 sind technisch zu begründen.

1.3 Ziele

Zur Formulierung von Empfehlungen erfolgt eine wissenschaftliche und objektive Untersuchung der folgenden Absicherungsvarianten durch Finite-Elemente Simulation und Versuch:

- Tunnel-Pannenbucht
 - Anprall an einem 8 m langen Betonleitwandelement
 - Anprall an einem 4 m langen Betonleitwandelement
 - Anprall an einen Anpralldämpfer des Typs F1-50
 - Anprall an einen Anpralldämpfer Prototyp F1-80
- Tunnelportal
 - Anprall an ein vorgezogenes Fertigteil-Betonleitwandsystem zur Absicherung des Tunnelportals

In Anlehnung an die Vorgaben der EN 1317 wurden beispielsweise die zu verwendenden Fahrzeuge nach Abmessungen und Gewicht gewählt. Ebenso wurden zur Bewertung der Insassensicherheit die Kriterien ASI und THIV vergleichsweise herangezogen. Es ist aber nicht das Ziel, Abnahmetests nach EN 1317 durchzuführen. Es geht hierbei um das Verhalten der genannten Absicherungsvarianten bei einer definierten Testkonfiguration unter teilweiser Verwendung von bereits in Normen festgelegten Bedingungen.

Die Tunnel-Pannenbuchten bei Gegenverkehrstunnel sind auf der – in Fahrtrichtung gesehen – rechten Stirnwand mit nicht zurückleitenden Anpralldämpfern der Anprallheftigkeitsstufe „B“ [3] auszustatten. Bei Gegenverkehrstunnel mit geringem Verkehrsaufkommen oder einer zulässigen Geschwindigkeit von bis zu 80 km/h ist die Anordnung von Anpralldämpfern in der Regel nicht erforderlich [3]. Die Prüfung der Anpralldämpfer erfolgt gemäß EN1317-3 [8].

2.1.2 Tunnelportal

Bei Tunnelportalen erfolgt entsprechend der RVS 09.01.25 eine Absicherung der rechten Portalseite mit einem FRS in Form von vorgezogenen Stahlleitschienen oder Betonleitwänden. Hierbei hat die Aufhaltstufe des FRS zumindest H2 zu entsprechen. Die Absicherung der linken Portalseite, d.h. die Mitteltrennung, ist mindestens mit einer Aufhaltstufe H3 vorzusehen. Je nach Ausführung des FRS (Stahlleitschiene, Betonleitwand) ist in Fahrtrichtung gesehen eine Absenkung des FRS mit einer definierten Länge auszuführen. Hierbei sind die Anforderungen der RVS 05.02.31 [5] zu berücksichtigen. Des Weiteren darf die Verziehung des FRS zur Fahrbahn höchstens 1:10 betragen. Örtliche Verhältnisse sind bei der Aufstellung zur berücksichtigen und Abweichungen von den Anforderungen der RVS 09.01.25 sind technisch zu begründen.

2.2 Fahrzeugdynamik bei Abkommensunfällen

Eng verbunden mit dem Aufstellwinkel des Betonleitwandelementes ist der Abkommenswinkel des Fahrzeugs. Der Aufstellwinkel und der Abkommenswinkel stellen schließlich die Anprallkonfiguration dar. Aus theoretischen Überlegungen nach Hoschopf et al. [9] sind auf geraden Straßenabschnitten Abkommenswinkel vom Abstand des Fahrzeugs zum Fahrbahnrand, dessen Geschwindigkeit und den Straßenverhältnissen (trocken, nass, etc.) abhängig. Hierbei wird ein Verlenken des Fahrzeugs und Ausnutzung der physikalischen Grenzen zu Grunde gelegt und eine Kreisbogenfahrt als Abkommenstrajektorie angenommen. Bei Geschwindigkeiten von 100 km/h und trockener Fahrbahn ergibt sich ein maximaler Abkommenswinkel von ca. 10°, wenn sich das Fahrzeug auf dem ersten Fahrstreifen befindet. Würde das Fahrzeug auf dem zweiten Fahrstreifen fahren, so errechnet sich ein maximaler Abkommenswinkel von ca. 17°. Diese Winkel sind unter den gegebenen Bedingungen erreichbar, ohne dass das Fahrzeug zu schleudern beginnt. Ein Abkommenswinkel über diese hinaus ist aus physikalischer Sicht nicht möglich. Burgett und Gunderson [10] sowie Martin et al. [11] stellten ähnliche Überlegungen an. Diese Autoren gehen ebenfalls von den Zusammenhängen aus Geschwindigkeit, Reibungsverhältnissen und Abkommenswinkel aus.

Übermüdung als Unfallursache ist bei bis zu 60% der Abkommensunfälle unfallkausal [12–16]. Dahingehend kann für den Kurvenbereich ein tangentiales Abkommen des Fahrzeugs angenommen werden. Das heißt, das Fahrzeug bzw. der Fahrzeuglenker fährt nicht in die Kurve ein, sondern bewegt sich

geradlinig weiter und kommt so von der Fahrbahn ab. In Kurvenbereichen ist der Abkommenswinkel vom Abstand des Fahrzeugs zum Fahrbahnrand und dem Kurvenradius abhängig, unter der Voraussetzung, dass kein Lenkmanöver stattfindet und sich das Fahrzeug am Kurvenanfang tangential zur Kurve weiterbewegen würde [9]. Kurvenradien von mehr als 500 m haben einen Abkommenswinkel von kleiner als 5° , sofern sich das Fahrzeug auf dem ersten Fahrstreifen befindet. Insbesondere würden hierbei Unfälle, wo es durch Übermüdung zu einem Abkommen kommt, berücksichtigt sein, welche in der Regel einen sehr kleinen Abkommenswinkel haben.

Generell ist mit zunehmender Geschwindigkeit bzw. Kurvenradius ein kleinerer Abkommenswinkel zu erwarten. Diese theoretischen Überlegungen konnten durch Analyse von Realunfällen bestätigt werden [17–21]. Der mittlere Abkommenswinkel liegt auf Autobahnen bei $7,3^\circ$ (SA=6,6) mit einem Medianwinkel von $10,0^\circ$. Als mittlere Abkommensgeschwindigkeit wurde 110,8 km/h (SA=20,5) festgestellt.

2.3 Bewertung der Insassenbelastung in Simulation und Versuch

In den Erhebungen zur nationalen Unfallentwicklung wird die Verletzungsschwere nach leicht, schwer und tödlich verletzt eingeteilt. Insbesondere ist diese Einteilung für die Auswertung von nationalen Statistiken von Bedeutung. Die Zuordnung folgt nicht einer objektiven Bewertung, sondern beruht auf einer mehr oder weniger subjektiven Einschätzung der Biomechaniker. In der Unfallforschung bedient man sich einer objektiveren Klassifikation von Verletzungsschweren. Dahingehend wird das AIS (Abbreviated Injury Score) als der Standard verwendet [22]. Derartige Klassifikationen werden allerdings für die Beschreibung von Verletzungen in Folge eines Unfalls verwendet und stellen sogenannte Verletzungsskalen dar. Für die Bewertung von Verletzungsrisiken in der Entwicklung von Sicherheitssystemen, wie beispielsweise FRS, greift man auf Verletzungskriterien zurück. Ein Verletzungskriterium ist eine messbare Größe, welches sich beispielsweise aus Beschleunigungen, etc. während eines Anpralls errechnen lässt. In der Fahrzeugindustrie bildet beispielsweise der HIC (Head Injury Criterion) ein gängiges Kriterium. Dieser Kennwert bezieht sich auf den Fahrzeuginsassen (Dummy).

Es lassen sich allerdings auch Maßnahmen ergreifen, welche infrastrukturseitig eine Schutzwirkung haben, wie es beispielsweise bei FRS (Stahlleitschienen, Betonleitwände) aber auch bei Anpralldämpfern der Fall ist. Im Infrastrukturbereich haben sich dahingehend zwei Bewertungskriterien etabliert. Die für die Insassenbelastung relevanten biomechanischen Kriterien sind der ASI (Acceleration Severity Index) und der THIV (Theoretical Head Impact Velocity) [8, 23]. Der ASI muss für die Anprallheftigkeitsstufe B zwischen 1,0 und kleiner gleich 1,4 liegen. Der THIV darf bei nicht zurückleitenden Anpralldämpfern einen Wert von 44 km/h nicht überschreiten [8, 23, 24].

Für die Absicherung von Tunnel-Pannenbuchten kann nach RVS 09.01.24 auf der rechten Stirnwand ein nicht zurückleitender Anpralldämpfer positioniert werden, welcher die Anprallheftigkeitsstufe „B“

zu erfüllen hat. Ebenso ist nach der RVS 09.01.25 die Absicherung des Tunnelportals mit einem Anpralldämpfer der Anprallheftigkeitsstufe „B“ möglich.

3.2 Fahrdynamische Randbedingungen

3.2.1 Theoretische Überlegungen

Geometrische Bedingungen

Aus den geometrischen Bedingungen der Pannenbucht, bei einer Länge von 40 m und einer Breite von 3 m (ohne Berücksichtigung des Gehwegs), ergibt sich ein maximaler Abkommenswinkel von $4,3^\circ$, sofern das Fahrzeug unmittelbar bei der Tunnel-Pannenbuchtenseitenwand kollidiert.

Gerader Straßenabschnitt

Die Bewegungsbahn des Massenmittelpunkts eines Fahrzeugs beim Abkommen von der Straße wurde von Hoschopf et. al [9] als Funktion des seitlichen Abstands zum Fahrbahnrand, der Geschwindigkeit sowie der möglichen Reibungsverhältnisse auf der Fahrbahn definiert. Mit Hilfe der Zentripetalbeschleunigung und dem maximalen seitlichen Reibungskoeffizienten kann der maximale Abkommenswinkel abgeleitet werden. Je nach Kombination der genannten Parameter kann sich dadurch ein bestimmter Abkommenswinkel beim Abkommen des Fahrzeugs einstellen.

Die Überlegungen von Hoschopf et. al [9] und Burgett und Gunderson [10] 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. Derartige Fahrmanöver sind im verwendeten Modell nicht berücksichtigt.

Folgende Annahmen werden zur Berechnung eines theoretischen Abkommenswinkels getroffen:

- Trockene Fahrbahn mit einem Reibwert $\mu=0,8$
- Das abkommende Fahrzeug befindet sich auf dem 1. Fahrstreifen in einem Abstand von 1,5 m zur Randlinie oder auf dem 2. Fahrstreifen in einem Abstand von 4,5 m zur Randlinie.
- Keine Längs- und Querneigung der Fahrbahn
- Gravitationskonstante: $g=9,81 \text{ m/s}^2$
- Geschwindigkeitsbeschränkung: 100 km/h
- Es wird die Kurvengrenzgeschwindigkeit ausgenutzt, d.h. das Fahrzeug schleudert gerade noch nicht

Der Abkommenswinkel nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit ab (Abbildung 5). Bei der in Tunnel-Pannenbuchten und vor Tunnelportalen untersuchten Geschwindigkeit von 100 km/h wäre der theoretische Abkommenswinkel bei $9,4^\circ$ und $16,3^\circ$. Hierbei wird ein seitlicher Abstand des Fahrzeugs von

Methode

1,5 m bzw. 4,5 m zur Fahrbahnseite angenommen. Entsprechend kleinere Winkel stellen sich ein, sofern das Fahrzeug einen geringeren seitlichen Abstand einhält.

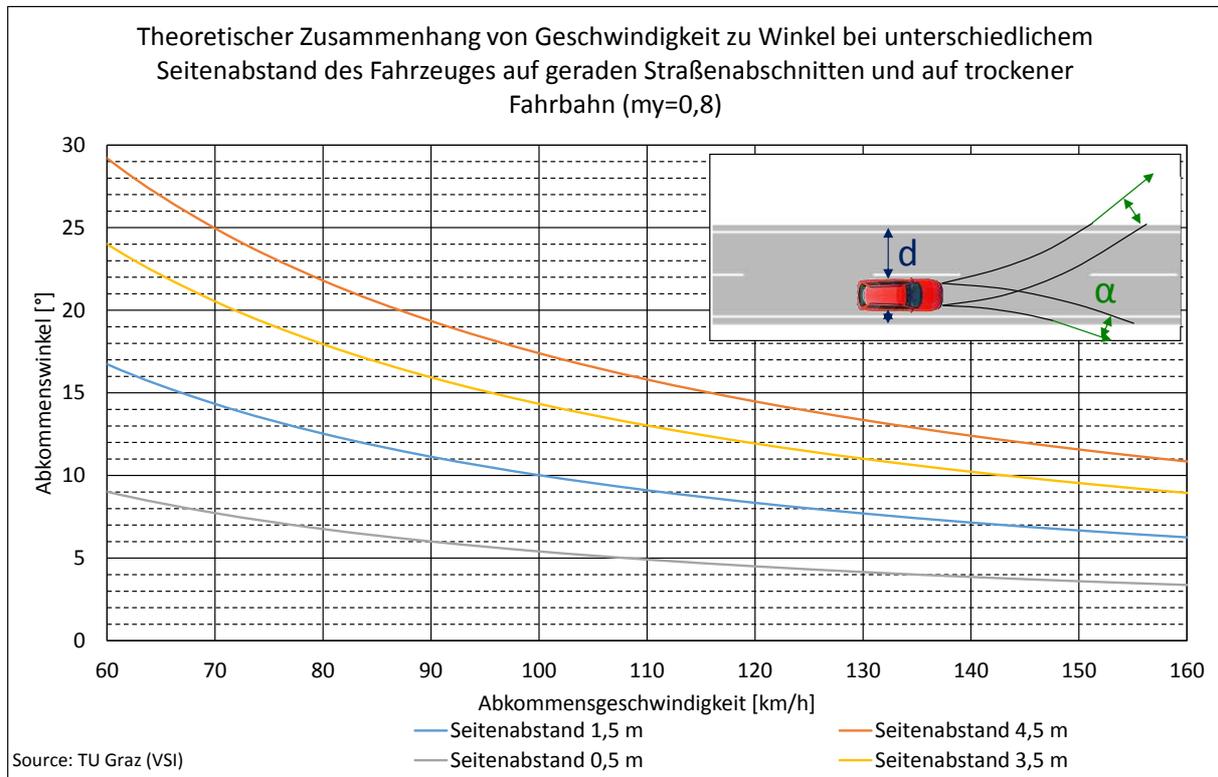


Abbildung 5: Theoretischer Zusammenhang von Geschwindigkeit zu Winkel bei unterschiedlichem Seitenabstand des Fahrzeuges auf geraden Straßenabschnitten und auf trockener Fahrbahn ($\mu=0,8$)

Kurve

Zu den Überlegungen des Abkommens auf Geraden wurde von Hoschopf et. al [9] ein Zusammenhang vom Fahrzeugabstand zur 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 Kurvenaußen gelenkt wird, ermitteln. Hierbei soll ein Abkommen des Fahrzeugs bei übermüdeten Fahrzeuglenkern berücksichtigt werden.

Folgende Annahmen werden zur Berechnung eines theoretischen Abkommenswinkels getroffen:

- Trockene Fahrbahn mit einem Reibwert $\mu=0,8$
- Das abkommende Fahrzeug befindet sich auf dem 1. Fahrstreifen in einem Abstand von 1,5 m zur Randlinie sowie auf dem 2. Fahrstreifen in einem Abstand von 4,5 m zur Randlinie.
- Keine Längs- und Querneigung der Fahrbahn
- Gravitationskonstante: $g=9,81 \text{ m/s}^2$
- Geschwindigkeitsbeschränkung: 100 km/h

- Das Fahrzeug folgt der ursprünglichen Bewegungstrajektorie (d.h. bewegt sich ohne Lenkbewegung) und kommt dadurch in der Kurve von der Straße ab; dies würde übermüdeten FahrerInnen entsprechen (Sekundenschlaf)

Je nach Kurvenradius ergeben sich unterschiedliche Abkommenswinkel bezogen zur Position des Fahrzeugs zur Fahrbahnseite (Abbildung 6). Befindet sich das Fahrzeug am ersten Fahrstreifen, d.h. etwa 1,5 m von der rechten Randlinie entfernt, so würden sich ab einem Kurvenradius von 500 m durchwegs Abkommenswinkel von kleiner 5° ergeben. Bei einem Abstand von 4,5 m zur rechten Randlinie, d.h. das Fahrzeug befindet sich am zweiten Fahrstreifen, würde sich ein Abkommenswinkel von kleiner als 8° ab einem Kurvenradius von 500 m ergeben.

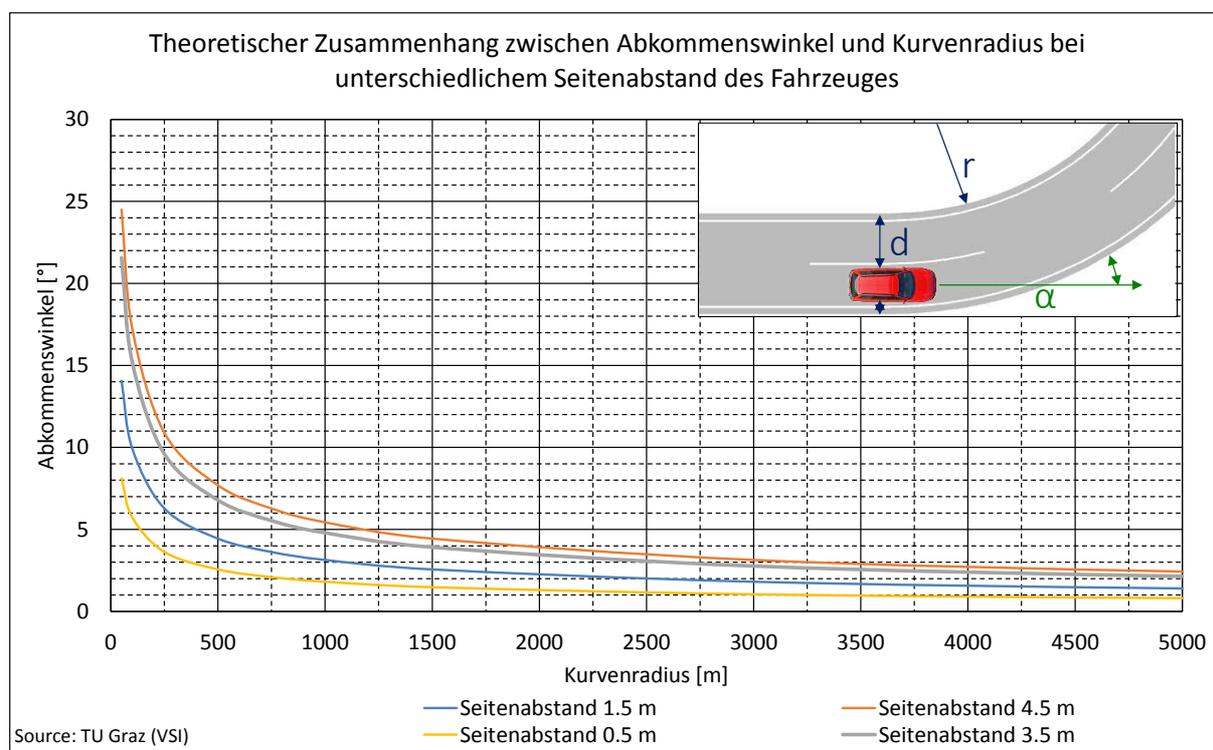


Abbildung 6: Theoretischer Zusammenhang zwischen Abkommenswinkel und Kurvenradius bei unterschiedlichem Seitenabstand des Fahrzeuges

3.2.2 Analyse von Unfalldaten

Zu den theoretischen Überlegungen sind in Abbildung 7 Zusammenhänge zwischen Abkommensgeschwindigkeit und Abkommenswinkel aus Analysen von Realunfällen dargestellt. Die in der Abbildung dargestellten Abkommensunfälle betreffen Unfälle, welche auf Ablenkung, Unaufmerksamkeit, Sekundenschlaf, etc. zurückzuführen sind. Es wurde keine Unterscheidung dieser Merkmale getroffen. Die Abkommensunfälle sind der Unfalldatenbank CEDATU (Central Database for In-Depth Accident Study) entnommen [25, 26].

Methode

Wird die Ausgangsgeschwindigkeit des Fahrzeugs auf die zulässige Geschwindigkeit im Tunnel von 100 km/h festgehalten und ein Geschwindigkeitsbereich zwischen 90 km/h und 110 km/h eingegrenzt, so lässt sich ein durchschnittlicher Abkommenswinkel auf Autobahnen und Schnellstraßen von $4,9^\circ$ (SA=4,1) feststellen. Es lässt sich ein Medianabkommenswinkel von $3,0^\circ$ feststellen. Bei einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 95 km/h und 105 km/h ändert sich der Abkommenswinkel nicht wesentlich. Dieser lässt sich für diesen Geschwindigkeitsbereich mit $5,4^\circ$ (SA=4,1) feststellen (Medianwinkel $3,0^\circ$).

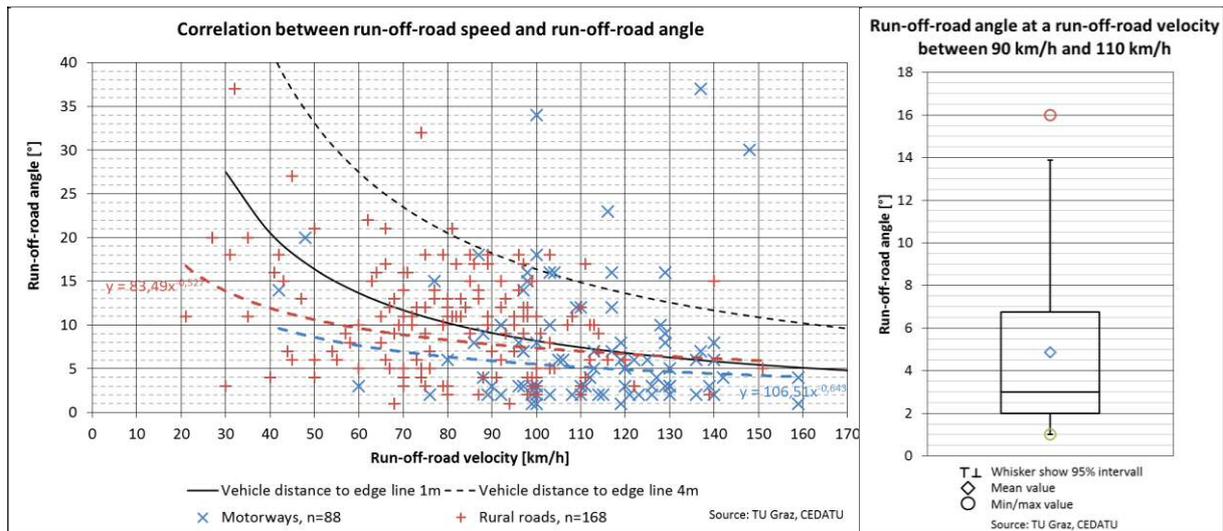


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Abkommensgeschwindigkeit und Abkommenswinkel auf Autobahnen und Schnellstraßen und auf Freilandstraßen (links) [21]. Abkommenswinkel in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 90 km/h und 110 km/h auf Autobahnen (rechts).

3.2.3 Lastmatrix Anprallwinkel

Folgende Annahmen wurden zur Definition der Lastmatrix getroffen:

- Trockene Fahrbahn mit einem Reibwert $\mu=0,8$
- Das abkommende Fahrzeug befindet sich auf dem 1. Fahrstreifen in einem Abstand von 1,5 m zur Randlinie sowie auf dem 2. Fahrstreifen in einem Abstand von 4,5 m zur Randlinie.
- Keine Längs- und Querneigung der Fahrbahn
- Gravitationskonstante: $g=9,81 \text{ m/s}^2$
- Geschwindigkeitsbeschränkung: 100 km/h
- Gerade Straße:
 - Es werden die theoretischen Überlegungen von Hoschopf et. al [9] zugrunde gelegt. Der Abkommenswinkel ergibt sich als Funktion des seitlichen Abstands zum Fahrbahnrand, der Geschwindigkeit, sowie der möglichen Reibungsverhältnisse auf der Fahrbahn.

- Es wird die Kurvengrenzgeschwindigkeit ausgenutzt, d.h. das Fahrzeug schleudert gerade noch nicht
- Kurve:
 - Es werden die theoretischen Überlegungen von Hoschopf et. al [9] zugrunde gelegt. Der Abkommenswinkel ergibt sich als Funktion des seitlichen Abstands zum Fahrbahnrand und des Kurvenradius unter der Annahme, dass sich das Fahrzeug mit seiner ursprünglichen Fahrtrichtung (vor der Kurve) weiterbewegt und kein Verlenken des Fahrzeugs erfolgt.
 - Das Fahrzeug bewegt sich ohne Lenkbewegung und kommt dadurch in der Kurve von der Straße ab; würde übermüdete (Sekundenschlaf) FahrzeuglenkerInnen entsprechen
- Die Ausgestaltung der Pannenbucht entspricht der RVS 09.01.24
- Die Länge der Betonleitwände für den Tunnel-Pannenbuchtenbereich beträgt 4, 6 und 8 m
- Verziehen der Elemente im Portalbereich 1:5, 1:10, 1:15

Tunnel-Pannenbucht

Der theoretische Anprallwinkel in der Tunnel-Pannenbucht bei Kombination der unterschiedlichen Elementlängen und Kurvenradien ergibt sich nach Tabelle 3-2. Hierbei ist bei einem 4 m langen Element ein Anprallwinkel von über 40° zu erwarten, bei längeren Elementen ist dieser entsprechend geringer.

Tabelle 3-2: Theoretische Anprallwinkel in Tunnel-Pannenbuchten bei unterschiedlichen Kurvenradien und Elementlängen

| Kurvenradius [m] | 1. Fahrstreifen | | | | 2. Fahrstreifen | | | |
|---------------------|-----------------|-------------------|------|------|-----------------|-------------------|------|------|
| | Abkommenswinkel | Elementlänge [m] | | | Abkommenswinkel | Elementlänge [m] | | |
| | | 4 | 6 | 8 | | 4 | 6 | 8 |
| | | Anprallwinkel [°] | | | | Anprallwinkel [°] | | |
| Gerade ¹ | 10,0 | 52,5 | 36,7 | 29,7 | 17,4 | 59,9 | 44,1 | 37,1 |
| 500 | 4,4 | 46,9 | 31,2 | 24,2 | 7,7 | 50,1 | 34,4 | 27,4 |
| 750 | 3,6 | 46,1 | 30,4 | 23,3 | 6,3 | 48,7 | 33,0 | 26,0 |
| 1000 | 3,1 | 45,6 | 29,9 | 22,9 | 5,4 | 47,9 | 32,2 | 25,2 |
| 1500 | 2,6 | 45,0 | 29,3 | 22,3 | 4,4 | 46,9 | 31,2 | 24,2 |
| 3000 | 1,8 | 44,3 | 28,6 | 21,5 | 3,1 | 45,6 | 29,9 | 22,9 |
| 5000 | 1,4 | 43,9 | 28,1 | 21,1 | 2,4 | 44,9 | 29,2 | 22,2 |
| 7500 | 1,1 | 43,6 | 27,8 | 20,8 | 2,0 | 44,5 | 28,7 | 21,7 |

1) Berechnung nach Abkommenswinkel auf der Geraden

Methode

Tunnelportal

Bei Tunnelportalen werden dieselben Annahmen getroffen wie bei Tunnel-Pannenbuchten. Jedoch wird anstelle des Aufstellwinkels ein Verzugswinkel für die Ermittlung eines Anprallwinkels herangezogen. Nach RVS 09.01.25 [4] ist eine Verziehung von höchstens 1:10 zulässig. Dieses Verziehungsverhältnis wird für die Berechnung des theoretischen Anprallwinkels berücksichtigt und auch jeweils steilere bzw. flachere Verziehungen in der Betrachtung berücksichtigt.

Tabelle 3-3: Theoretische Anprallwinkel bei Tunnelportalen bei unterschiedlichen Kurvenradien und Verzugswinkel des Rückhaltesystems

| Kurvenradius [m] | 1. Fahrstreifen | | | | 2. Fahrstreifen | | | |
|---------------------|-----------------|-------------------|------|------|-----------------|-------------------|------|------|
| | Abkommenswinkel | Verzugswinkel | | | Abkommenswinkel | Verzugswinkel | | |
| | | 1:5 | 1:10 | 1:15 | | 1:5 | 1:10 | 1:15 |
| | | Anprallwinkel [°] | | | | Anprallwinkel [°] | | |
| Gerade ¹ | 10,0 | 21,3 | 15,7 | 13,8 | 17,4 | 28,7 | 23,1 | 21,2 |
| 500 | 4,4 | 15,7 | 10,1 | 8,3 | 7,7 | 19,0 | 13,4 | 11,5 |
| 750 | 3,6 | 14,9 | 9,3 | 7,4 | 6,3 | 17,6 | 12,0 | 10,1 |
| 1000 | 3,1 | 14,4 | 8,8 | 7,0 | 5,4 | 16,7 | 11,1 | 9,3 |
| 1500 | 2,6 | 13,9 | 8,3 | 6,4 | 4,4 | 15,7 | 10,1 | 8,3 |
| 3000 | 1,8 | 13,1 | 7,5 | 5,6 | 3,1 | 14,4 | 8,8 | 7,0 |
| 5000 | 1,4 | 12,7 | 7,1 | 5,2 | 2,4 | 13,7 | 8,1 | 6,2 |
| 7500 | 1,1 | 12,4 | 6,8 | 4,9 | 2,0 | 13,3 | 7,7 | 5,8 |

1) Berechnung nach Abkommenswinkel auf der Geraden

3.3 Finite-Elemente Simulation

Die FE (Finite-Elemente) Analyse wird in der Automobilindustrie in der Entwicklung von Fahrzeugen eingesetzt. Aber auch bei der Auslegung von FRS gewinnt diese Methode zunehmend an Bedeutung. Hierbei bestehen intensive Bemühungen auf europäischer Ebene (CEN: Comité Européen de Normalisation) die Anforderungen an Modelle festzulegen, zu harmonisieren und die zulässigen Toleranzen zu definieren [27]. Derzeit beziehen sich diese Überlegungen noch auf Modifikationen von bereits zugelassenen FRS, um die Anzahl an kostenintensiven Realversuchen zu reduzieren. Insbesondere können Parameterstudien in der Simulation weitaus kostengünstiger durchgeführt werden, als dies bei Realversuchen der Fall wäre.

Die FE Simulationen werden mit der Software LS-Dyna durchgeführt. Die Modelle der Rückhaltesysteme und der Umgebung werden dabei selbst aufgebaut. Zeichnungen dazu werden aus der RVS 09.01.24 entnommen, bzw. von den Herstellern der Rückhaltesysteme zur Verfügung gestellt. Die Fahrzeugmodelle sind öffentliche, frei zugängliche Modelle die auch in anderen Forschungsprojekten zum Einsatz kommen.

3.3.1 Fahrzeuge

Zur Repräsentation der Fahrzeuge werden frei zugängliche Modelle verwendet, welche zur Simulation von TB11 bzw. TB32 Anprallversuchen nach EN 1317 entwickelt wurden [28–30]. Für Anprallsimulationen in der Tunnel-Pannenbucht wird das Modell „Geo Metro“ (900 kg) verwendet, welches einem Fahrzeug für TB11 Anprallversuche nach EN 1317 entspricht. Für die Tunnelportalsimulationen wird das Modell „Ford Taurus“ (1.500 kg) verwendet, welches einem Fahrzeug für TB32 Anprallversuche nach EN 1317 entspricht. Die beiden Fahrzeugmodelle sind in Abbildung 8 dargestellt.

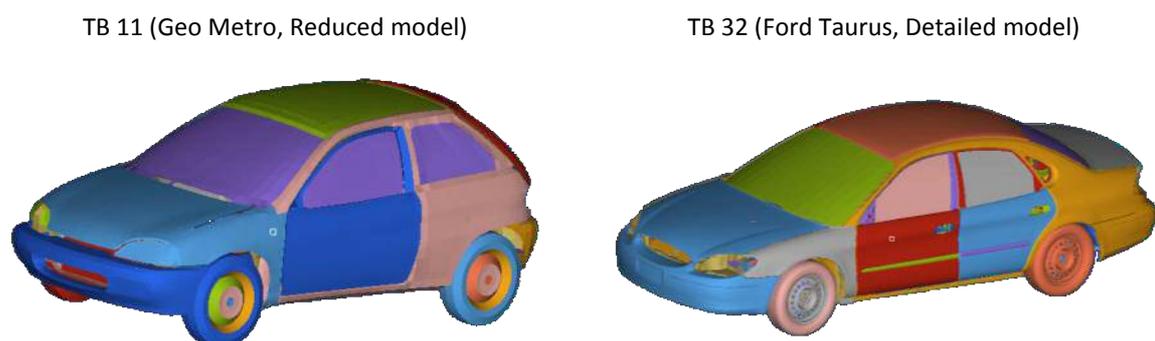


Abbildung 8: Fahrzeugmodelle zur Anprallsimulation an FRS [28–30]

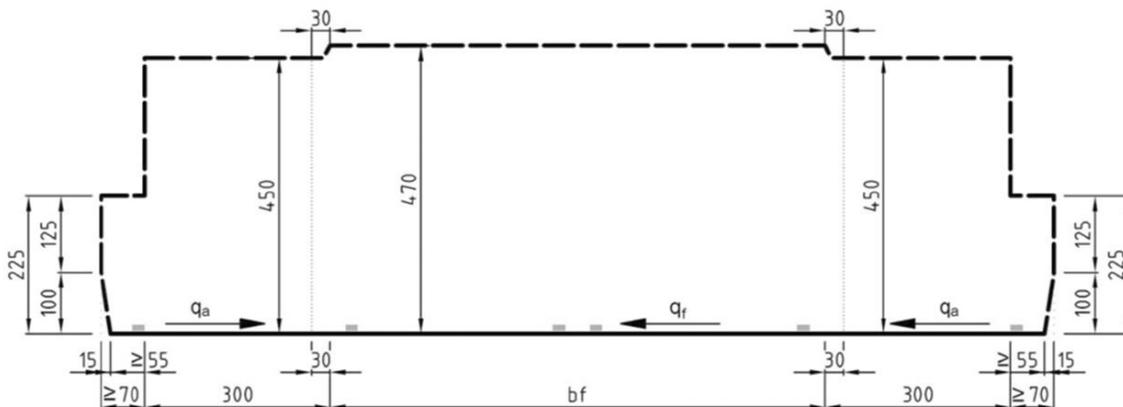


Abbildung 10: Tunnelprofil lt. RVS 09.01.24

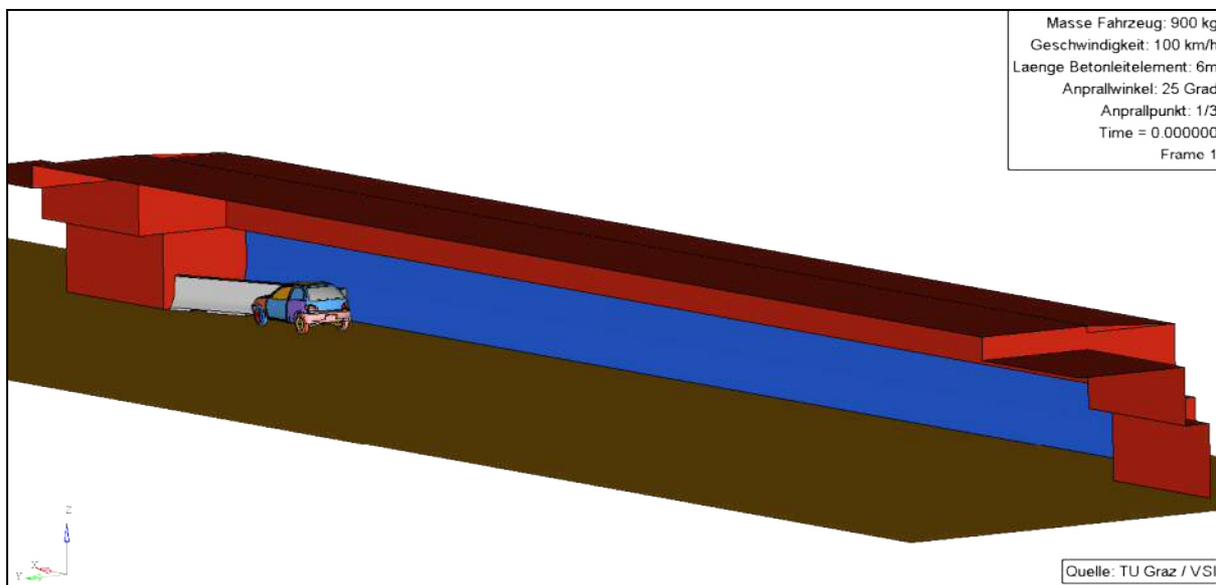


Abbildung 11: Tunnel-Pannenbucht im Simulationsmodell

3.3.4 Tunnelportal

Zur Simulation eines FRS zur Absicherung von Tunnelportalen wird ein System aus aneinandergereihten und miteinander verbundenen Betonleitelementen aufgebaut. Dabei werden das erste und das letzte Betonelement im Boden verankert. Die Verankerung verhindert eine Verschiebung dieser Elemente in der Fahrbahnebene, eine Verdrehung in der Fahrbahnebene um einen Angelpunkt ist jedoch erlaubt. Das letzte Element vor dem Tunnelportal ist als Absenker mit einer keilförmigen Abschrägung ausgeführt und wird unverformbar (rigid) modelliert. Das gesamte FRS ist, in Anlehnung an RVS 09.01.25, unter einem Verhältnis von 1:10 zur Fahrbahnachse verzogen. Dies entspricht einem Aufstellwinkel von ca. 5°. Abbildung 12 zeigt das Simulationsmodell für das FRS am Tunnelportal. Das Tunnelportal selbst wurde hierbei nicht modelliert.

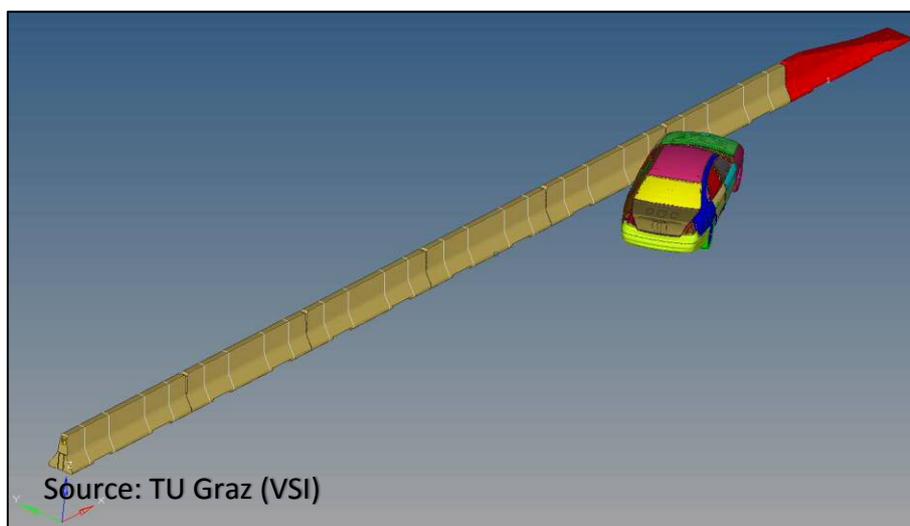


Abbildung 12: Simulationsmodell des FRS am Tunnelportal

3.3.5 Anprallparameter

Um den Einfluss bestimmter Anprallparameter (Anprallwinkel, Anprallpunkt, etc.) abschätzen zu können, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Hierbei sollen verschiedene Anprallkonfigurationen simuliert und miteinander verglichen werden. Die untersuchten Anprallparameter sind in den folgenden Absätzen beschrieben.

Aufstellwinkel

Es werden Betonleitwände mit einer Länge von 4, 6 und 8 m simuliert. Die Wände werden derart positioniert, dass sie an den Enden jeweils Kontakt zur Tunnel-Pannenbuchenwand haben. Aus der Elementlänge ergibt sich schließlich der Aufstellwinkel. Der Aufstellwinkel für ein Betonleitelement in der Tunnel-Pannenbucht ist in Abbildung 13 eingezeichnet.

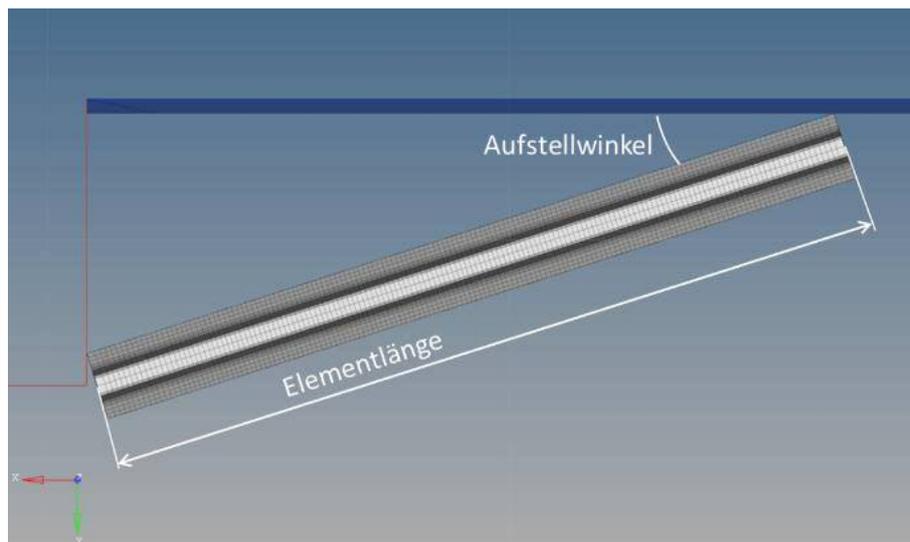


Abbildung 13: Aufstellwinkel eines Betonleitelements

Anprallpunkt

Abhängig von der Elementlänge werden Anprallpunkte definiert, welche gleichmäßig über der Elementlänge verteilt werden. Es soll festgestellt werden, ob der Anprallpunkt am Betonelement ebenfalls einen Einfluss auf die Insassensicherheit hat. Die Anprallpunkte sind, exemplarisch für eine Betonleitwand mit 6 m Länge, in Abbildung 14 dargestellt.

Anprallwinkel

Als Anprallwinkel wurden die in Kapitel 3.2.3 festgestellten Anprallwinkel herangezogen. Für die Abschätzung einer Tendenz der Anprallschwere wurden die Winkel 25, 35 und 55° gewählt. Der Anprallwinkel ist, exemplarisch für eine Betonleitwand mit 8 m Länge, in Abbildung 14 eingezeichnet.

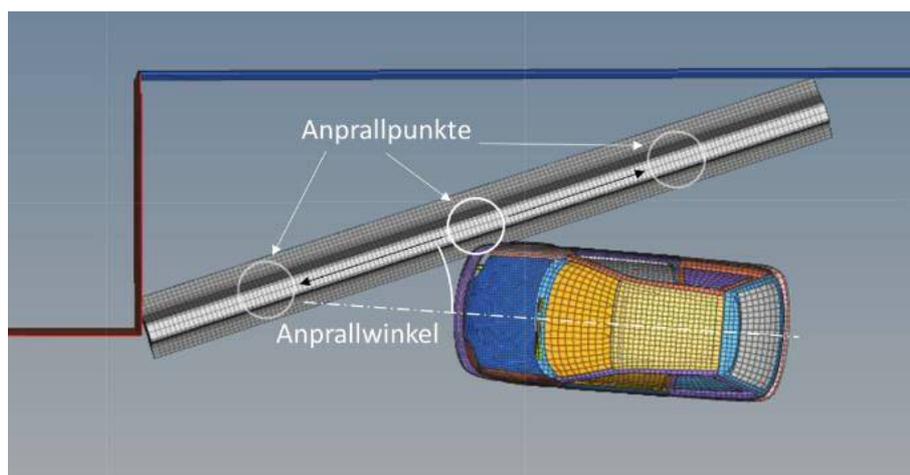


Abbildung 14: Anprallpunkte und Anprallwinkel an einem Betonleitelement

Aufstellposition

Es werden zwei mögliche Positionen simuliert, wobei bei einer das Betonelement die Kante der Tunnel-Pannenbuchenwand überragt, bei der anderen die äußere Kante des Betonelements bündig mit einer,

Methode

als verlängerte Tunnelwand gedachte, Achse ist. Die möglichen Aufstellpositionen sind in Abbildung 15 dargestellt.

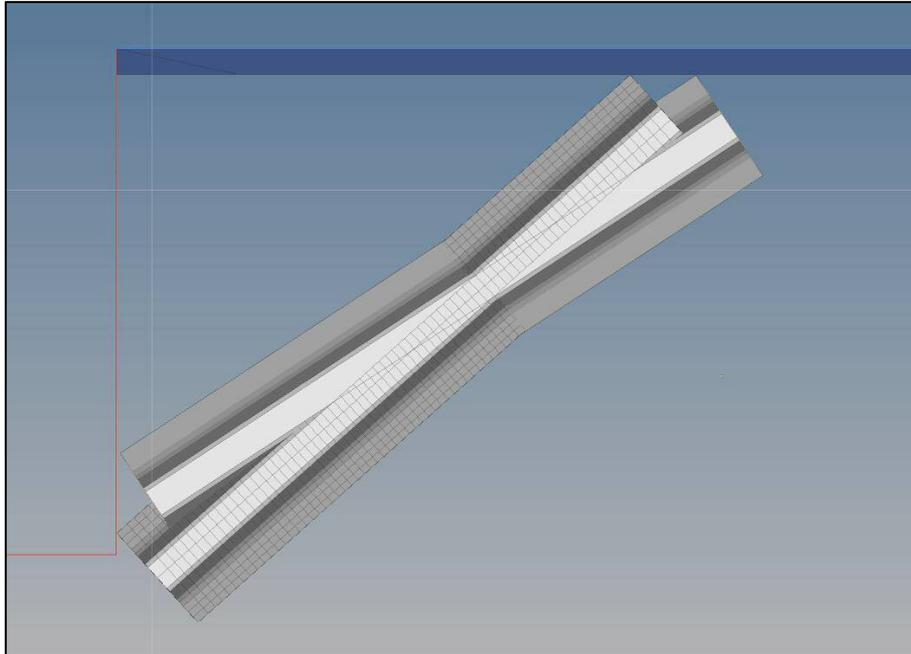


Abbildung 15: Positionen des Betonelements in der Tunnel-Pannenbucht

Teilüberdeckung der Fahrzeugfront

Es soll der Einfluss der Überdeckung der Fahrzeugfront untersucht werden. Die Fahrtrichtung bei diesen Szenarien ist parallel zur Tunnelwand, die Anprallgeschwindigkeit 100 km/h. Die Position (Fahrspur) des Fahrzeugs ist so gewählt, dass sich eine geringe Überdeckung (Small Overlap) zwischen Fahrzeugfront und Betonleitwand ergibt. Aus diesen Szenarien soll eine Aussage über die Kritikalität von Unfällen mit Teilüberdeckung abgeleitet werden können. Die Anprallsituation „Small Overlap“ ist in Abbildung 16 dargestellt.

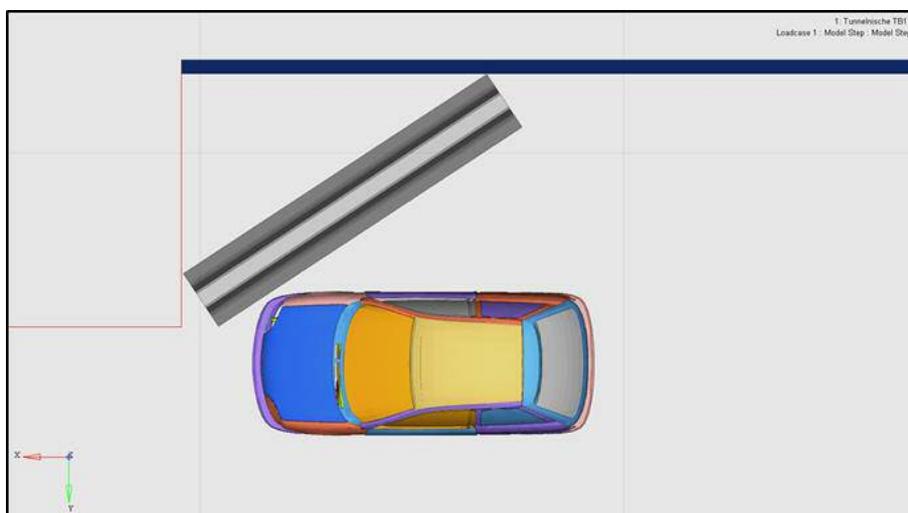


Abbildung 16: Anprallsituation "Small Overlap"

3.3.6 Simulationsmatrix

Tunnel-Pannenbucht

Die prinzipielle Anprallsituation in der Tunnel-Pannenbucht an eine Betonleitwand ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Simulationsparameter sind in Tabelle 3-4 zusammengefasst.

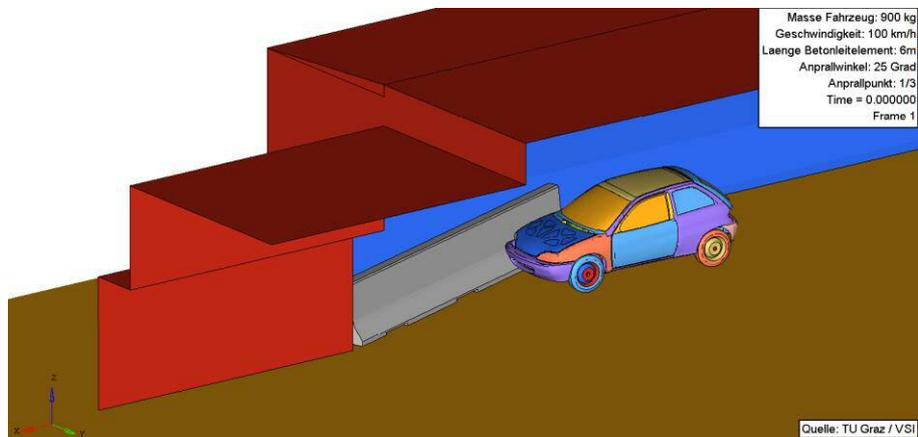


Abbildung 17: Simulationsmodell Tunnel-Pannenbucht

Tabelle 3-4: Simulationsmatrix Tunnel-Pannenbucht

| Anprallobjekt | Betonelement 4 m | Betonelement 6 m | Betonelement 8 m | Starre Wand |
|------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Fahrzeugtyp | TB11 | TB11 | TB11 | TB11 |
| Anprallseite | Front | Front | Front | Front |
| Überdeckung | Full Overlap Small Overlap | Full Overlap | Full Overlap | Full Overlap |
| Anprallgeschwindigkeit | 100 km/h | 100 km/h | 100 km/h | 100 km/h |
| Anprallwinkel | 25° 35° 55° | 25° 35° 55° | 25° 35° 55° | 0° |
| Anprallpunkt | 1/2 | 1/3 2/3 | 1/4 1/2 3/4 | mittig |

Methode

Tunnelportal

Die prinzipielle Anprallsituation an ein FRS aus Betonleitwänden am Tunnelportal ist in Abbildung 18 dargestellt. Die Simulationsparameter sind in Tabelle 3-5 zusammengefasst.

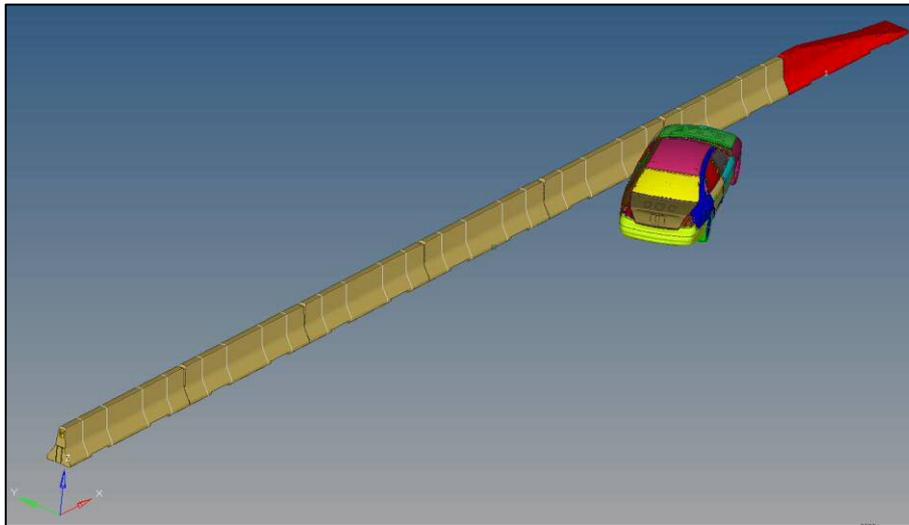


Abbildung 18: Simulationsmodell Tunnelportal

Tabelle 3-5: Simulationsmatrix Tunnelportal

| | |
|-------------------------------|-------------------------|
| Anprallobjekt | Betonelement 4 m |
| Fahrzeugtyp | TB32 |
| Anprallseite | Front |
| Anprallgeschwindigkeit | 100 km/h |
| Anprallwinkel | 25° |

3.4 Versuch

3.4.1 Testfahrzeuge

Die Auswahl geeigneter Testfahrzeuge erfolgte analog zu Anprallversuchen nach EN 1317-2. Für die Versuche in der Tunnel-Pannenbucht wurde dementsprechend ein TB11 Fahrzeug (900 kg) gewählt, für den Versuch am Tunnelportal ein TB32 Fahrzeug (1.500 kg). Die Fahrzeuge entsprechen den Auswahlkriterien, welche für Anprallprüfungen nach EN 1317-2 gelten.

3.4.2 Fahrzeugrückhaltesysteme

Folgende FRS wurden für die Realversuche verwendet:

- Betonleitelement 4m „Rebloc H2“ (Tunnel-Pannenbucht)
- Betonleitelement 8m „Rebloc H2“ (Tunnel-Pannenbucht)
- Anpralldämpfer „Alpina F1-50“ (Tunnel-Pannenbucht)
- Anpralldämpfer „Alpina <Prototyp F1-80>“ (Tunnel-Pannenbucht)
- 6 x Betonleitelement „Deltabloc H2“ (Tunnelportal)

Die Aufstellung der Anpralldämpfer erfolgte nach Angaben des Herstellers.

3.4.3 Tunnel-Pannenbucht

Die Tunnel-Pannenbucht für den Versuchsaufbau ist eine Konstruktion aus massiven Betonblöcken, welche miteinander über Ankerstangen verbunden und über verschraubte Stahlträger auf die Fahrbahn abgestützt sind. Die Auslegung erfolgte über FE Simulationen.

3.4.4 Tunnelportal

Das Tunnelportal wurde, analog zur Tunnel-Pannenbucht, aus massiven, miteinander verbundenen, Betonblöcken aufgebaut.

3.4.5 Anprallparameter

Prüfgeschwindigkeit

Entsprechend der Anforderungen der Ausschreibung wurde die Prüfgeschwindigkeit für Richtungsverkehrstunnel mit 100 km/h festgelegt.

Anprallwinkel

Folgende Abkommenswinkel wurden für die Realversuche gewählt:

- Tunnel-Pannenbucht: 5° (abgeleitet aus Simulation Vorkollisionsphase und Realunfallanalysen)

Methode

- Tunnelportal: 20° (abgeleitet aus Simulation Vorkollisionsphase und Realunfallanalysen)

Folgende Aufstellwinkel wurden für die Realversuche gewählt:

- Betonelement 4m: 42° (Winkel zufolge Tunnel-Pannenbuchtenbreite und Elementlänge)
- Betonleitelement 8m: 18° (Winkel zufolge Tunnel-Pannenbuchtenbreite und Elementlänge)
- Anpralldämpfer: 0° (praxisübliche Aufstellung für den Tunnel parallel zur Fahrbahnachse)
- Betonleitsystem: 5° (praxisübliche Aufstellung im Portalbereich mit Verzug von 1:10)

Der Anprallwinkel ergibt sich aus der Kombination von Abkommens- und Aufstellwinkel.

3.4.6 Testmatrix

Für die Tunnel-Pannenbucht wurden zwei Betonleitwände (4m und 8m) sowie zwei Anpralldämpfer („ALPINA F1-50“, „ALPINA Prototyp F1-80“) getestet. Am Tunnelportal wurde ein Betonleitwandssystem bestehend aus vier Betonleitelementen, sowie je einem abgesenkten und verankerten Anfangs- und Endelement getestet. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Testparameter.

Tabelle 3-6: Testmatrix

| | Einheit | Beton 4m „REBLOC H2“ | Beton 8m „REBLOC H2“ | Anpralldämpfer „ALPINA F1-50“ | Anpralldämpfer „Prototyp F1-80“ | 6 x Beton 4m „DELTABLOC“ |
|-----------------|---------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Ort | | Tunnel-Pannenbucht | Tunnel-Pannenbucht | Tunnel-Pannenbucht | Tunnel-Pannenbucht | Tunnelportal |
| Fahrzeug | | TB11 | TB11 | TB11 | TB11 | TB32 |
| Geschwindigkeit | km/h | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Aufstellwinkel | ° | 42 | 18 | 0 | 0 | 5 |
| Abkommenswinkel | ° | 5 | 5 | 5 | 5 | 20 |
| Anprallseite | | Beifahrer | Beifahrer | Beifahrer | Beifahrer | Fahrer |
| Verankerung | | - | - | lt. Hersteller | lt. Hersteller | Elem. 1. u. 6. |

3.5 Bewertung der Absicherungsvarianten

3.5.1 Bewertungskriterien

In den folgenden Absätzen sind die in dieser Studie angewandten Bewertungskriterien, welche in der Nutzwertanalyse zur Anwendung kommen, beschrieben. In der Nutzwertanalyse erfolgt die Bewertung der definierten Kriterien nach dem Schulnotenprinzip (1: Sehr Gut, 5: Nicht Genügend). Sofern keine eindeutige Beurteilung möglich war bzw. nicht untersucht werden konnte (beispielsweise wurde kein Anprallversuch an die Anpralldämpferseite durchgeführt), erfolgte die Bewertung mit der Schulnote 3 und der Schulnote 5, sodass sich für die Gesamtbewertung ein Bewertungsbereich ergibt.

Neben Kriterien die das Verletzungsrisiko bzw. die Verletzungsschwere der Fahrzeuginsassen beschreiben, kommen weitere Kriterien zur Anwendung, welche ein Maß für das Risiko anderer Verkehrsteilnehmer (z.B. Nachfolgeverkehr, ...) darstellen. Zudem kann eine Bewertung anhand von Kriterien, welche das Risiko für eine Beschädigung der Infrastruktur wiedergeben, durchgeführt werden.

Acceleration Severity Index (ASI)

Der ASI ist ein festgelegtes Kriterium der EN 12767:2008-01 [31] zur Klassifikation der Energieabsorptionskategorie und der Insassensicherheitsstufe, sowie ein festgelegtes Kriterium der EN 1317 [8, 23, 24] zur Klassifikation der Aufhaltstufe. Um eine Einstufung für eine Anprallheftigkeitsstufe „B“ nach EN 1317-2 (Fahrzeugrückhaltesysteme in Längsrichtung) bzw. nach EN 1317-3 (Anpralldämpfer) zu erreichen, gilt ein Grenzwert für ASI von 1,4. Die Anprallheftigkeit ist in der RVS 09.01.24, der RVS 09.01.25 als auch in der RVS 05.02.31 [3–5] ebenso mit Stufe „B“ festgelegt. Im vorliegenden Projekt werden ASI-Werte für den Kontakt des Fahrzeugs mit der Absicherungsmaßnahme (ASI Primäranprall bzw. ASI Erstkontakt) berechnet (Abbildung 19). Für die Bewertung in der Nutzwertanalyse wäre die Schulnote 1 beim Erreichen der Anprallheftigkeitsstufe „B“ zu geben. Erreicht die Absicherungsmaßnahme die Anprallheftigkeitsstufe „C“ so wird dies mit 3 benotet. Alle über 1,9 liegenden Werte werden mit der Schulnote 5 bewertet.

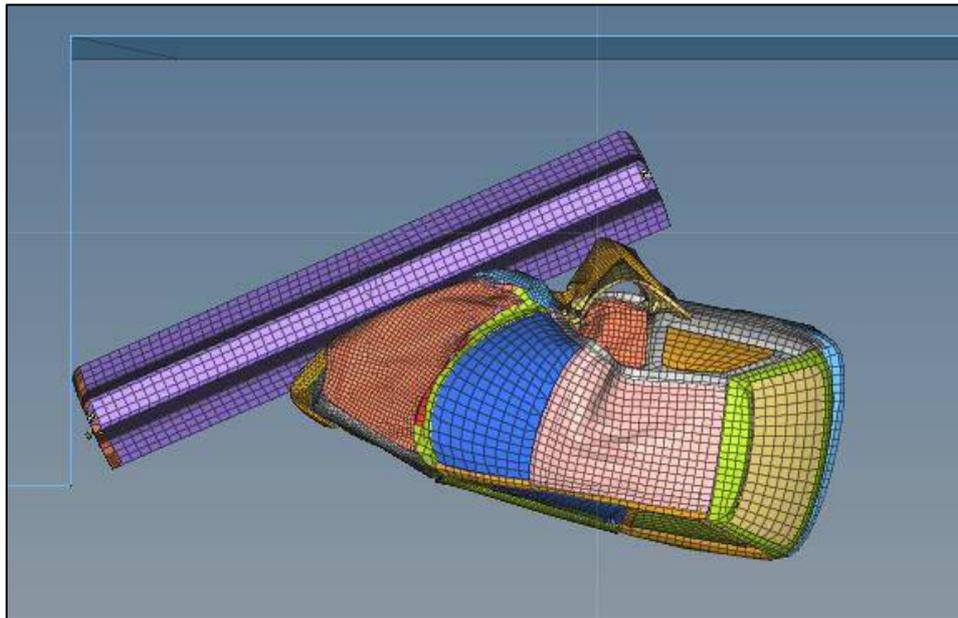


Abbildung 19: Primäranprall des Fahrzeuges an die Absicherungsmaßnahme

Theoretical Head Impact Velocity (THIV)

Der THIV ist ein festgelegtes Kriterium der EN 12767:2008-01 [31] zur Klassifikation der Energieabsorptionskategorie und der Insassensicherheitsstufe, sowie ein festgelegtes Kriterium der EN 1317 [8, 23, 24] zur Klassifikation der Anprallheftigkeitsstufe. Beim Anprall des Fahrzeugs an ein Hindernis behält der Kopf als träge Masse seine Bewegung im Allgemeinen bei und bewegt sich (im Falle eines Frontalanpralls) weiter in Fahrtrichtung. Der THIV entspricht einer theoretischen Geschwindigkeit des Kopfes beim Erreichen der Fahrzeugraumgrenzen, d.h. beim theoretischen Anprall an die Fahrzeuginnenausstattung. Zur Ermittlung des THIV wird eine vereinfachte Geometrie des Fahrzeuginnenraumes angenommen. Als Grenzwerte für THIV gelten 33 km/h für Fahrzeugrückhaltesysteme in Längsrichtung bzw. 44 km/h für Anpralldämpfer. Im vorliegenden Projekt werden THIV-Werte den Kontakt des Fahrzeugs mit der Absicherungsmaßnahme (THIV Primäranprall bzw. THIV Erstkontakt) berechnet (Abbildung 19).

Für die Bewertung in der Nutzwertanalyse wäre die Schulnote 1 beim Erreichen des THIV von kleiner oder gleich 33 km/h bei Betonleitelementen und kleiner oder gleich 44 km/h bei Anpralldämpfern, welche frontal angeprallt werden. Werte von größer als 33 km/h bzw. 44 km/h werden mit der Schulnote 5 bewertet.

Intrusion

Können Intrusionen bzw. Beschädigungen der Fahrgastzelle festgestellt werden, wie beispielsweise hohe Deformationen des Dachträgers, so steigt das Risiko von schweren Verletzungen der Insassen.

Abbildung 20 zeigt ein Beispiel für ein Fahrzeug mit starker Deformation der A-Säule nach einem Anprall. Für eine positive Bewertung in der Nutzwertanalyse darf keine Deformation an der Fahrgastzelle feststellbar sein.



Abbildung 20: Massive Deformation der Fahrgastzelle nach einem Anprall

Schutzwirkung bei einem Anprall außerhalb des Auslegungslastfalles

Jede Absicherungsmaßnahme wird für einen bestimmten Einsatzzweck entwickelt, für eine bestimmte Wirkung ausgelegt und schließlich für einen festgelegten Lastfall zertifiziert. Trifft ein Fahrzeug eine Absicherungsmaßnahme außerhalb dieses Auslegungslastfalles (Anprallgeschwindigkeit, Anprallwinkel, Anprallstelle, etc.), so wird vom Hersteller keine definierte Wirkung garantiert. Unabhängig davon müssen für eine umfassende Bewertung der Absicherungsmaßnahmen jedoch auch diese Szenarien berücksichtigt werden. Abbildung 21 (Prinzipskizze) zeigt mögliche Anprallszenarien an eine Absicherungsmaßnahme. Ein Anprall im grünen Bereich ① entspricht dem Auslegungslastfall, wohingegen ein Anprall in den Bereichen ② bis ④ außerhalb des Auslegungslastfalles liegt. In der Nutzwertanalyse werden folgende Kriterien zur Bewertung des Anpralls außerhalb des Auslegungslastfalles definiert:

- Schräger Anprall (Bereich ① und Übergang auf Bereich ②): Zur Bewertung der Schutzwirkung bei schrägem Anprall an die Stirnseite der Absicherungsmaßnahme. In **Abbildung 22** sind mögliche Szenarien für einen schrägen Anprall dargestellt.
- Seitlicher Anprall (Bereiche ② und ③): Zur Bewertung der Schutzwirkung bei seitlichem Anprall an die Absicherungsmaßnahme. Am Übergang von verschiedenen Bereichen der Absicherungsmaßnahme, z.B. (A) auf (B), ist mit einer Unstetigkeit in der Rückhaltewirkung (verschie-

Methode

dene Materialien, ...) zu rechnen. Gemäß EN 1317-3 ist für nicht-zurückleitende Anpralldämpfer-Systeme jedoch kein Anpralltest vorgeschrieben. Bei rückleitenden Anpralldämpfer-Systemen ist hier von einer Schutzwirkung auszugehen; bei nicht-zurückleitenden Anpralldämpfer-Systemen ist vermutlich mit keiner definierten Schutzwirkung zu rechnen. Weiter ist bei einem Freiraum zwischen der Absicherungsmaßnahme (A) oder (B) und der Tunnel-Pannenbuchtenwand (C) mit keiner definierten Schutzwirkung zu rechnen. Abbildung 23 verdeutlicht das Risiko einer Kollision mit der Kante der Tunnel-Pannenbucht durch einen Freiraum bzw. Abstand von der Absicherungsmaßnahme zur Tunnel-Pannenbuchtenwand.

- Überdeckung Tunnel-Pannenbuchtenstirnwand (Bereich ④): Sofern die Absicherungsmaßnahme die Tunnel-Pannenbuchtenstirnwand nur teilweise überdeckt, besteht das Risiko eines Fahrzeuganpralls gegen die Ecke der Tunnel-Pannenbuchtenstirnwand und damit ein Verhaken und Verdrehen des Fahrzeugs um die Hochachse. Dies kann eine unkontrollierte Rückleitung des Fahrzeuges in die Fahrspur bewirken.

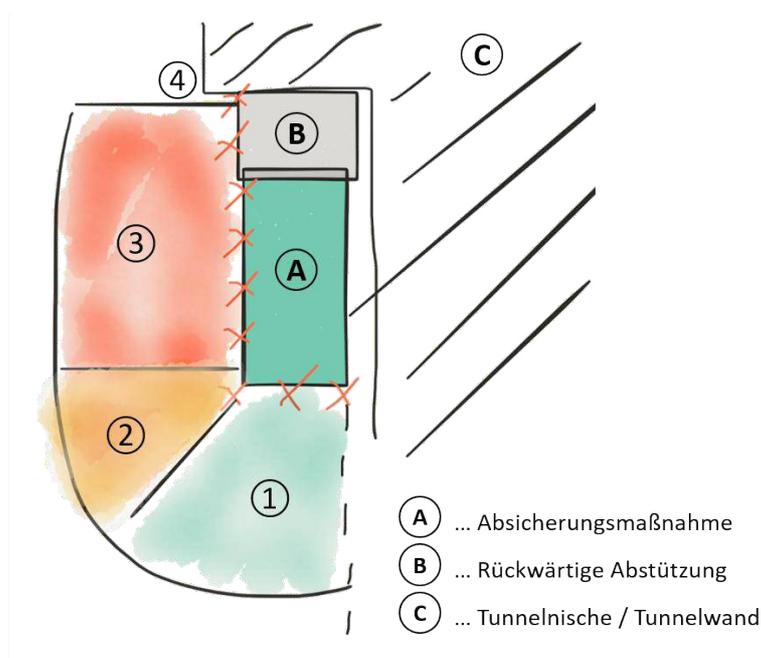


Abbildung 21: Schematische Darstellung von Anprallpunkten an einer Absicherungsmaßnahme

Die Bereiche ②, ③ und ④ wurden nicht explizit untersucht. Die Bewertung erfolgte mit der Schulnote 3 und der Schulnote 5.

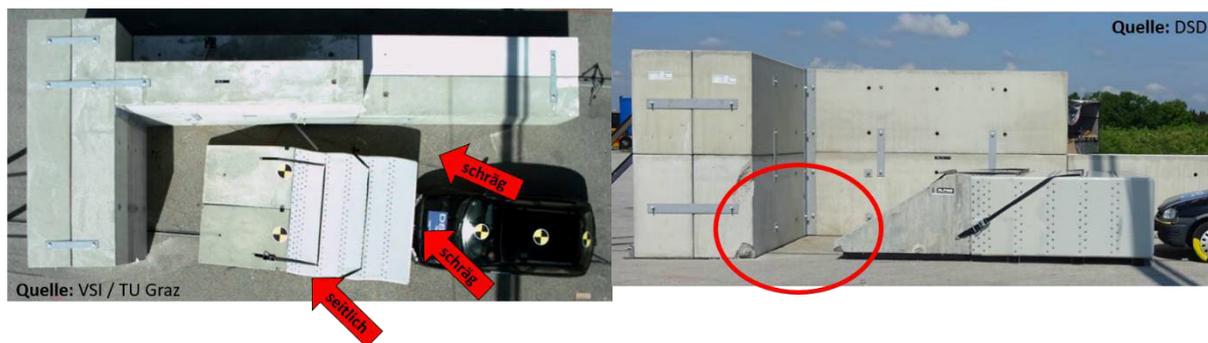


Abbildung 22: Risiko bei einem schrägen Anprall an ein Anpralldämpfersystem

Abbildung 23: Risiko bei einem seitlichen Anprall durch einen Freiraum zwischen Anpralldämpfer-system und Tunnel-Pannenbuchtenwand

Risiko eines Sekundäranpralls

Durch die Absicherungsmaßnahme (z.B. Rückleitung auf die Fahrbahn nach dem Anprall) bzw. durch die Anprallkonfiguration des Fahrzeugs (Anprallposition, Anprallwinkel, etc.) kann das Fahrzeug zurück auf die Fahrbahn geschleudert werden und somit auch Dritte gefährden. Dies wird in diesem Zusammenhang als Sekundäranprall bezeichnet. Da die Insassenrückhaltesysteme bereits beim Primäranprall ausgelöst haben, besteht beim Sekundäranprall ein wesentlich größeres Verletzungsrisiko. Beim Sekundäranprall kann es zu folgenden Fällen kommen:

- Bruch der Absicherungsmaßnahme: Ein Bruch der Absicherungsmaßnahme durch den Anprall kann dazu führen, dass keine bzw. nicht die volle Schutzwirkung erreicht wird. Es kann somit zu keinem definierten Energieabbau bzw. keiner definierten Ableitung des Fahrzeugs kommen. Im Falle eines Betonleitelements als Absicherungsmaßnahme kann ein Bruch auch in der FE-Simulation realistisch dargestellt werden. Die verwendeten Simulationsmodelle ermöglichen die Nachstellung einer Materialschädigung und können so ein Versagen des Materials abbilden. Hierbei kann bewertet werden, ob es punktuell zu Überlastungen des Materials gekommen ist. Abbildung 25 zeigt das Ergebnis einer FE-Simulation mit punktuelltem Materialversagen an der stoßabgewandten Seite. Tritt dieser Fall ein, wird mit der Schulnote 5 bewertet.
- Verschieben der Absicherungsmaßnahme: Ein seitliches Verschieben der Absicherungsmaßnahme kann dazu führen, dass eine Überdeckung der Tunnel-Pannenbuchtenkante nicht mehr gegeben ist. Dadurch steigt das Risiko einer Kollision / Verhakung mit der Tunnel-Pannenbuchtenkante. Abbildung 24 zeigt eine reale Unfallsituation bei der die Absicherungsmaßnahme verschoben und somit die Tunnel-Pannenbuchtenkante freigelegt wurde. Tritt dieser Fall ein, wird mit der Schulnote 5 bewertet.

Methode

- Kippen der Maßnahme: Bei der Kollision mit einem Fahrzeug kann es zum Kippen der Absicherungsmaßnahme kommen. Dieses Kippen kann, ähnlich wie ein seitliches Verschieben, das Risiko einer Sekundärkollision mit der Tunnel-Pannenbuchtenwand erhöhen. Ebenso kann es dadurch zu einem Abheben des Fahrzeugs und in weiterer Folge zu einer Kollision mit dem Nachfolgeverkehr während der Flugphase kommen. Eine derartige Situation ist in Abbildung 26 zu sehen. Tritt dieser Fall ein, wird mit der Schulnote 5 bewertet.



Abbildung 24: Freigelegte Kante der Tunnel-Pannenbucht durch Verschieben der Absicherungsmaßnahme

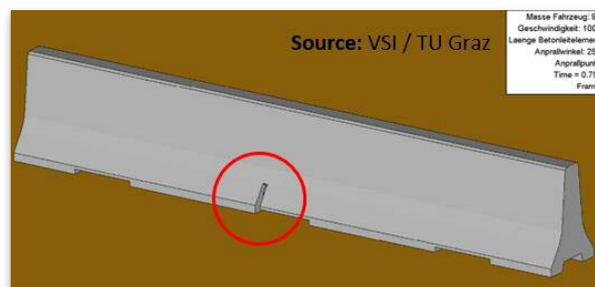


Abbildung 25: Bruch der Absicherungsmaßnahme (FE-Simulation)



Abbildung 26: Kippen einer Absicherungsmaßnahme zufolge einer Kollision

Nachkollisions-Kinematik: Kommt es beim Primäranprall zu einem seitlichen Verschieben bzw. Beschädigen der Absicherungsmaßnahme, so führt dies im Allgemeinen zu einem Anprall außerhalb des Auslegungslastfalles (s.o.). Folgende Effekte können dabei auftreten:

- Rückleitung in die Fahrspur (tritt dieser Fall ein, wird mit der Schulnote 5 bewertet):
 - Wird das Fahrzeug von der Absicherungsmaßnahme nicht vollständig abgebremst, so kann es zu einer Rückleitung in die Fahrspur bzw. zu einer Endlage des Fahrzeugs auf der Fahrbahn kommen. Damit geht ein erhöhtes Risiko für eine Sekundärkollision mit anderen Verkehrsteilnehmer (z.B. Nachfolgeverkehr) einher.
 - Wird durch den Anprall unzureichend Geschwindigkeit abgebaut, so kann es zu einer weiteren Kollision mit der gegenüberliegenden (linken) Tunnelwand kommen.
 - Während der Flugphase in die gegenüberliegende Tunnelwand besteht ein hohes Risiko einer Kollision mit dem Nachfolgeverkehr.
- Erfolgt der Anprall des Fahrzeugs nicht über die gesamte Fahrzeugfront, so spricht man von einem Offsetanprall. Hierbei kann sich das Fahrzeug verhaken und es kommt zu einer Rotation des Fahrzeugs, sodass das Fahrzeug in die Fahrspur geschleudert wird. Ist ein Zurückschleudern des Fahrzeugs auf die Fahrspur bei einem Offsetanprall möglich, so wird mit der Schulnote 5 bewertet.

3.5.2 Nutzwertanalyse

Zur Bewertung der Absicherungsmaßnahmen wird eine Nutzwertanalyse durchgeführt. In der Nutzwertanalyse erfolgt die Bewertung der zuvor definierten Kriterien nach dem Schulnotenprinzip (1: Sehr Gut, 5: Nicht Genügend). Die einzelnen Kriterien werden ferner noch gewichtet. Der Nutzwert einer Absicherungsmaßnahme ergibt sich folglich als Summen-Durchschnittswert der Einzelkriterien. Für Kriterien für die aus den Versuchen keine eindeutige Beurteilung möglich war bzw. nicht untersucht wurden (beispielsweise wurde kein Anprallversuch an die Anpralldämpferseite durchgeführt), wurden mit einer Schulnote 3 und 5 bewertet.

- NW: Nutzwert (je kleiner, desto besser -> Schulnotendurchschnitt)
- B_k : Bewertungskriterium
- G_k : Gewichtungsfaktor

Tabelle 3-7: Gewichtung der Bewertungskriterien

| Bewertungskriterien | | Gewichtung |
|--|--|------------|
| Verletzungskriterien | ASI Primäranprall | 3 |
| | THIV Primäranprall | 3 |
| Intrusionen | Beschädigung der Fahrgastzelle / Intrusion in Fahrgastzelle | 2 |
| Schutzwirkung außerhalb Anwendungsbe- reich | Schutzwirkung bei schrägem Anprall an Stirnseite der Absicherungsmaßnahme | 1 |
| | Schutzwirkung bei seitlichem Anprall an die Absicherungsmaßnahme in Betonkeil | 2 |
| | Risiko Kollision mit Ecke Tunnel-Pannenbucht durch Abstand der Absicherungsvariante zur Tunnel-Pannenbuchtenstirnseite | 2 |
| Sekundäranprall | Durchbruch Element / Durchschlag Dämpfer | 1 |
| | Seitliches Verschieben Absicherungsmaßnahme beim Anprall und Anprall stirnseitige Tunnel-Pannenbuchtenwand | 1 |
| | Kippen der Absicherung und begünstigen eines Anpralls an die stirnseitige Tunnel-Pannenbuchtenwand | 2 |
| Nachkollisions-kine- matik | Rückleitung auf Fahrbahn; Endlage des Fahrzeugs auf Fahrbahn | 2 |
| | Anprall gegenüberliegende (linke) Tunnelwand | 3 |
| | Risiko Verdrehen und schleudern Fahrzeug in die Fahrspur bei Offsetanprall (Verhaken) | 2 |
| | Abheben des Fahrzeugs und dadurch Kollision mit Nachfolgeverkehr in der Flugphase | 2 |

3.5.3 Nutzen-Kosten-Analyse

Die Kosten-Nutzen-Analyse erfolgte nach der RVS 02.01.22 [32]. Die gesamte Investition wird in einzelne Leistungen mit entsprechenden Abschreibungszeiträumen aufgegliedert. Die einzelnen Leistungen werden über die Nutzungsdauer abgeschrieben und verzinst, d.h. in Form von Annuitäten in jährlich gleiche Aufwendungen aufgegliedert.

$$\frac{\text{---} \quad \text{---}}{\text{---}}$$

af: Annuitätenfaktor

p: Zinssatz [%]

d: Nutzungsdauer, Abschreibungszeitraum

IK: Investitionskosten pro Jahr [EUR]

IA_k: Investitionsausgaben je Absicherungsvariante [EUR]

NKV: Nutzen-Kosten-Verhältnis

RP: Reduktionspotential an volkswirtschaftlichen Kosten

Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Kosten: lt. Auskunft ASFINAG
- Lebensdauer (Nutzungsdauer, Abschreibungszeitraum)
 - Lebensdauer Betonelement 25 Jahre
 - Anpralldämpfer 16 Jahre
- Zinssatz: 3% pro Jahr
- Betonelement 4 m ca. 2.500 EUR inkl. Montage
- Betonelement 8 m ca. 5.000 EUR inkl. Montage (geschätzt, keine Erfahrungswerte zu Kosten)
- Anpralldämpfer ca. 20.000 EUR inkl. Montage

Methode

- Betonleitwände Tunnelportal: 10.000 EUR für 24 m Aufstelllänge (Angenommene Kosten: 200,- EUR pro Laufmeter + Montagekosten)
- Tunnel in Betrieb: 151 [33] mit insgesamt ca. 630 Anprallsituationen
 - Tunnel-Pannenbuchten: 298
 - Tunnelportal: 302; aktuell sind es 332 Tunnelportale (lt. BMVIT)
- Berechnung der volkswirtschaftlichen Unfallkosten [34]
 - Berücksichtigung des menschlichen Leids (körperliche und seelische Schmerzen, Schock, Leid, Angst, Verlust an Lebensfreude und Verminderung der Lebensqualität); wird mit dem Zahlungsbereitschaftsansatz („willingness to pay“) bewertet. Die Kosten des menschlichen Leids machen fast die Hälfte der Unfallkosten aus (47%).
 - Weitere Kostenarten: Sachschäden (25%), Verlust an Leistungspotenzial (15%), Verwaltungskosten bei Versicherungen (8%), Rechtskosten (2%), medizinische Behandlungskosten (1%).
- Reduktionspotential durch die Maßnahme: 1 Getöteter pro Jahr wird verhindert; Durchschnittliche Unfallkosten (Preisstand 2016) [34]
 - Getöteter: 3.316.309 EUR
 - Schwerverletzter: 429.517 EUR
 - Leichtverletzter: 30.575 EUR

Zur Vereinfachung wurden keine Kosten zu Absicherungsmaßnahmen während der Installation, Adaptierung von Anlagenverhältnissen, Entsorgung, etc. zu Grunde gelegt. Es wurde angenommen, dass derartige Kosten für alle betrachteten Absicherungsmaßnahmen in etwa gleich sind und somit keine Auswirkungen auf das Nutzen-Kosten-Verhältnis haben. Sollten hierbei allerdings Unterschiede vorliegen, so können diese anfallenden Kosten in einer detaillierteren Betrachtung berücksichtigt werden.

4 ERGEBNISSE

4.1 Finite-Elemente Simulation

4.1.1 Tunnel-Pannenbucht

Für die Tunnel-Pannenbucht wurden entsprechend der Simulationsmatrix FE-Berechnungen durchgeführt. Dabei wurden das FRS (Betonleitelemente 4 m, 6 m und 8 m), der Anprallwinkel, sowie der Anprallpunkt variiert. Zusätzlich wurden drei Simulationen entsprechend den Realversuchen mit einem Anprallwinkel von 47° beim 4 m und 23° beim 8 m Betonleitwandelement durchgeführt. Das 6 m Betonleitwandelement wurde nicht im Realversuch getestet. Tabelle 4-1 gibt einen umfassenden Überblick über die Ergebnisse dieser Parametervariation für Anprallszenarien an Betonleitwandelemente:

Tabelle 4-1: Simulationsergebnisse Tunnel-Pannenbucht

| Element | Anprallwinkel | Anprallpunkt | ASI Erstkontakt | THIV [km/h] | Element- beschädigung | Δv [m/s] |
|---------|---------------|--------------|--------------------|----------------|--------------------------|---------------------|
| 4 m | 25° | 1/2 | 2,07 | 38,39 | ja | 5 |
| 4 m | 35° | 1/2 | 2,45 | 50,54 | ja | 9 |
| 4 m | 55° | 1/2 | 4,44 | 73,90 | ja | 17 |
| 6 m | 25° | 1/3 | 2,15 | 36,84 | ja | 6 |
| 6 m | 35° | 1/3 | 2,60 | 47,30 | ja | 9 |
| 6 m | 55° | 1/3 | 4,44 | 65,95 | ja | 18 |
| 6 m | 25° | 2/3 | 2,16 | 34,90 | nein | 5 |
| 6 m | 35° | 2/3 | 2,86 | 48,84 | ja | 8 |
| 6 m | 55° | 2/3 | 4,15 | 64,02 | ja | 15 |
| 8 m | 25° | 1/4 | 2,15 | 35,90 | nein | 6 |
| 8 m | 35° | 1/4 | 2,59 | 46,66 | ja | 10 |
| 8 m | 55° | 1/4 | 4,28 | 61,74 | ja | 18 |
| 8 m | 25° | 1/2 | 2,13 | 37,14 | ja | 6 |
| 8 m | 35° | 1/2 | 2,66 | 46,60 | ja | 9 |
| 8 m | 55° | 1/2 | 4,41 | 63,43 | ja | 18 |
| 8 m | 25° | 3/4 | 2,14 | 36,02 | nein | 5 |
| 8 m | 35° | 3/4 | 2,70 | 47,24 | ja | 9 |
| 8 m | 55° | 3/4 | 4,33 | 63,43 | ja | 15 |
| 4m | 47° | 1/2 | 3,14 | 63,30 | ja | 15 |
| 6m | 36° | 1/2 | 2,44 | 43,30 | ja | 7 |
| 8m | 23° | 1/2 | 1,97 | 34,87 | nein | 5 |

Ergebnisse

Anprall an ein 4 m-Betonleitwandelement

Exemplarisch für eine Anprallsimulation an ein 4 m-Betonleitwandelement wird der Ablauf der Fahrzeugbewegung für einen Anprallwinkel von 47° in Abbildung 27 dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass das Fahrzeug nach dem Erstkontakt entlang des FRS abgleitet und um die Längsachse rollt. Es wird ein maximaler Luftstand von ca. 2,3 m an der Fahrzeugoberseite erreicht. Die Tunnel-Pannenbuchtenwand bzw. -kante wird vom Fahrzeug nicht berührt. Das Betonelement weist in diesem Fall an einer Stelle eine Schädigung auf.

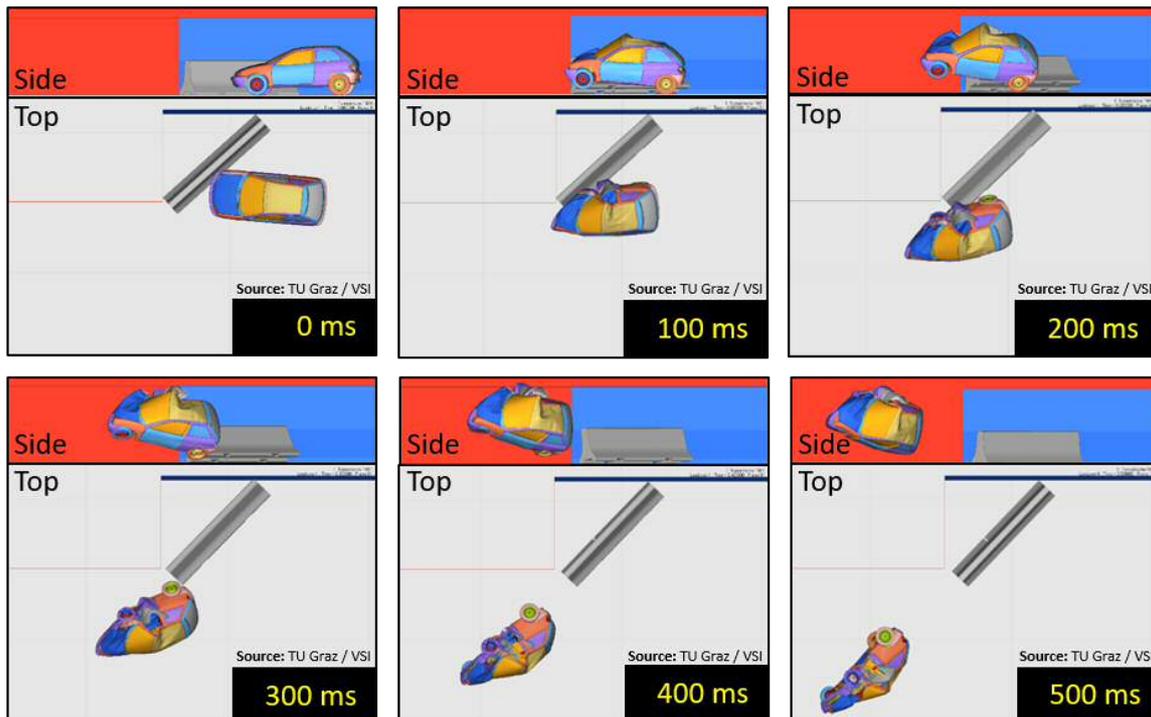


Abbildung 27: Simulationsergebnis Tunnel-Pannenbucht (TB11, Betonelement 4m)

Anprall an ein 8 m-Betonleitwandelement

Exemplarisch für eine Anprallsimulation an ein 8 m-Betonleitwandelement wird der Ablauf der Fahrzeugbewegung für einen Anprallwinkel von 23° in Abbildung 28 dargestellt. Das Fahrzeug rollt im Gegensatz zum 4 m-Betonwandelement nicht um die Längsachse, hebt aber ebenfalls durch den Anprall ab. Der maximale Luftstand an der Fahrzeugoberseite beträgt ca. 2 m. Es kommt zu keinem Kontakt mit der Tunnel-Pannenbuchtenwand bzw. -kante. Das Betonelement weist keine Schädigungen auf.

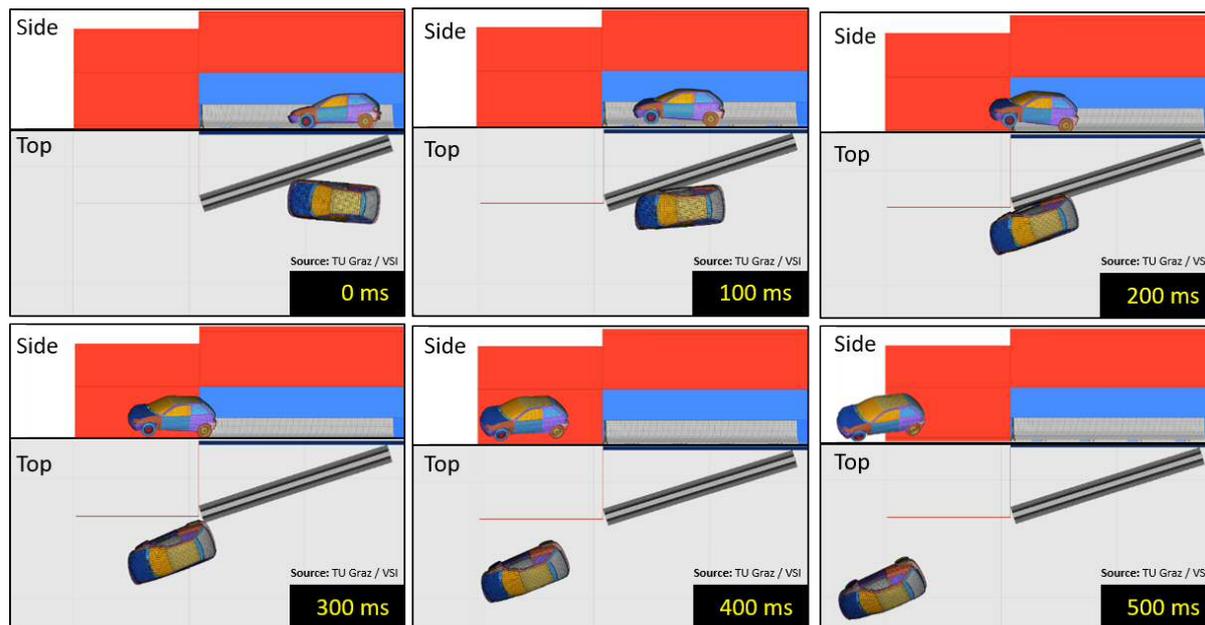


Abbildung 28: Simulationsergebnis Tunnel-Pannenbucht (TB11, Betonelement 8m)

Anprall an ein Betonleitwandelement mit geringer Überdeckung (Small Overlap)

Weiters wurde ein Anprallszenario mit geringer Überdeckung (Small Overlap) simuliert. Dabei überdeckt das FRS die Stirnfläche des Fahrzeuges zum Zeitpunkt des Anpralls nur teilweise. Das Simulationsergebnis einer derartigen Situation ist in Abbildung 29 dargestellt. Das Fahrzeug gleitet zunächst am Betonleitwandelement entlang und hebt anschließend ab. Während der Flugphase rollt das Fahrzeug um die Längsachse. Besonders kritisch kann eine derartige Situation sein, wenn das Fahrzeug mit der Tunnel-Pannenbuchtenkante verhakt. Durch die überlappende Anordnung des Betonleitwandelements über die Tunnel-Pannenbuchtenkante hinaus, kommt es im betrachteten Fall zu keinem Kontakt zwischen Fahrzeug und Tunnel-Pannenbuchtenstirnwand. Insbesondere sind hierbei massive Intrusionen in die Fahrgastzelle zu erwarten.

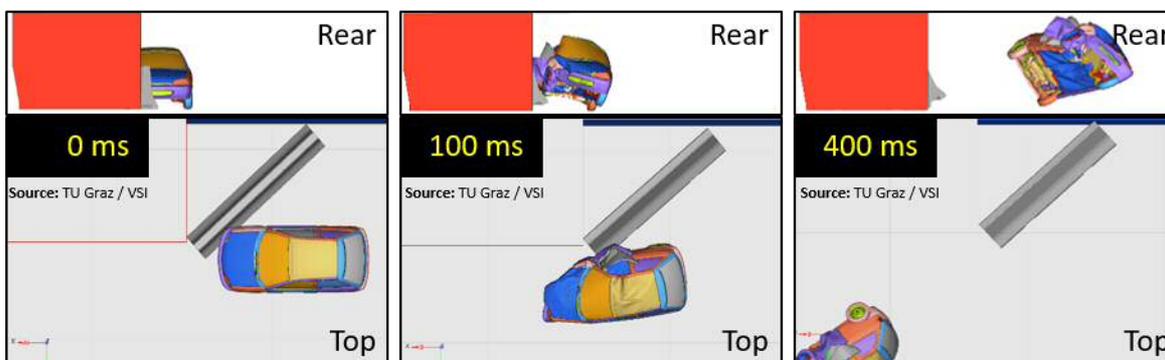


Abbildung 29: Simulationsergebnis Tunnel-Pannenbucht (TB11, Betonelement 4m, Small Overlap)

Ergebnisse

Frontalanprall an eine starre Wand

Zusätzlich zum Anprall an unterschiedliche FRS wurde für Vergleichszwecke ein Szenario für einen Frontalanprall an eine starre Wand ohne Absicherungsmaßnahme betrachtet. Hierbei ergibt sich für ein Fahrzeug der Klasse TB11 bei einem Anprallwinkel von 0° und voller Überdeckung ein ASI von 5,60 und ein THIV von 96,41 km/h.

4.1.2 Tunnelportal

Das Fahrzeug hebt ab und gleitet entlang des FRS. Vor Erreichen des letzten Betonleitwandelementes, welches als Absenkung ausgeführt ist, bewegt sich das Fahrzeug bereits wieder parallel zum FRS und wird anschließend wieder in Richtung Fahrbahn geleitet. Es kommt daher zu keinem Übertreten der Betonleitwände durch das Fahrzeug. In der dargestellten Situation in Abbildung 30 konnte ein Anprall des Fahrzeuges an das Tunnelportal verhindert werden. Bei einem Anprallwinkel von 25° ergeben sich ein ASI von 2,89 und ein THIV von 43,3 km/h.

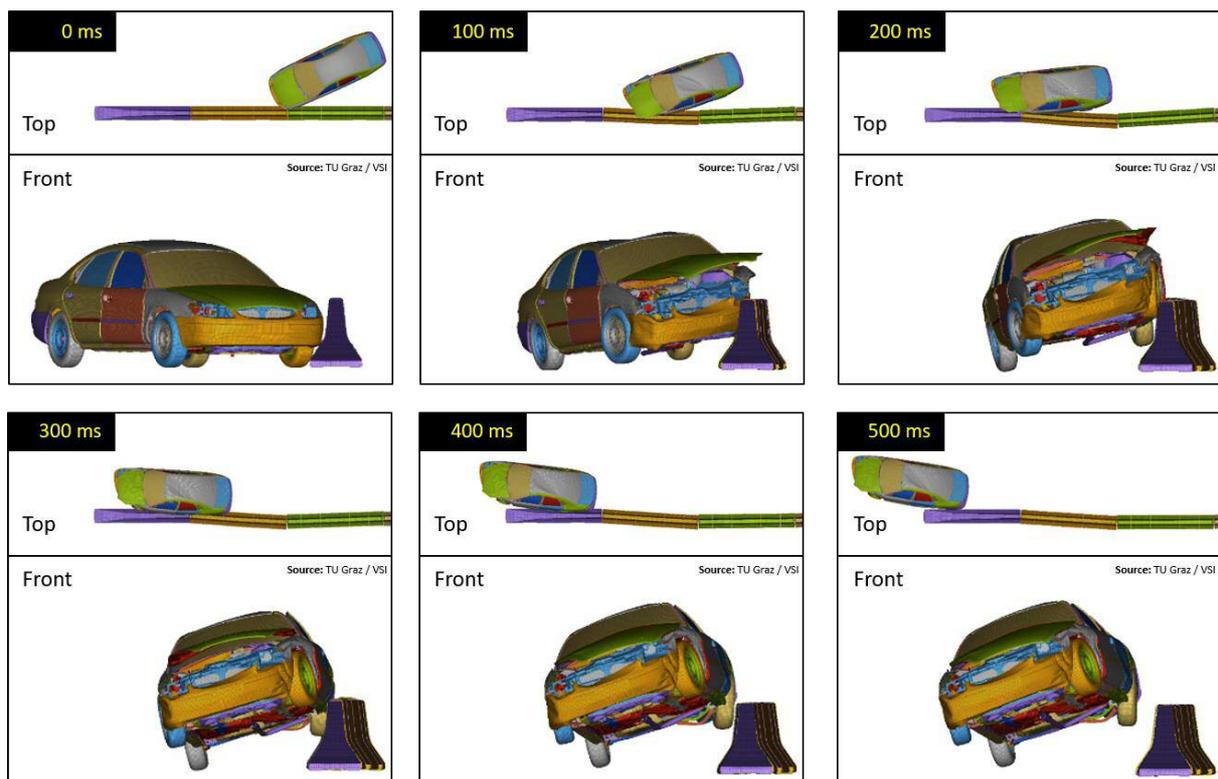


Abbildung 30: Simulationsergebnis Tunnelportal (TB32)

4.2 Versuch

Es wurden 5 Anprallversuche durchgeführt. Eine Zusammenfassung der Bewertungskriterien für den Erstanprall ist in Tabelle 4-2 zu finden. Als Erstanprall gilt in diesem Zusammenhang der erste Kontakt des Testfahrzeuges mit dem Prüfling (z.B. Betonleitwandelement bzw. Anpralldämpfer). Jeder weitere (Sekundär-)Anprall (z.B.: Aufkommen des Testfahrzeuges am Asphalt nach einer Flugphase, Anprall des Testfahrzeuges an Einrichtungen zur Begrenzung der Teststrecke, etc.) ist nicht Teil der Beurteilung und wurde daher nicht explizit nach den Bewertungskriterien ausgewertet. Eine detaillierte Zusammenfassung der Versuche ist im Testprotokoll im Anhang zu finden.

Tabelle 4-2: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Anprallversuchen

| Bewertungskriterium | Einheit | Betonelement | Betonelement | Anpralldämpfer | Anpralldämpfer | Tunnelportal |
|---------------------|---------|--------------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------|
| | | 4m | 8m | <Prototyp> | Alpina F1-50 | |
| v_0 | km/h | 101,12 | 100,84 | 101,98 | 102,27 | 101,40 |
| Anprallwinkel | ° | 46,4 | 22,2 | 0 ⁴ | 0 ⁴ | 25 |
| Δv | km/h | 42,7 | 11,9 | 101,98 | 102,27 | 17,77 |
| THIV ^{2,3} | km/h | 53,2 | 29,6 | 57,5 | 73,5 | 30,3 |
| ASI ^{2,3} | - | 2,9 | 1,6 | 1,8 | 3,3 | 1,6 |
| HIC | - | 1.197 ¹ | 100 | 1.028 ¹ | 2.330 ¹ | 564 |

¹ Direkter Kopfanprall an Fahrzeugbauteil

² Grenzwerte Anprallheftigkeit Stufe „B“ gemäß EN1317-2 (Fahrzeugrückhaltesysteme): ASI: 1,4 THIV: 33 km/h

³ Grenzwerte Anprallheftigkeit Stufe „B“ gemäß EN1317-3 (Anpralldämpfer): ASI: 1,4 THIV: 44 km/h

⁴ Abweichung zw. Planung und Realversuch (siehe Testmatrix in 3.4.6)

4.3 Bewertung der Absicherungsvarianten

4.3.1 Nutzwertanalyse

In Tabelle 4-3 ist die Nutzen-Analyse der fünf untersuchten Absicherungsmaßnahmen zusammengefasst. Nach dem Schulnotenprinzip würde das 4 m-Betonleitwandelement mit einem „Nicht Genügend“ durchfallen. Das 8 m-Betonleitwandelement würde ein Befriedigend bis Genügend erhalten. Der Alpina <Prototyps F1-80> würde nach der Bewertung eine Note zwischen Gut und Befriedigend (mit einer Tendenz eher zu Befriedigend) erreichen (2,67 – 3,08). Der Alpina F1-50 Anpralldämpfer wurde mit einem Befriedigend benotet (3,00 – 3,42). Allerdings sind hierbei die Werte des Alpina F1-50 für ASI und THIV deutlich über den Grenzwerten der EN 1317, als auch deutlich über jenen Werten des Alpina <Prototyps F1-80>. Obwohl natürlich auch der Insasse beim Anprall bestens geschützt sein sollte, stellt doch auch die Gefährdung Dritter einen wesentlichen Bewertungspunkt dar. Hierbei schneiden die Betonleitwandelemente deutlich schlechter ab, als es bei den Anpralldämpfern der Fall ist. Aus den Versuchen konnte festgestellt werden, dass es hier durchwegs zu einem Ableiten des Fahrzeugs beim Anprall auf die Fahrspuren des Tunnels kommt. Sofern es zu keiner Kollision mit dem Nachfolgeverkehr kommt, so prallt das Fahrzeug mit relativ hoher Geschwindigkeit gegen die linke Tunnelwand. Dahingehend werden die Bewertungen der Betonleitwandelemente wesentlich von der Nachkollisionskinematik negativ beeinflusst.

Die Verletzungskriterien sind bei allen untersuchten Absicherungsmaßnahmen über den geforderten Grenzwerten der EN 1317 mit der Anprallheftigkeitsstufe „B“. Beim ASI konnte für das 8 m-Betonleitwandelement und dem <Prototyps F1-80> ein Wert unter 1,9 festgestellt werden, sodass die Bewertung hierbei mit 3 ausfiel. Beim THIV war lediglich das 8 m-Betonleitwandelement und die Absicherung beim Tunnelportal durch ein FRS unter dem Grenzwert. Alle Werte, welche über dem Grenzwert lagen, wurden mit „Nicht Genügend“ bewertet, alle die unter dem Grenzwert lagen mit „Sehr Gut“. Eine Notengebung dazwischen war hierbei nicht vorgesehen.

Tabelle 4-3: Nutzen-Analyse der unterschiedlichen Absicherungsmaßnahmen

| | Kriterien | Gewichtung | Beton 4m | | Beton 8m | | Dämpfer "F1-50" | | Dämpfer "Prototyp F1-80" | | Portal | |
|---|--|------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------|---------------------|
| | | | Bewertung | Kriteriumsbewertung | Bewertung | Kriteriumsbewertung | Bewertung | Kriteriumsbewertung | Bewertung | Kriteriumsbewertung | Bewertung | Kriteriumsbewertung |
| Verletzungskriterien | ASI Primäranprall | 3 | 5 | 15 | 3 | 9 | 5 | 15 | 3 | 9 | 3 | 9 |
| | THIV Primäranprall | 3 | 5 | 15 | 1 | 3 | 5 | 15 | 5 | 15 | 1 | 3 |
| Intrusionen | Beschädigung der Fahrgastzelle / Intrusion in Fahrgastzelle | 2 | 5 | 10 | 3 | 6 | 3 | 6 | 2 | 4 | 3 | 6 |
| Schutzwirkung außerhalb Anwendungsbereich | Schutzwirkung bei schrägem Anprall an Stirnseite der Absicherungsmaßnahme | 1 | | | | | 3-5 | 3-5 | 5 | 3-5 | | |
| | Schutzwirkung bei seitlichem Anprall an die Absicherungsmaßnahme in Betonkeil | 2 | | | | | 3-5 | 6-10 | 5 | 6-10 | | |
| | Risiko Kollision mit Ecke Tunnel-Pannenbucht durch Abstand der Absicherungsvariante zur Tunnel-Pannenbuchtenstirnseite | 2 | | | | | 3-5 | 6-10 | 5 | 6-10 | 2 | 4 |
| Sekundäranprall | Durchbruch Element ¹ | 1 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| | Seitliches Verschieben Absicherungsmaßnahme beim Anprall und Anprall stirnseitige Tunnel-Pannenbuchtenwand | 1 | 5 | 5 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| | Kippen der Absicherung und begünstigen eines Anpralls an die stirnseitige Tunnel-Pannenbuchtenwand | 2 | 5 | 10 | 4 | 8 | | | | | | |
| Nachkollisionskinematik | Rückleitung auf Fahrbahn; Endlage des Fahrzeugs auf Fahrbahn | 2 | 5 | 10 | 5 | 10 | 1 | 2 | 1 | 2 | 5 | 10 |
| | Anprall gegenüberliegende (linke) Tunnelwand | 3 | 5 | 15 | 5 | 15 | 1 | 3 | 1 | 3 | 5 | 15 |
| | Risiko Verdrehen und schleudern Fahrzeug in die Fahrspur bei Offsetanprall (Verhaken) | 2 | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 | 3 | 6 |
| | Abheben des Fahrzeugs und dadurch Kollision mit Nachfolgeverkehr in der Flugphase | 2 | 5 | 10 | 5 | 10 | 1 | 2 | 1 | 2 | 5 | 10 |
| | Gesamtbewertung | | 4,95 | | 3,62 | | 3,00 - 3,42 | | 2,67 - 3,08 | | 3,24 | |

1) Ein Durchbruch beim Anpralldämpfer mit dem Fahrzeug TB11 konnte nicht festgestellt werden. Das Verhalten bei einem TB32 Versuch kann nicht beurteilt werden. Unter Umständen könnte dieses Fahrzeug die im Projekt geprüften Anpralldämpfer durchschlagen.

4.3.2 Nutzen-Kosten-Analyse

Da sich in den Ergebnissen bereits gezeigt hat, dass die Absicherung der Tunnel-Pannenbuchten durch 4 m-Betonleitwandelemente nicht zu empfehlen ist, wurden die Planfälle ohne diese Absicherungsmaßnahme berechnet. Die Planfälle wurden mit dem Anpralldämpfer <Prototyp F1-80> berechnet. Für das Tunnelportal wurde angenommen, dass hier Betonleitwandelemente aufgestellt werden können. Es wurde eine Mindestlänge von 24 m angenommen, was auch der Prüflänge beim Test entspricht (jedoch nicht der geprüften Mindestaufstelllänge entspricht).

Für die einzelnen Planfälle wurden Annahmen hinsichtlich der Anzahl und Art der abzusichernden Stellen getroffen, um aufzuzeigen, welche Nutzen/Kosten-Verhältnisse sich ergeben würden. Für eine detailliertere Betrachtung müssten die Daten für alle Tunnel vorliegen. Ebenso könnten in eine detailliertere Betrachtung auch die Anlagenverhältnisse einfließen.

Wie sich deutlich zeigt, ist das Nutzen/Kosten-Verhältnis abhängig von der Kombination an Absicherungsmaßnahmen (Tabelle 4-4 und Tabelle 4-5). Können Tunnel-Pannenbuchten oder Tunnelportale auch mit entsprechenden Betonleitwandelementen abgesichert werden, so steigt das Nutzen/Kosten-Verhältnis deutlich an. Setzt man das monetäre Reduktionspotential für einen schwer Verletzten an, so würde das Nutzen/Kosten-Verhältnis für die meisten Planfälle bereits über 1,0 liegen.

Tabelle 4-4: Nutzen-Kosten-Analyse unterschiedlicher Planfälle zur Absicherung von Tunnel-Pannenbuchten

| | Planfall 1 | Planfall 2 | Planfall 3 | Planfall 4 | Planfall 5 | Planfall 6 | Planfall 7 |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Betonelement 4 m | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Betonelement 8 m | 0 | 30 | 75 | 149 | 224 | 268 | 298 |
| Anpralldämpfer Prototyp F1-80 | 298 | 268 | 224 | 149 | 75 | 30 | 0 |
| | 298 |
| | | | | | | | |
| Kosten | Planfall 1 | Planfall 2 | Planfall 3 | Planfall 4 | Planfall 5 | Planfall 6 | Planfall 7 |
| Betonelement 4 m | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € |
| Betonelement 8 m | 0 € | 8 557 € | 21 392 € | 42 784 € | 64 176 € | 77 011 € | 85 568 € |
| Anpralldämpfer Prototyp F1-80 | 474 481 € | 427 033 € | 355 860 € | 237 240 € | 118 620 € | 47 448 € | 0 € |
| Summe der Kosten | 474 481 € | 435 589 € | 377 252 € | 280 024 € | 182 796 € | 124 459 € | 85 568 € |
| | | | | | | | |
| Nutzen | Planfall 1 | Planfall 2 | Planfall 3 | Planfall 4 | Planfall 5 | Planfall 6 | Planfall 7 |
| monetäres Reduktionspotential der Unfallkosten | 3 316 309 € | 3 316 309 € | 3 316 309 € | 3 316 309 € | 3 316 309 € | 3 316 309 € | 3 316 309 € |
| | | | | | | | |
| Nutzen/Kosten-Verhältnis | 7,0 | 7,6 | 8,8 | 11,8 | 18,1 | 26,6 | 38,8 |

Tabelle 4-5: Nutzen-Kosten-Analyse unterschiedlicher Planfälle zur Absicherung von Tunnelportalen

| | Planfall 1 | Planfall 2 | Planfall 3 | Planfall 4 | Planfall 5 | Planfall 6 | Planfall 7 |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Anpralldämpfer Prototyp F1-80 | 332 | 299 | 249 | 166 | 83 | 33 | 0 |
| Tunnelportal Betonleitwände | 0 | 33 | 83 | 166 | 249 | 299 | 332 |
| | 332 |
| Kosten | Planfall 1 | Planfall 2 | Planfall 3 | Planfall 4 | Planfall 5 | Planfall 6 | Planfall 7 |
| Anpralldämpfer Prototyp F1-80 | 528 616 € | 475 754 € | 396 462 € | 264 308 € | 132 154 € | 52 862 € | 0 € |
| Tunnelportal Betonleitwände | 0 € | 19 066 € | 47 665 € | 95 330 € | 142 995 € | 171 594 € | 190 661 € |
| Summe der Kosten | 528 616 € | 494 820 € | 444 127 € | 359 638 € | 275 149 € | 224 456 € | 190 661 € |
| Nutzen | Planfall 1 | Planfall 2 | Planfall 3 | Planfall 4 | Planfall 5 | Planfall 6 | Planfall 7 |
| monetäres Reduktionspotential der Unfallkosten | 3 316 309 € | 3 316 309 € | 3 316 309 € | 3 316 309 € | 3 316 309 € | 3 316 309 € | 3 316 309 € |
| Nutzen/Kosten-Verhältnis | 6,3 | 6,7 | 7,5 | 9,2 | 12,1 | 14,8 | 17,4 |

5 DISKUSSION

Im folgenden Kapitel werden die Erkenntnisse der untersuchten Absicherungsmaßnahmen gegenübergestellt.

5.1 Allgemeine Erkenntnisse von Realversuch und FE-Simulation

5.1.1 Betonleitelemente

Eine Beurteilung der Verkehrssicherheit unterschiedlicher Absicherungsmaßnahmen, welche lediglich auf je einem Realversuch basiert, kann nicht als belastbare Grundlage für weiterführende Aussagen verwendet werden. Durch die große Anzahl an Einflussparametern können Ergebnisse im Realversuch – unter Umständen – zufällig entstehen. Da im Versuch Parametervariationen mit hohem Aufwand verbunden sind, wurden zusätzlich FE-Simulationen der Absicherungsmaßnahmen durchgeführt. Es wurden unterschiedliche Parameter wie beispielsweise der Anprallwinkel, die Anprallstelle, etc. variiert, um hierbei Tendenzen ableiten zu können. So nimmt, nicht überraschend, etwa der ASI mit zunehmendem Anprallwinkel zu (Abbildung 31). Werden die Ergebnisse der Simulation den Versuchsergebnissen gegenübergestellt, so ist der ASI tendenziell höher als im Versuch. Bei einem Anprallwinkel von 45° wurden die Simulationsergebnisse interpoliert. Auch hier liegen diese über jenen des Versuchs.

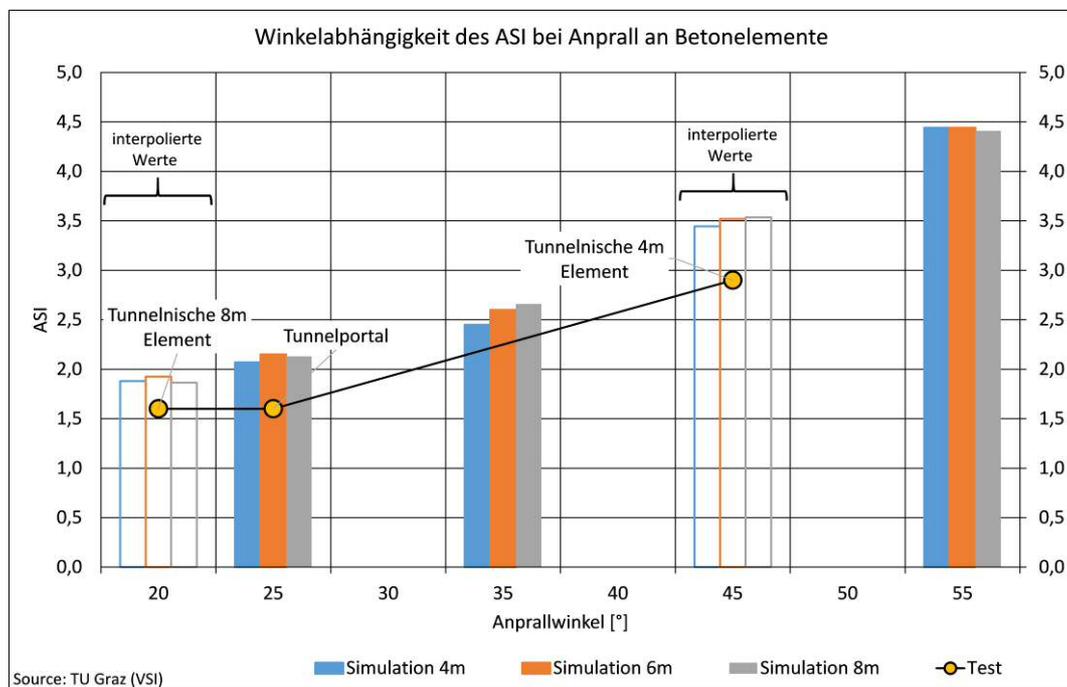


Abbildung 31: Vergleich der Ergebnisse von Versuch und Simulation am Beispiel der Winkelabhängigkeit des ASI beim Anprall an Betonleitwände

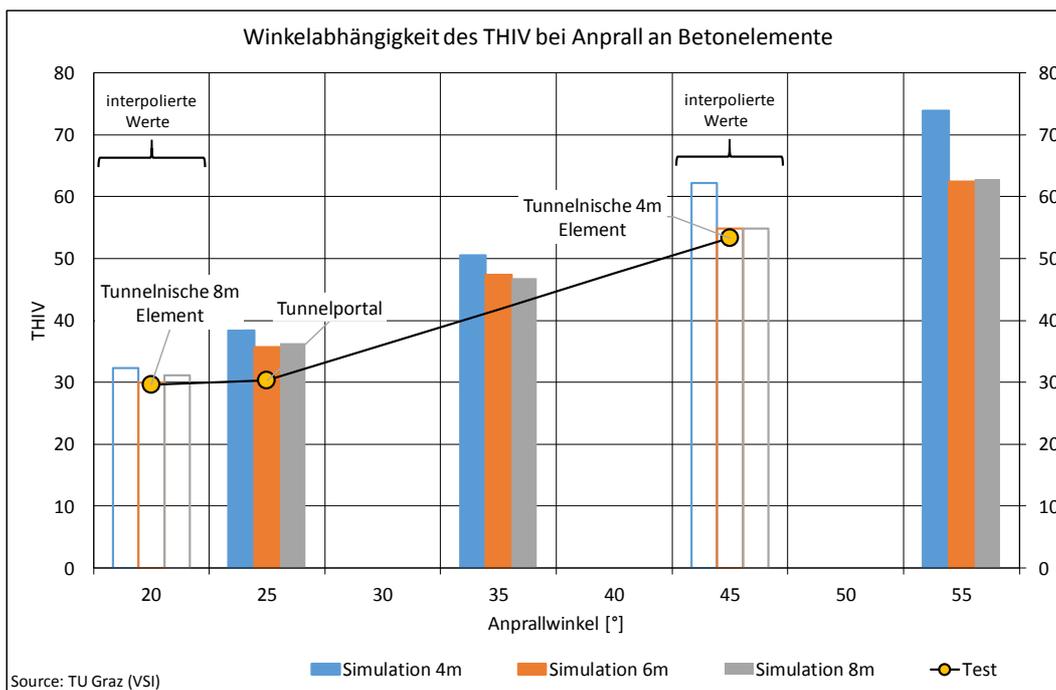


Abbildung 32: Vergleich der Ergebnisse von Versuch und Simulation am Beispiel der Winkelabhängigkeit des THIV beim Anprall an Betonleitwände

5.1.2 Vergleich der Einbaulängen der Absicherungsmaßnahmen

In Abbildung 33 und Abbildung 34 ist die Abhängigkeit des ASI als auch des THIV dargestellt. Hierbei wird klar ersichtlich, dass mit zunehmend zur Verfügung stehendem Bauraum die Werte deutlich geringer werden. Es kann aber auch abgelesen werden, dass bei nahezu gleichem notwendigen Bauraum für die konstruktive und sicherheitstechnische Auslegung ein großes Potenzial vorliegt. So wurde bei nahezu gleichem Bauraum beim Alpina <Prototyp F1-80> ein deutlich besseres Ergebnis beim ASI erzielt als beim Alpina F1-50. Ebenso konnte beim THIV eine Verbesserung von ca. 22% erreicht werden.

Diskussion

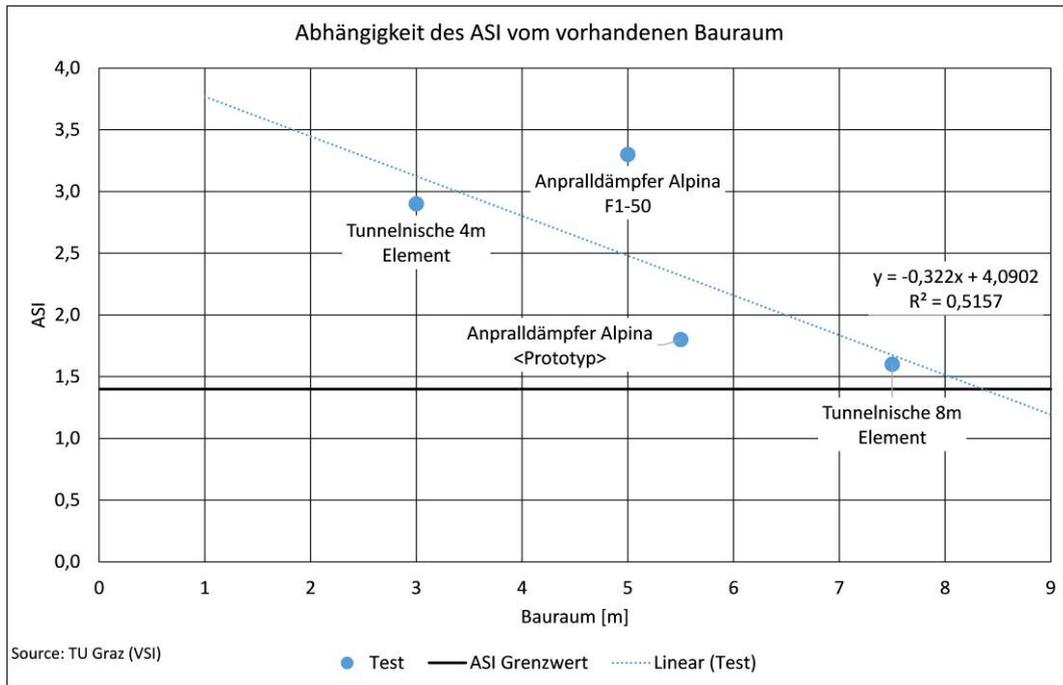


Abbildung 33: Abhängigkeit des ASI vom notwendigen Bauraums der Absicherungsmaßnahme

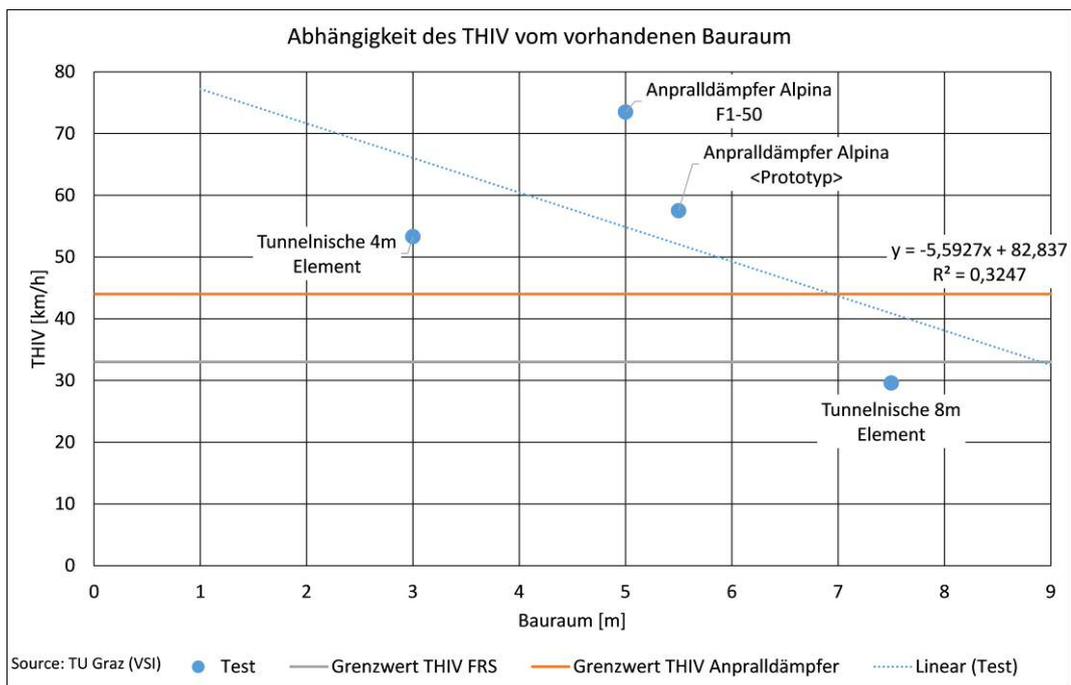


Abbildung 34: Abhängigkeit des THIV vom notwendigen Bauraums der Absicherungsmaßnahme

5.2 Tunnel-Pannenbucht

5.2.1 Betonleitwandelement 4 m

Nach dem Erstkontakt wurde das Fahrzeug in Richtung Fahrerseite und nach oben abgelenkt. Der Prüfling kippte um die Längsachse und stützte sich an der rückwärtigen Betonwand ab. Das Fahrzeug bewegte sich parallel zum Prüfling, hob ab, erreichte eine maximale Flughöhe von ca. 1,4 m und rollte um die Längsachse. Das Fahrzeug durchflog eine Strecke von ca. 14 m, touchierte die Teststreckenbegrenzung und kam hinter dieser auf dem Dach liegend zum Stillstand. Die Fahrzeugkinematik beim Anprall an das 4 m Betonleitwandelement ist in Abbildung 35 als zeitliche Abfolge dargestellt.

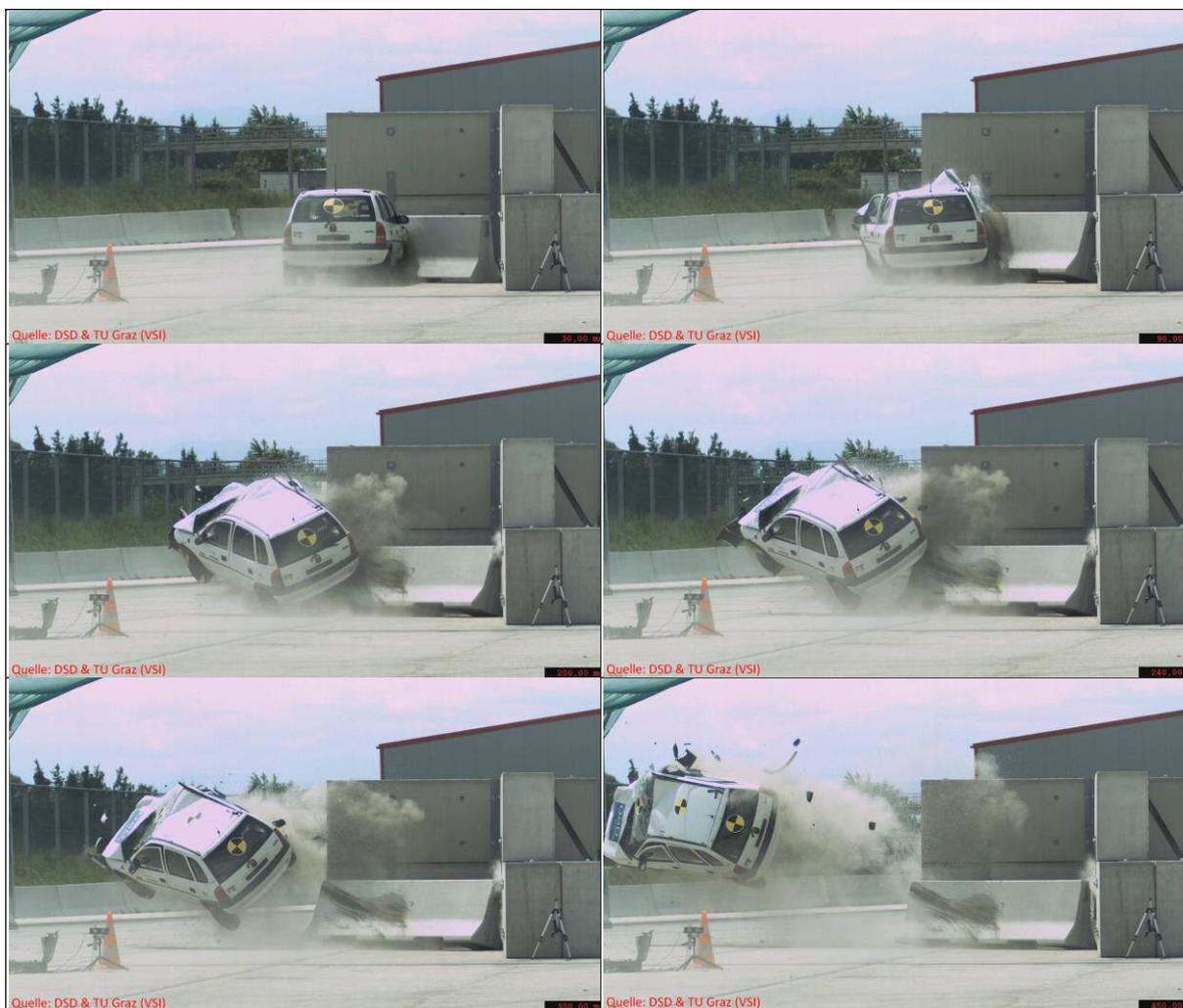


Abbildung 35: Fahrzeugkinematik beim Anprall an das Betonleitwandelement 4m

Bei der Absicherung der Tunnel-Pannenbucht mit einem 4 m langen Betonleitwandelement konnte bereits in der Simulation ein sehr hoher ASI Wert von fast 4,5 festgestellt werden. Dies bei einem Anprallwinkel von 55°, welcher theoretisch möglich wäre. Bei einem Anprallwinkel von 45° war der ASI nach wie vor außerhalb tolerierbarer Grenzen, wie es eine Anprallheftigkeitsstufe „B“ erlauben würde. Hierbei wurden die Werte allerdings interpoliert, was aber angesichts der festgestellten Tendenzen

plausibel erscheint. Im Versuch lag der ASI für diesen Anprallwinkel bei 2,9 und damit unter den Werten der Simulation. Allerdings ist auch hierbei der Grenzwert von 1,4 nach EN 1317 und einer Anprallheftigkeitsstufe „B“ weit überschritten. Der THIV im Versuch lag bei 53,2 km/h und damit auch hierbei deutlich über dem Grenzwert von 33 km/h.

Ebenso kann ein Bruch des Betonleitwandelements eine Kollision mit der stirnseitigen Tunnel-Pannenbuchtenwand hervorrufen. Ein Bruch des Elements ist von mehreren Faktoren, wie z.B. Fahrzeugmasse, Anprallgeschwindigkeit, Anprallpunkt und Anprallwinkel, abhängig. Sowohl in der Simulation als auch im Realversuch mit einem Fahrzeug der Klasse „TB11“ wurde ein Durchbruch des Betonleitwandelements nicht festgestellt.

Für den Fall, dass das Betonelement die Tunnel-Pannenbuchtenkante nicht überlappt, kann es bei einem Anprall an der äußeren (linken) Elementkante zu einem Verhaken des Fahrzeugs mit der Tunnel-Pannenbuchtenkante kommen. Dies führt in weiterer Folge zu einem Verdrehen des Fahrzeugs um die Hochachse, wodurch das Fahrzeug unkontrolliert zurück auf die Fahrbahn geschleudert wird. Für dieses Szenario ist mit tiefen Intrusionen in die Fahrgastzelle zu rechnen und eine Gefährdung des Nachfolgeverkehrs gegeben. Zum Verhalten von schwereren Fahrzeugen (z.B. „TB32“) kann keine Aussagen getätigt werden, da dies im Projekt nicht getestet bzw. simuliert wurde.

Wird das Fahrzeug vom Betonleitwandelement abgelenkt, hebt es in weiterer Folge ab (Flugweite ca. 14 m bei einer maximalen Flughöhe von ca. 1,4 m) und rollt dabei um die Längsachse. Dies führt zu einer unkontrollierten Bewegung des Fahrzeugs in die 1. oder 2. Fahrspur. Der Auslaufwinkel des Fahrzeugs entspricht dabei in etwa dem Aufstellwinkel des Betonelements. Diese Bewegung konnte sowohl im Realversuch als auch in der Simulation festgestellt werden. Eine Folge daraus ist, dass das Fahrzeug mit hoher Geschwindigkeit (kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung ca. 43 km/h) auf die Fahrbahn zurückkehrt und somit eine Gefahr für den Nachfolgeverkehr darstellt. Je nachdem wie der Nachfolgeverkehr auf das Ereignis reagieren kann und in welchem Abstand sich die nachfolgenden Fahrzeuge zum Ereignis befinden (abhängig vom Verkehrsaufkommen zum Zeitpunkt des Unfalls) kann eine Kollision des Nachfolgeverkehrs mit dem Fahrzeug nicht ausgeschlossen werden. Weiter ist eine Kollision des Fahrzeugs mit der gegenüberliegenden (linken) Tunnelwand möglich. Die Anprallgeschwindigkeit an der linken Tunnelwand würde ca. 60 km/h betragen, abgeleitet aus den Versuchsdaten. Der Insasse befindet sich zu diesem Zeitpunkt in einer, bedingt durch den Erstanprall, nicht optimalen Sitzposition. Rückhaltesysteme wie z.B. Sicherheitsgurt oder Airbag, welcher unter Umständen bereits beim Erstanprall ausgelöst wurden, können nicht mehr die optimale Sicherheitswirkung ausüben.

Die Gesamtbewertung des 4 m langen Betonleitwandelements ergab nach der gewichteten Kriteriumsbeurteilung eine Schulnote von 4,95 und ist somit nicht geeignet, einen ausreichenden Schutz der Insassen, aber auch unbeteiligter Dritter zu gewährleisten.

5.2.2 Betonleitwandelement 8 m

Nach dem Erstkontakt wurde das Fahrzeug in Richtung Fahrerseite und nach oben abgelenkt. Das Fahrzeug bewegte sich parallel zum Prüfling und hob ab. Das Fahrzeug erreichte eine Flughöhe von ca. 0,5 m, wobei das Fahrzeug um die Querachse rotierte und dadurch das Heck eine maximale Höhe von ca. einem Meter erreichte. Insgesamt wurden vom Fahrzeug ca. vier Fahrzeuglängen durchflogen. Danach touchierte das Fahrzeug die Teststreckenbegrenzung und kam zum Stillstand. Die Fahrzeugkinematik beim Anprall an das 8 m Betonleitwandelement ist in Abbildung 36 als zeitliche Abfolge dargestellt.

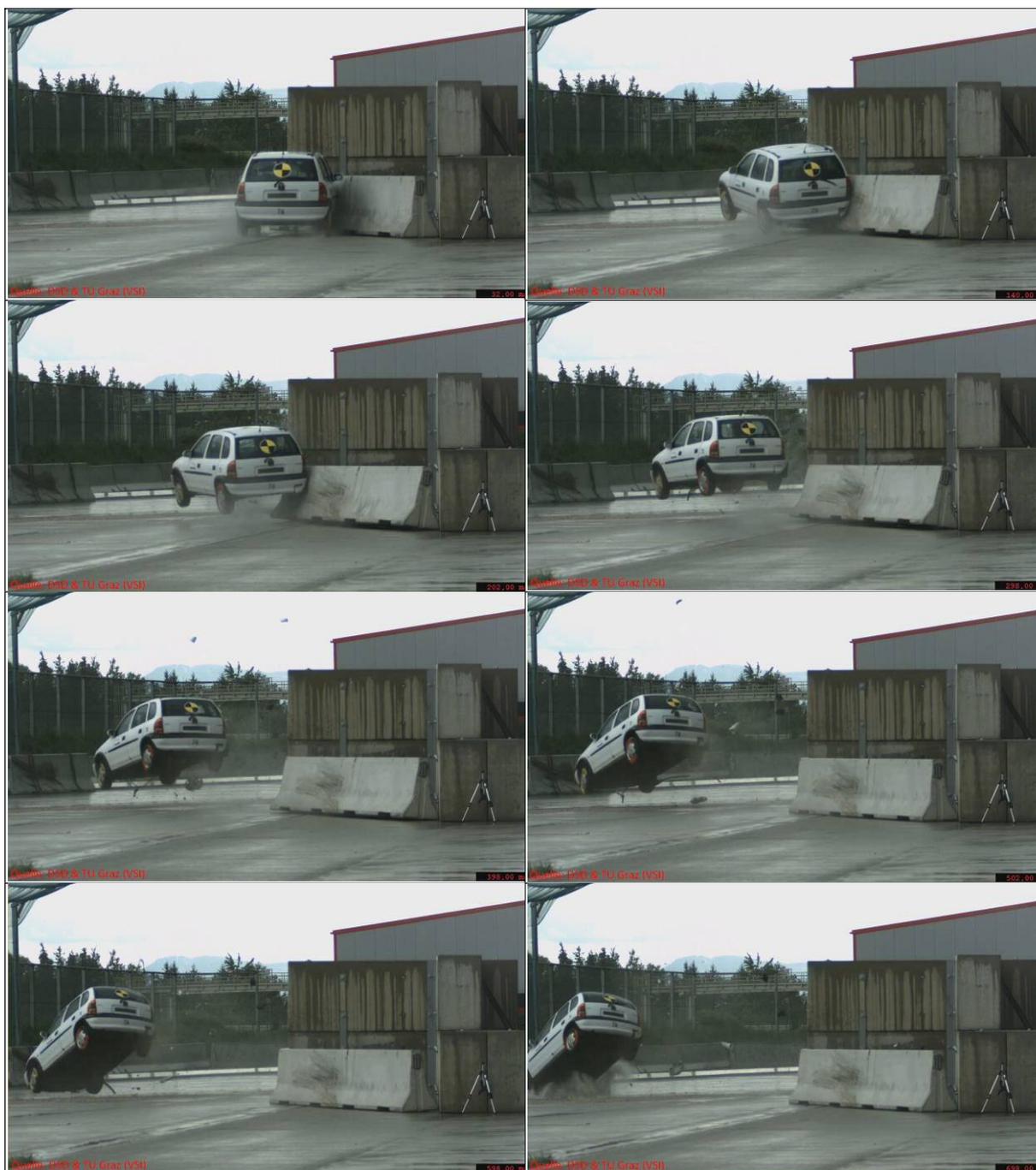


Abbildung 36: Fahrzeugkinematik beim Anprall an das Betonleitwandelement 8m

Hinsichtlich der Anprallkonfiguration wurde in der Simulation für unterschiedliche Anprallpunkte (mittig, außermittig, ...) kein signifikanter Unterschied im ASI und THIV festzustellen. Ausschlaggebend für einen Unterschied dieser beiden Werte ist der Anprallwinkel. Ein zunehmender Anprallwinkel wirkt sich negativ auf den ASI und THIV aus. Selbst bei einem Anprallwinkel von 20° liegt der tolerierbare Wert des ASI über 1,4. Der THIV (ca. 30 km/h) würde für diesen Anprallwinkel jedoch unter dem maximal zulässigen Wert von 33 km/h liegen. Aus den Versuchen heraus ist bei einem Anprallwinkel von 20° und 25° der THIV durchwegs unter 33 km/h. Der ASI überschreitet in den Versuchen mit 1,6 jedoch den Grenzwert von 1,4 für eine Anprallheftigkeitsstufe „B“.

Solange es zu keiner Teilüberdeckung, d.h. Offsetanprall an das Betonleitwandelement kommt und somit zu keinem Verhaken mit der Kante der Tunnel-Pannenbuchtenmauer führt, sind die Insassenbelastungen bezogen auf ein 4 m langes Betonleitwandelement zwar deutlich niedriger, jedoch nach wie vor über dem Grenzwert von 1,4 beim ASI. Der Grenzwert für den THIV wird in den Versuchen unterschritten.

Wie bereits bei dem 4 m langen Betonleitwandelement konnte im Realversuch und in der Simulation ein Kippen des Betonleitwandelements und ein Berühren zwischen Betonelement und Tunnel-Pannenbuchtenstirnwand festgestellt werden. Diese Kippneigung kann ein Aufsteigen des Fahrzeugs und somit eine Kollision mit der stirnseitigen Tunnel-Pannenbuchtenwand begünstigen.

Es wurde in der Simulation als auch im Realversuch mit dem Fahrzeug der Klasse „TB11“ kein Bruch des Betonleitwandelements festgestellt. In Realsituationen kann das Betonleitwandelement bei einer ungünstigen Anprallsituation (mittiger Anprall, großer Anprallwinkel, schwereres Fahrzeug) durchbrochen werden und eine Kollision mit der stirnseitigen Tunnel-Pannenbuchtenwand ist dadurch gegeben.

Wird das Betonleitwandelement nicht optimal in der Tunnel-Pannenbucht positioniert, sodass das Betonleitwandelement die Tunnel-Pannenbuchtenkante nicht überragt, ist ein Offset-Anprall des Fahrzeugs möglich. Dies führt zu massiven Intrusion in die Fahrgastzelle und kann zu schwersten Verletzungen führen.

Nach dem Anprall wird das Fahrzeug vom Betonleitwandelement abgelenkt und hebt in weiterer Folge ab. Der Luftstand des Fahrzeugs war allerdings mit ca. 0,5 m bzw. ca. einem Meter des Hecks deutlich geringer als beim 4 m Betonleitwandelement. Der Auslaufwinkel des Fahrzeugs entspricht dabei in etwa dem Aufstellwinkel des Betonleitwandelements. Diese Bewegung konnte sowohl im Realversuch als auch in der Simulation festgestellt werden. Das Fahrzeug bewegt sich nach dem Anprall unkontrolliert in die 1. oder 2. Fahrspur. Der Geschwindigkeitsabbau durch die Kollision ist relativ gering (kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung ca. 12 km/h). Das Fahrzeug kommt daher mit relativ hoher

Geschwindigkeit auf die Fahrbahn zurück, welche deutlich höher als bei dem 4 m langen Betonleitwandelement ist. Die Anprallgeschwindigkeit bei einer Kollision des Fahrzeugs mit der gegenüberliegenden (linken) Tunnelwand würde ca. 85 km/h betragen. Der Insasse befindet sich zu diesem Zeitpunkt in einer Out-of-Position-Sitzposition und ist nicht mehr optimal geschützt.

Das 8 m lange Betonleitwandelement erreichte in der Gesamtbewertung eine Schulnote von 3,62, was besser ist als das Ergebnis der Bewertung des 4 m lange Betonleitwandelements.

5.2.3 Anpralldämpfer „Alpina F1-50“

Die Bewertung der Anpralldämpfer erfolgte nur auf Grund von Versuchen. Es wurden keine Simulationen durchgeführt.

Der Aufstellwinkel des Anpralldämpfers wurde auf Grund von Realunfallanalysen festgelegt. Der Anpralldämpfer wurde in einem Winkel von 5° zur Fahrbahn positioniert. Damit erfolgt der Anprall (optimal) frontal auf den Anpralldämpfer und es ergibt sich ein Anprallwinkel von 0°.

Das Fahrzeug wird nach dem Anprall vollständig verzögert und erfährt nach der Deformation des Anpralldämpfers eine elastische Restitution, sodass das Fahrzeug gegen die ursprüngliche Fahrtrichtung zurückgeleitet wird. Das Fahrzeug wird dabei allerdings nicht in die Fahrbahn geleitet und kommt ca. 0,4 m vor dem deformierten Anpralldämpfer zum Stillstand. Der Anpralldämpfer und der abstützende Betonkeil wurden durch den Anprall gegen die Tunnel-Pannenbucht geschoben. Durch den Abstand des Betonkeils zur Tunnel-Pannenbuchtenstirnwand besteht die Möglichkeit, dass ein Fahrzeug diese Lücke trifft. Die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einer derartigen Situation kommt, erscheint eher gering, wurde nicht untersucht und kann hier nicht angegeben werden. Welche Schutzwirkung der Anpralldämpfer bei einem seitlichen Anprall des Fahrzeugs an den Anpralldämpfer hat, kann nicht bewertet werden. Hier kann es u.U. zu einem Verhaken und somit zu einem Verdrehen des Fahrzeugs mit einem Zurückgleiten auf die Fahrbahn und damit Gefährdung des Nachfolgeverkehrs kommen.

Das Fahrzeug wird bis zur Vorderachse beschädigt, die Vorderräder werden gegen die Radkästen geschoben. Es zeigen sich Verformungen des Dachträgers.

Die Fahrzeugkinematik beim Anprall an den Anpralldämpfer F1-50 ist in Abbildung 37 als zeitliche Abfolge dargestellt.

Diskussion



Abbildung 37: Fahrzeugkinematik beim Anprall an den Anpralldämpfer „Alpina F1-50“

Es wurde ein ASI von 3,3 und ein THIV von 73,5 km/h festgestellt. Beide Werte liegen deutlich über den Grenzwerten der EN 1317.

Da nur eine Anprallkonfiguration untersucht wurde, können zu folgenden Faktoren keine Aussagen getroffen werden:

- Schutzwirkung bei schrägem, stirnseitigem Anprall
- Schutzwirkung bei einem Offsetanprall, wobei das Fahrzeug den Anpralldämpfer in einer Weise überdeckt, dass nur beispielsweise 50% der Fahrzeugbreite den Anpralldämpfer überdecken.
- Schutzwirkung bei einem Fahrzeuganprall an die Seite des Anpralldämpfers

Der „Alpina F1-50“-Anpralldämpfer erreichte eine Schulnote zwischen 3,00 und 3,42 in der Gesamtbewertung.

5.2.4 Anpralldämpfer „Alpina Prototyp F1-80“

Analog zum Anpralldämpfer „Alpina F1-50“ wurde der „Alpina Prototyp F1-80“ positioniert und getestet.

Auch bei diesem Anpralldämpfer wird das Fahrzeug gegen die Fahrtrichtung ca. 0,6 m zurückgeleitet. Das Fahrzeug wird nicht in die Fahrbahn geleitet. Der Betonkeil mit dem Anpralldämpfer wird gegen die Tunnel-Pannenbuchtenstirnseite geschoben. Die Beschädigung des Fahrzeugs reicht bis zur Vorderachse. Es sind keine Intrusionen in die Fahrgastzelle festzustellen. Die Fahrzeugkinematik beim Anprall ist in Abbildung 38 als zeitliche Abfolge dargestellt.

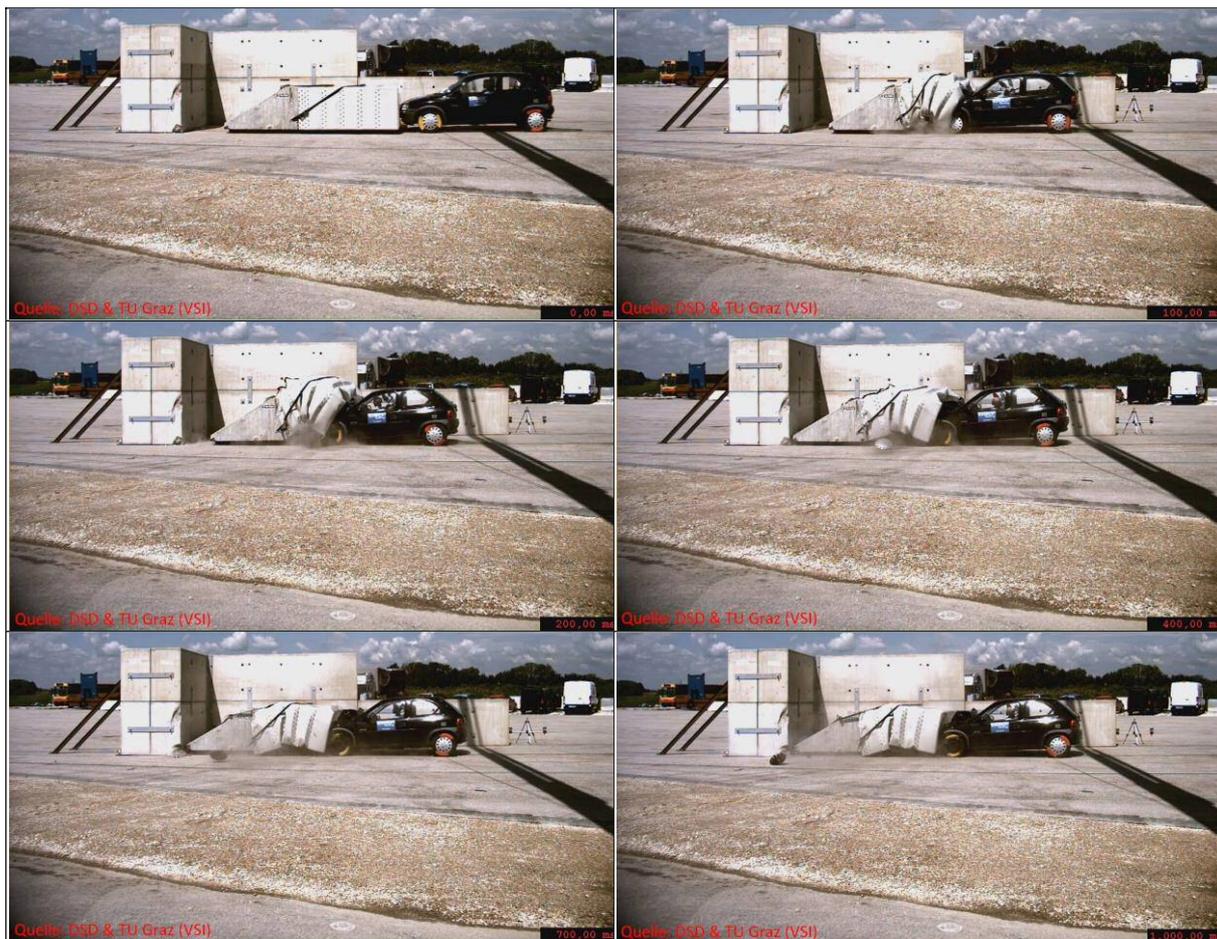


Abbildung 38: Fahrzeugkinematik beim Anprall an den Anpralldämpfer „Alpina Prototyp F1-80“

Der ASI ist mit 1,8 und der THIV mit 57,5 km/h deutlich niedriger als beim „Alpina F1-50“. Ebenfalls schneidet der Prototyp im Vergleich zum 4 m langen Betonleitwandelement deutlich besser ab. Im Vergleich mit dem 8 m langen Betonleitwandelement ist der ASI in einer ähnlichen Größenordnung. Der THIV ist noch deutlich höher als beim 8 m Betonleitwandelement. Allerdings ist der Grenzwert für Anpralldämpfer nach EN 1317-3 bei 44 km/h, für Betonleitwände liegt dieser nach EN 1317-2 bei

33 km/h. Im Gegensatz zu den Betonleitwandelementen besteht hierbei (entsprechend den Versuchen) keine Gefährdung des Nachfolgeverkehrs, noch wird das abprallende Fahrzeug gegen die linke Tunnelwand geschleudert. Zu folgenden Punkten kann keine Aussage getroffen werden:

- Schutzwirkung bei schrägem stirnseitigem Anprall
- Schutzwirkung bei einem Offsetanprall, wobei das Fahrzeug den Anpralldämpfer in einer Weise überdeckt, dass nur beispielsweise 50% der Fahrzeugbreite den Anpralldämpfer überdecken.
- Schutzwirkung bei einem Fahrzeuganprall an die Seite des Anpralldämpfers

In der Gesamtbewertung schnitt der „Alpina Prototyp F1-80“-Anpralldämpfer am besten ab und erreichte eine Schulnote zwischen 2,67 und 3,08.

5.3 Tunnelportal

Bei dieser Anprallkonfiguration werden die nicht verankerten Betonleitwandelemente seitlich verschoben. Das Fahrzeug hebt ab (maximale Flughöhe ca. 0,6 m) und wird in Fahrtrichtung abgelenkt. Ein Anprall an der gegenüberliegenden Tunnelwand ist, bedingt durch den relativ geringen Geschwindigkeitsabbau (ca. 18 km/h) beim Primäranprall, möglich. Ein Sekundäranprall an die stirnseitige Tunnelwand konnte im Versuch (knapp) vermieden werden. Jedoch ist ein Anprall an die stirnseitige Tunnelwand im Realunfallgeschehen nicht auszuschließen, sofern das FRS ähnlich montiert wird, wie es im Versuch der Fall war, da geringfügige Änderungen der Anprallkonfiguration, wie beispielsweise des Anprallwinkels, eine andere Auslaufbewegung bewirken können. Durch die mögliche Endposition des Fahrzeuges auf der 1. oder 2. Fahrspur im Anfangsbereich des Tunnels kann es zudem zu einer Kollision mit dem Nachfolgeverkehr kommen. Insbesondere erschweren Licht-/Schatteneffekte bei der Einfahrt in den Tunnel möglicherweise eine rechtzeitige Reaktion des Nachfolgeverkehrs.

Die Fahrzeugkinematik beim Anprall an die Betonleitwandelemente beim Portal ist in Abbildung 39 als zeitliche Abfolge dargestellt.

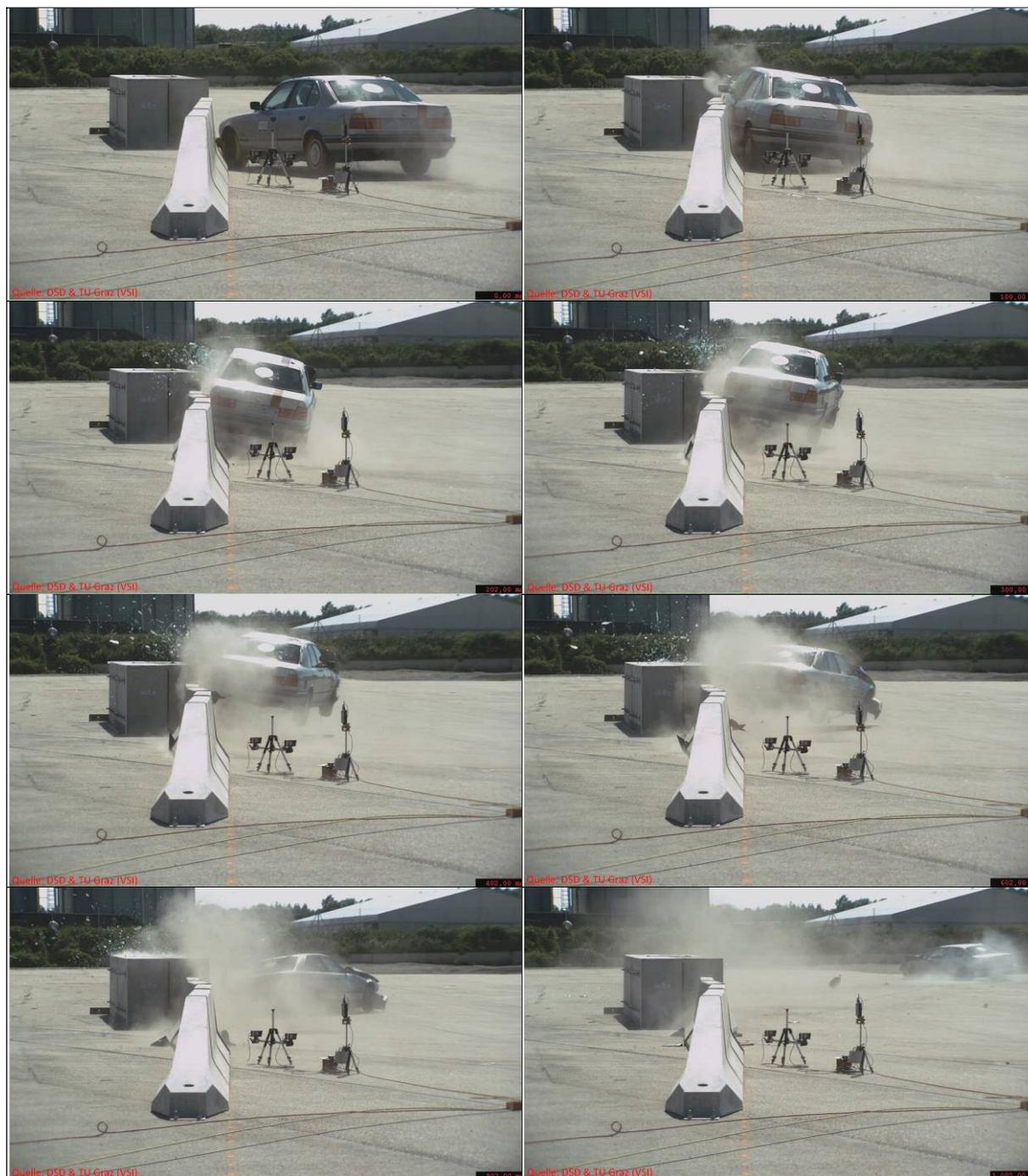


Abbildung 39: Fahrzeugkinematik beim Anprall an Betonleitelemente vor einem Tunnelportal

Hinsichtlich der Bewertungskriterien nach EN 1317-2 ergab sich ein Wert für den ASI von 1,6 und für den THIV ein Wert von 30,3 km/h. Der Anprallpunkt wurde am Übergang vom zweiten zum dritten Betonleitelement gewählt. Das erste Betonleitwandelement (Anrampung) wurde im Boden verankert. Am gewählten Anprallpunkt scheint es nachvollziehbar, dass das System hier noch steifer ist, als es an einem Anprallpunkt weiter weg von der Verankerung der Fall sein würde.

Die Betonleitwandelemente vor dem Tunnelportal ergeben eine Gesamtbewertung von 3,24 nach dem Schulnotensystem.

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Es wurden fünf unterschiedliche Absicherungsmaßnahmen für die Tunnel-Pannenbucht und das Tunnelportal untersucht. Am derzeitigen Stand erfüllt keine der untersuchten Absicherungsmaßnahmen alle Bewertungskriterien optimal.

Die Absicherung der Tunnel-Pannenbucht mit einem 4 m langen Betonleitwandelement ist nicht zu empfehlen. Beim Anprall kann es zum Aufsteigen des Fahrzeugs und einer Sekundärkollision mit der Tunnel-Pannenbuchtenstirnwand kommen. Erfolgt kein Anprall an die Tunnel-Pannenbuchtenstirnwand, so wird das Fahrzeug entsprechend dem Aufstellwinkel des Betonleitwandelements auf die Fahrbahn zurückgeleitet und hat hierbei einen mehr oder weniger hohen Flugstand. In den Versuchen wurde eine Flughöhe von ca. 1,4 m festgestellt, wobei sich das Fahrzeug während der Flugphase um seine Längsachse dreht. Auf Grund des relativ geringen Geschwindigkeitsabbaus durch den Primäranprall kommt das Fahrzeug daher mit einer hohen Geschwindigkeit zurück auf die Fahrbahn. Kommt es zu keiner Kollision mit dem Nachfolgeverkehr, prallt das Fahrzeug gegen die linke Tunnelwand. Bei diesem Anprall befinden sich die Insassen in einer sogenannten Out-of-Position. D.h. die Insassen werden von den Rückhaltesystemen des Fahrzeugs wie beispielsweise dem Gurt, Airbag, etc. nicht mehr optimal geschützt. In der Gesamtbewertung schneidet das 4 m Betonleitwandelement mit 4,95 am schlechtesten ab.

Obwohl beim 8 m Betonleitwandelement die Kriterien zur Insassensicherheit (ASI und THIV) deutlich besser sind als beim 4 m Betonleitwandelement, besteht beim 8 m Betonleitwandelement ebenfalls eine hohe Gefährdung Dritter, durch die Rückleitung des Fahrzeugs in die Fahrspur. In beiden Fällen (4 m und 8 m Betonleitwandelement) würden sich die Endlagen der Fahrzeuge auf der ersten oder zweiten Fahrspur befinden. Jedoch ist beim 8 m Betonleitwandelement die Bewertung mit 3,62 deutlich besser als jene beim 4 m Betonleitwandelement.

Von den Anpralldämpfern zeigte der Alpina <Prototyp F1-80> hinsichtlich einer Gesamtbewertung die besten Werte (2,67 – 3,08). Der Anpralldämpfer F1-50 schneidet mit einer Bewertung von 3,00 – 3,42 schlechter ab als der Alpina <Prototyp F1-80>, ist aber noch etwas besser als das 8 m Betonleitwandelement. Nachteilige Parameter für beide Anpralldämpfertypen betreffen die Bewertungskriterien ASI und THIV, welche nicht unter den nach EN 1317 geforderten Grenzwerten liegen. Nachteilig bei beiden getesteten Anpralldämpfern wirkt sich der Freiraum zwischen Anpralldämpfer und Tunnel-Pannenbuchtenstirnwand aus, da hier ein Fahrzeug, ohne Schutzwirkung, gegen die Tunnel-Pannenbuchtenstirnwand prallen kann. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines solchen Szenarios erscheint eher gering und wurde nicht untersucht, jedoch wären hierbei Verbesserungen sinnvoll.

Werden bei der Bewertung der einzelnen Absicherungsmaßnahmen lediglich die Beurteilungskriterien und hierbei die in der EN 1317 definierten Werte ASI und THIV herangezogen, so ergibt sich eine andere Reihenfolge, als dass mit den definierten Bewertungskriterien der Fall ist.

Bei einer Marktzulassung und damit einer allfälligen Einsatzfreigabe durch das BMVIT, ist auch ein stirnseitiger Anprall unter einem Winkel von 15° nach EN 1317-3, sowohl für eine Leistungsstufe 80 als auch 100, obligatorisch. Bei dem gegenständlichen Anpralldämpfer Alpina <Prototyp F1-80> handelt es sich um ein nicht rückleitendes System. Somit entfällt nach EN 1317-3 ein Anprall unter einem Winkel von 15° bzw. 165° Grad an die Seite des Anpralldämpfers. Aus Sicht der Verkehrssicherheit wären Untersuchungen zu diesen Anprallkonfigurationen wünschenswert, sind allerdings in der Norm nicht zwingend vorgeschrieben.

7 AUSBLICK

Die gegenständlichen Absicherungsmaßnahmen wurden umfassend untersucht, jedoch konnten nicht alle möglichen Anprallszenarien untersucht werden. Da die Gesamtbewertung für den Anpralldämpfer die besten Ergebnisse lieferte beziehen sich die derzeit noch fehlenden Kenntnisse nur auf den Anpralldämpfer:

- Frontalanprall mit einem Offset des Fahrzeugs, sodass das Fahrzeug mit ca. 25% der Fahrzeugbreite an den Dämpfer prallt.
- Frontalanprall unter einem bestimmten Anprallwinkel.
- Für die Versuche nach EN 1317-3 sind Fahrzeuge nach entsprechenden Gewichtsklassen vorgeschrieben. Allerdings beziehen sich die Anforderungen nicht auf die sicherheitstechnische Ausstattung, d.h. die dafür verwendeten Fahrzeuge müssen nicht mit beispielsweise Airbags ausgestattet sein. Ein sicherheitstechnisches Abschneiden derzeitiger (neuerer) Fahrzeuge mit serienmäßiger Ausstattung von Airbag, Gurtstraffern, etc. sollte untersucht werden.

1. REFERENCES

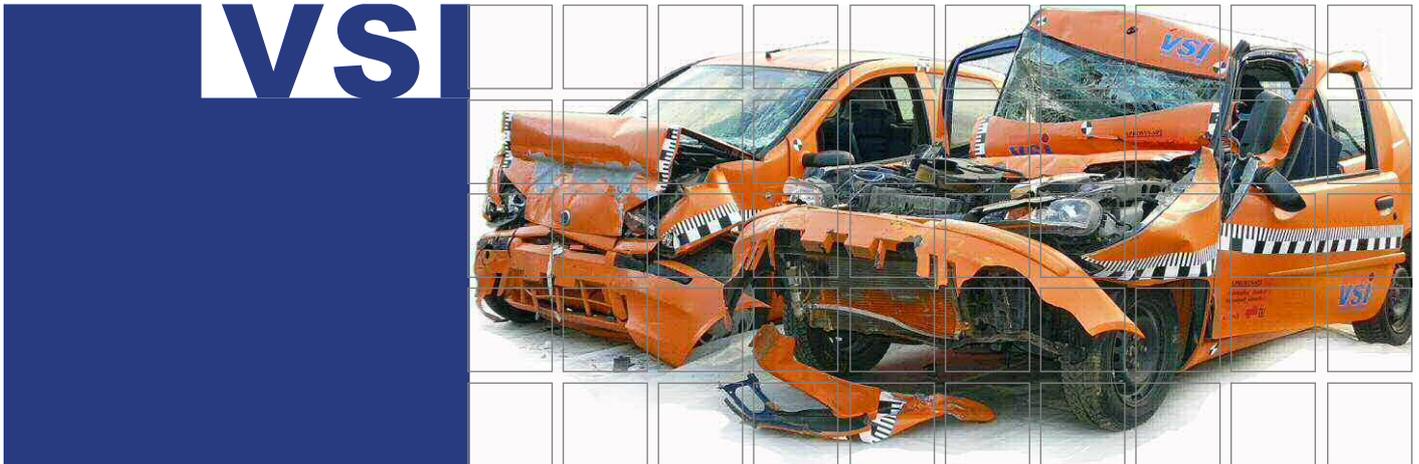
- [1] B. Strnad and S. Schmied, "Bericht über Brände und Unfälle in Tunnelanlagen: Bericht gemäß § 3 Abs. 8 STSG beziehungsweise EU-Direktive 2004/54/EG," Wien, Nov. 2018. [Online] Available: https://www.bmvit.gv.at/verkehr/strasse/tunnel/downloads/tunnelbericht1999_2017.pdf.
- [2] Statistik Austria, "Straßenverkehrsunfälle Jahresergebnisse 2018: Straßenverkehrsunfälle mit Personenschaden," Wien, 2019.
- [3] RVS 09.01.24 *Bauliche Anlagen für Betrieb und Sicherheit*, 2014.
- [4] RVS 09.01.25 *Vorportalbereich*, 2015.
- [5] RVS 05.02.31 *Anforderung und Aufstellung*, 2007.
- [6] Comité technique 3.3 Exploitation des tunnels routiers / Technical Committee 3.3 Road Tunnel Operation, Ed., "y of publications » Lay bys and protection against lateral obstacles [...] Lay bys and protection against lateral obstacles - Current practices in Europe," PIARC 2016R16EN, 2016.
- [7] C. Polidori, P. DiMascio, G. Cantisani, and M. Petrelli, "ECORoads: Guidelines and Recommendations," Deliverable D6.2, 2017. Accessed on: Dec. 05 2018.
- [8] EN 1317-3: *Road restraint systems — Part 3: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for crash cushions*, 2011.
- [9] H. Hoschopf and E. Tomasch, "Single Vehicle Accidents, Incidence and Avoidance," in *3rd International Conference on ESAR "Expert Symposium on Accident Research"*, Hanover, Germany, 2008.
- [10] A. Burgett and K. Gunderson, "Crash Prevention Boundary for Road Departure Crashes – Derivation," 2001. Accessed on: Apr. 19 2016.
- [11] P. Martin, A. Burgett, and G. Srinivasan, "Characterization of a Single-Vehicle Road Departure Avoidance Maneuver," in *The 18th ESV Conference Proceedings*, Nagoya, Japan, 2003.
- [12] M. Lerner and A. Hegewald, "Sicherheitwirkung eingefräster Rüttelstreifen entlang der BAB A 24," *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, vol. 2009, no. Heft V 177, <http://bast.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2011/125/pdf/V177.pdf>, 2009.
- [13] U. Ewert, "Übermüdung im Strassenverkehr," Apr. 2003. Accessed on: Apr. 19 2016.
- [14] D. Anselm and W. Hell, "Einschlafen am Steuer - Eine häufig unterschätzte Unfallursache," *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, vol. 2002, no. 40, 2002.
- [15] S. Rothe, "Fahrerwarnsystem - Einschlafwarner," 1995.
- [16] S. McLaughlin, J. Hankey, S. Klauer, and T. Dingus, "Contributing Factors to Run-Off-Road Crashes and Near-Crashes," Report No. DOT HS 811 079, 2009.
- [17] E. Tomasch *et al.*, *SANFTLEBEN - Sicherheitsbeurteilung der Anfangselemente von Leitschienen und Betonleitwänden - Endbericht*, 2010.

- [18] E. Tomasch *et al.*, “Required length of guardrails before hazards,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 43, no. 6, pp. 2112–2120, 2011.
- [19] E. Tomasch *et al.*, “Single vehicle run-off-road accidents colliding turned down terminals of guardrails,” in *International Conference “ESAR - Expert Symposium on Accident Research”*, 2010, n-n.
- [20] E. Tomasch, H. Hoschopf, W. Sinz, and B. Strnad, “Method to Optimise the Position of Rumble Strips on the Hard Shoulder to Avoid Run-off-road Accidents and Unnecessary Noise Pollution,” *Transportation Research Procedia*, vol. 14, pp. 3849–3858, 2016.
- [21] E. Tomasch, H. Hoschopf, Stefan Ch., and R. Stütz, “Requirements of a safety zone width for run-off-road accidents to prevent severe injuries when impacting hazardous objects,” in *1st European Road Infrastructure Congress (ERIC)*, Leeds, UK, 2016.
- [22] Association for the Advancement of Automotive Medicine, “Abbreviated Injury Scale 2005 Update 2008,” Barrington, IL, US, Oct. 2008. Accessed on: Oct. 05 2017.
- [23] *EN 1317-2: Road restraint systems — Part 2: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers including vehicle parapets*, 2011.
- [24] *EN 1317-1: Road restraint systems — Part 1: Terminology and general criteria for test methods*, 2010.
- [25] E. Tomasch and H. Steffan, “ZEDATU - Zentrale Datenbank tödlicher Unfälle in Österreich - A Central Database of Fatalities in Austria,” in *2nd International Conference on ESAR “Expert Symposium on Accident Research”*, Hanover, Germany, 2006.
- [26] E. Tomasch, H. Steffan, and M. Darok, “Retrospective accident investigation using information from court,” in *Transport Research Arena Europe 2008 (TRA)*, Ljubljana, 2008.
- [27] *prEN 16303:2018: Rückhaltesysteme an Straßen - Validierungs- und Nachweisverfahren für die Nutzung von Computersimulationen bei Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesysteme*, 2018.
- [28] *The George Washington University | Washington, D.C.* [Online] Available: <https://www.gwu.edu/>. Accessed on: Sep. 06 2018.
- [29] Norwegian Public Roads Administration/ Force Technology Norway AS, “ROBUST PROJECT: WP5 - Computational Mechanics. Evaluation of small car vehicle model - GM_R2: MAIN REPORT Volume 1 of 1,” Doc. No.: ROBUST-5-005/TR-2004-0107 - Rev. 0, 2006.
- [30] Department of Aerospace engineering - Politecnico di Milano, “ROBUST PROJECT: WP5 - Computational Mechanics Geo-Metro Finite Element model (GM_R3): Improvements of Steering System and Suspensions: MAIN REPORT Volume 1 of 1,” Doc. No.: ROBUST-05-006 - Rev. 0, 2005.

-
- [31] *EN 12767: Passive safety of support structures for road equipment — Requirements and test methods*, 2008.
- [32] *RVS 02.01.22 Nutzen-Kosten-Untersuchungen im Verkehrswesen*, 2010.
- [33] A. Schedl, "Tunnel im österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz," Graz, Apr. 23 2012.
- [34] N. Sedlacek, I. Steinacher, B. Mayer, and A. Aschenbrenner, "Unfallkostenrechnung Straße 2017," Wien, Forschungsarbeiten des österreichischen Verkehrssicherheitsfond Band 065, Dec. 2017. [Online] Available: https://www.bmvit.gv.at/verkehr/strasse/sicherheit/fonds/vsf/downloads/65_unfallkosten.pdf. Accessed on: Mar. 01 2018.

APPENDIX

A.1 Testprotokoll Anfahrversuche



Testprotokoll

Beurteilung der Effizienz derzeit eingesetzter
Absicherungsmaßnahmen von Tunnelnischen und –portalen
beim PKW-Anprall

August 2017

TESTPROTOKOLL

| | | |
|-------------------|------------------|---------|
| Acronym: | BENCHMARK | |
| Project Ref: | FFG-Nr.: 854613 | |
| Client: | ASFINAG / BMVIT | |
| Project Partners: | DSD | |
| Date: | 14.08.2017 | |
| Pages: | 55 | |
| Confidentiality: | External | |
| Version: | Final | |
| Keywords: | - | |
| Abstract: | - | |
| Approvals: | Project Manager: | Tomasch |
| | Reviewer: | - |

The information contained herein is the property of the Vehicle Safety Institute – Graz University of Technology and does not necessarily reflect the views or policies of the [Client] for whom this report was prepared. Whilst every effort has been made to ensure that the matter presented in this report is relevant, accurate and up-to-date, Vehicle Safety Institute at Graz University of Technology cannot accept any liability for any error or omission, or reliance on part or all of the content in another context.

INHALT

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | EINLEITUNG | 7 |
| <hr/> | | |
| 1.1 | Testmatrix | 7 |
| 1.2 | Messtechnik / Sensoren | 8 |
| 1.2.1 | Verwendete Sensoren | 8 |
| 1.2.2 | Einbausituation der Sensoren im Fahrzeug | 8 |
| 1.2.3 | Positionierung des Dummies im Fahrzeug | 9 |
| 2 | TEST „BMV17001“ | 10 |
| <hr/> | | |
| 2.1 | Allgemein | 10 |
| 2.2 | Vorbereitung | 11 |
| 2.2.1 | Fotodokumentation vor dem Test | 11 |
| 2.3 | Ergebnisse | 12 |
| 2.3.1 | Beschreibung des Testverlaufes | 12 |
| 2.3.2 | Fotodokumentation nach dem Test | 14 |
| 2.3.3 | Berechnung von Bewertungskriterien | 17 |
| 3 | TEST „BMV17002“ | 18 |
| <hr/> | | |
| 3.1 | Allgemein | 18 |
| 3.2 | Vorbereitung | 19 |
| 3.2.1 | Fotodokumentation vor dem Test | 19 |
| 3.3 | Ergebnisse | 21 |
| 3.3.1 | Beschreibung des Testverlaufes | 21 |
| 3.3.2 | Fotodokumentation nach dem Test | 22 |
| 3.3.3 | Berechnung von Bewertungskriterien | 25 |
| 4 | TEST „BMV17003“ | 27 |
| <hr/> | | |
| 4.1 | Allgemein | 27 |
| 4.2 | Vorbereitung | 28 |
| 4.2.1 | Fotodokumentation vor dem Test | 28 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3 Ergebnisse | 30 |
| 4.3.1 Beschreibung des Testverlaufes | 30 |
| 4.3.2 Fotodokumentation nach dem Test | 31 |
| 4.3.3 Berechnung von Bewertungskriterien | 34 |
| | |
| 5 TEST „BMV17004“ | 36 |
| <hr/> | |
| 5.1 Allgemein | 36 |
| 5.2 Vorbereitung | 37 |
| 5.2.1 Fotodokumentation vor dem Test | 37 |
| 5.3 Ergebnisse | 39 |
| 5.3.1 Beschreibung des Testverlaufes | 39 |
| 5.3.2 Fotodokumentation nach dem Test | 40 |
| 5.3.3 Berechnung von Bewertungskriterien | 45 |
| | |
| 6 TEST „BMV17005“ | 46 |
| <hr/> | |
| 6.1 Allgemein | 46 |
| 6.2 Vorbereitung | 47 |
| 6.2.1 Fotodokumentation vor dem Test | 47 |
| 6.3 Ergebnisse | 49 |
| 6.3.1 Beschreibung des Testverlaufes | 49 |
| 6.3.2 Fotodokumentation nach dem Test | 51 |
| 6.3.3 Berechnung von Bewertungskriterien | 54 |

1 EINLEITUNG

1.1 Testmatrix

Es wurden fünf Anprallversuche durchgeführt. In der Tunnelnische wurden zwei Betonelemente (4m bzw. 8m) sowie zwei Anpralldämpfer (ALPINA F1-50 bzw. ALPINA <Neu>) getestet. Am Tunnelportal wurde ein Betonleitwandelement bestehend aus vier Betonleitelementen, sowie je einem abgesenkten und verankerten Endstück getestet. Die Fahrzeuge entsprachen den Kriterien für Anprallprüfungen nach EN 1317-2. Für alle Tests wurde, abweichend von EN 1317-2, eine Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h gewählt. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die wichtigsten Testparameter.

Tabelle 1: Testmatrix

| # | Ort* | Fahrzeug | Geschwindigkeit [km/h] | Prüfling | Anprallpunkt | Aufstellwinkel (Barriere) [°] | Abkommenswinkel (Fahrzeug) [°] | Anprallseite** | Verankerung |
|----------|------|----------|------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------|--|
| BMV17001 | N | TB11 | 100 | Beton 4m „REBLOC H2“ | mittig | 42 | 5 | B | - |
| BMV17002 | N | TB11 | 100 | Beton 4m „REBLOC H2“ | mittig | 18 | 5 | B | - |
| BMV17003 | N | TB11 | 100 | Anpralldämpfer „ALPINA F1-50“ | mittig | 0 | 5 | B | lt. Hersteller |
| BMV17004 | N | TB11 | 100 | Anpralldämpfer „ALPINA <Neu>“ | mittig | 0 | 5 | B | lt. Hersteller |
| BMV17005 | P | TB32 | 100 | 6 x Beton 4m „DELTABLOC H2“ | zw. 2. u. 3. Element | 5 | 20 | F | 1. u. 6. Element sind verankerte Absenker |

* N ... Tunnelnische, P... Tunnelportal

** F ... Fahrerseite, B ... Beifahrerseite

1.2 Messtechnik / Sensoren

1.2.1 Verwendete Sensoren

Tabelle 2: Verwendete Sensoren

| Messgröße | Hersteller | Type | Ser.Nr.: | Datenkanal | Range |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------|----------|------------------|---------|
| Drehrate | IES Elektronik-entwicklung | 3103 Triax-Gyro | IF23 | 10TUNNCGRE00AAX0 | 2400°/s |
| Beschleunigung (COG) | Advanced Sensors Calibration | ASC 5411LN-100-6A-12L | 15-12474 | 10TUNNCG0000ACX0 | 100g |
| Beschleunigung (COG Front) | Measurement Specialities | 1203-0500-10-240X | A030635 | 10TUNNCGFR00ACX0 | 500g |
| Beschleunigung (COG Rear) | Measurement Specialities | 1203-0500-10-240X | A030636 | 10TUNNCGRE00ACX0 | 500g |
| Beschleunigung (Dummy head) | FGP-FA | 3109 | 3917 | 11HEAD0000H3ACX0 | 250g |
| Beschleunigung (Dummy head)* | Advanced Sensors Calibration | ASC 5411LN-100-6A-12L | 15-12476 | 11HEAD0000H3ACX0 | 100g |

*Für Test „BMV17005“ wurde an der Position „Beschleunigung (Dummy head)“ ein anderer Sensor verwendet, da Dummy „#056“ (DSD, Sensor-Nr. 3917) bei Test „BMV17004“ beschädigt wurde und somit für Test „BMV17005“ durch Dummy „#397“ (TU Graz, Sensor-Nr. 15-12476) ersetzt wurde.

1.2.2 Einbausituation der Sensoren im Fahrzeug

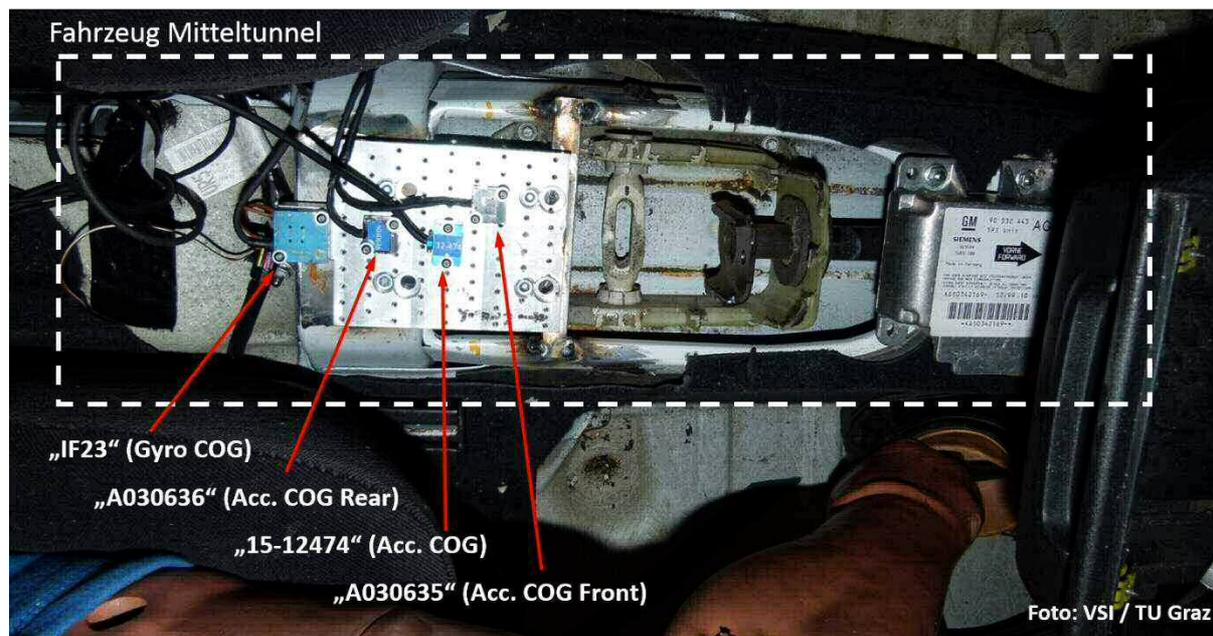


Abbildung 1: Einbausituation der Sensoren im Fahrzeug

1.2.3 Positionierung des Dummies im Fahrzeug

Der Dummy wurde bei allen Tests am Fahrersitz positioniert und der Sicherheitsgurt wurde angelegt. Die Hände des Dummies wurden auf den Oberschenkeln abgelegt. In Abbildung 2 ist die Position des Dummies im Testfahrzeug am Beispiel „BMV17001“ dargestellt.



Abbildung 2: Positionierung des Crashtest-Dummies im Fahrzeug

2 TEST „BMV17001“

2.1 Allgemein

In Test „BMV17001“ wurde der Anprall eines Fahrzeuges an ein schräg aufgestelltes Betonleitelement in einer Tunnelnische nachgestellt. Die Tunnelnische bzw. -wand wurde im Versuch aus massiven Betonblöcken nachgebildet. Das Betonleitelement wurde direkt an die Tunnelnische bzw. -wand herangeschoben. Die wichtigsten Testparameter sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Eine Skizze der Anprallsituation ist in Abbildung 3 dargestellt.

Tabelle 3: Geplante Testkonfiguration „BMV17001“

| | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| Test-Nr. | BMV17001 |
| Datum | 15.05.2017 |
| Anprallsituation | Tunnelnische |
| Fahrzeug | TB11 (900 kg) |
| Anprallgeschwindigkeit | 100 km/h |
| Prüfling | Betonleitelement 4m „REBLOC H2“ |
| Anprallpunkt | mittig |
| Aufstellwinkel | 42° |
| Abkommenswinkel | 5° |
| Anprallseite Fahrzeug | Beifahrer |
| Verankerung | keine |

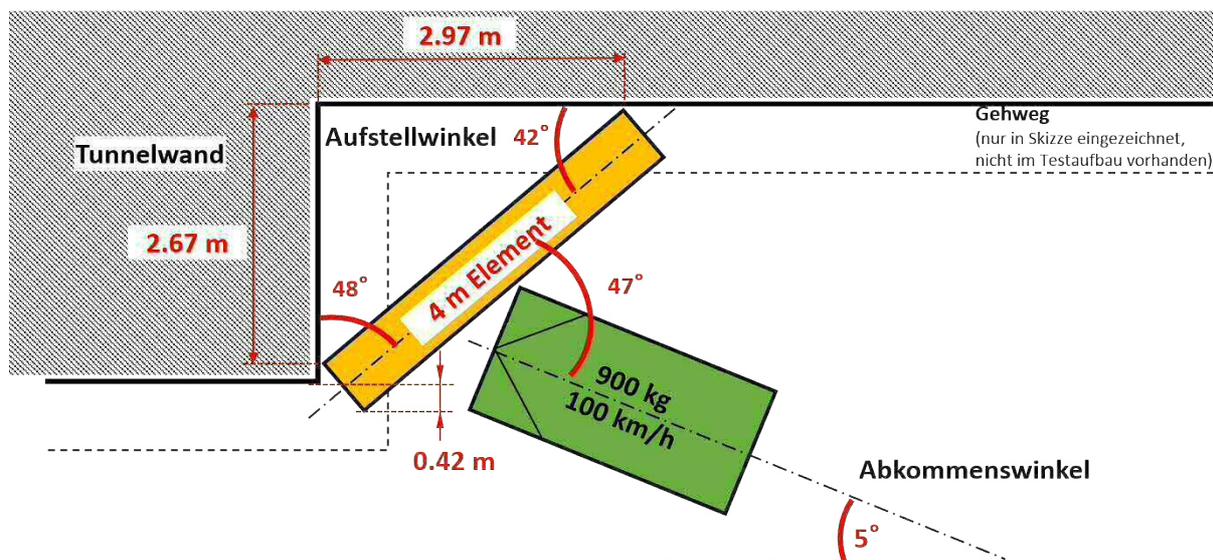


Abbildung 3: Geplante Testsituation "BMV17001"

2.2 Vorbereitung

2.2.1 Fotodokumentation vor dem Test



Abbildung 4: Fahrzeug "BMV17001"



Abbildung 5: Anprallsituation Überblick "BMV17001"



Abbildung 6: Anprallsituation Detail "BMV17001"

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Beschreibung des Testverlaufes

Nach dem Erstkontakt (siehe Abbildung 7) wurde das Fahrzeug in Richtung Fahrerseite und nach oben abgelenkt. Der Prüfling kippte um die Längsachse und stützte sich an der rückwärtigen Betonwand ab. Das Fahrzeug bewegte sich parallel zum Prüfling, hob ab, erreichte eine maximale Flughöhe von ca. 1,4 m und rollte um die Längsachse. Das Fahrzeug durchflog eine Strecke von ca. 14 m, touchierte die Teststreckenbegrenzung und kam hinter dieser auf dem Dach liegend zum Stillstand. Eine Auswertung des Videomaterials ist in Abbildung 8 und Abbildung 9 ersichtlich.

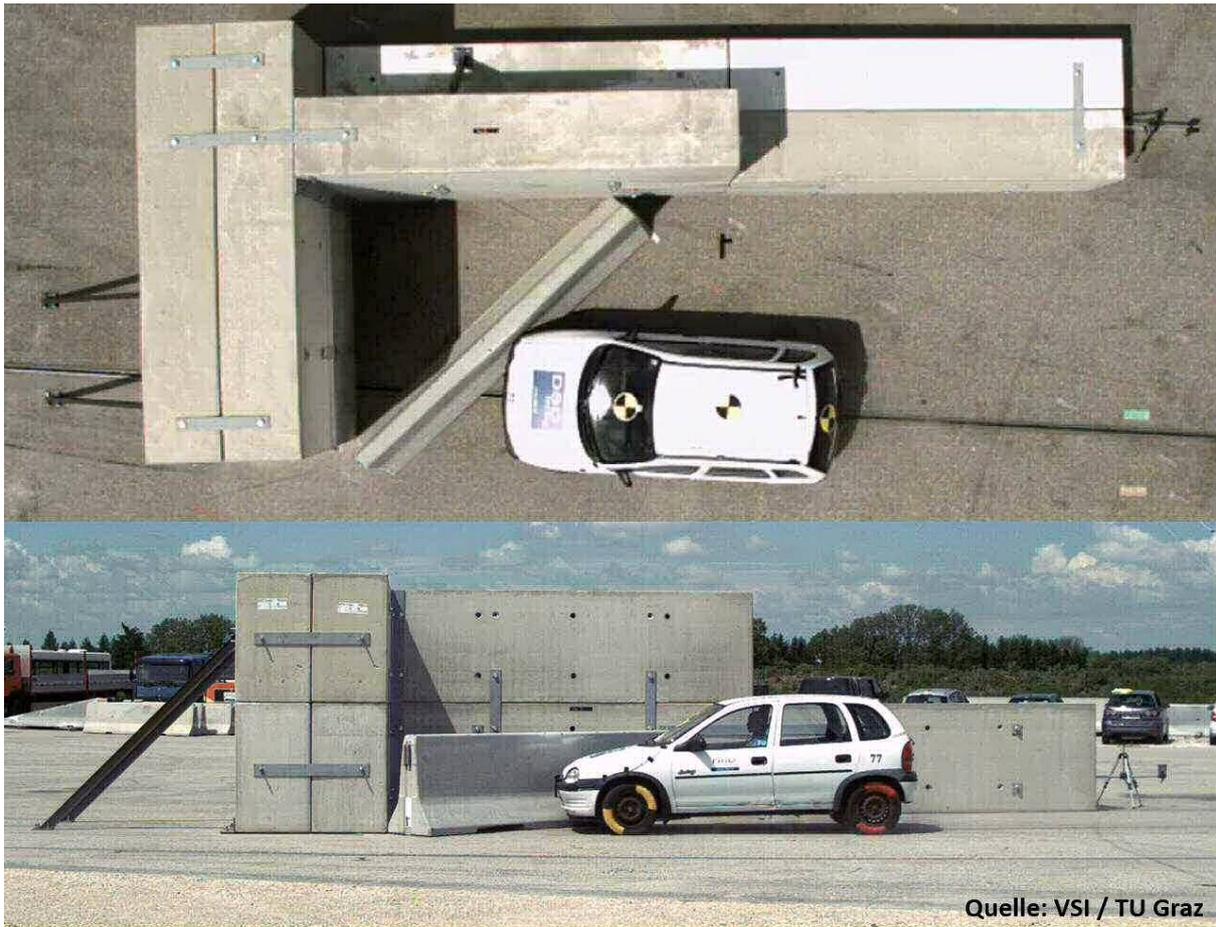


Abbildung 7: Erstkontakt "BMV17001"

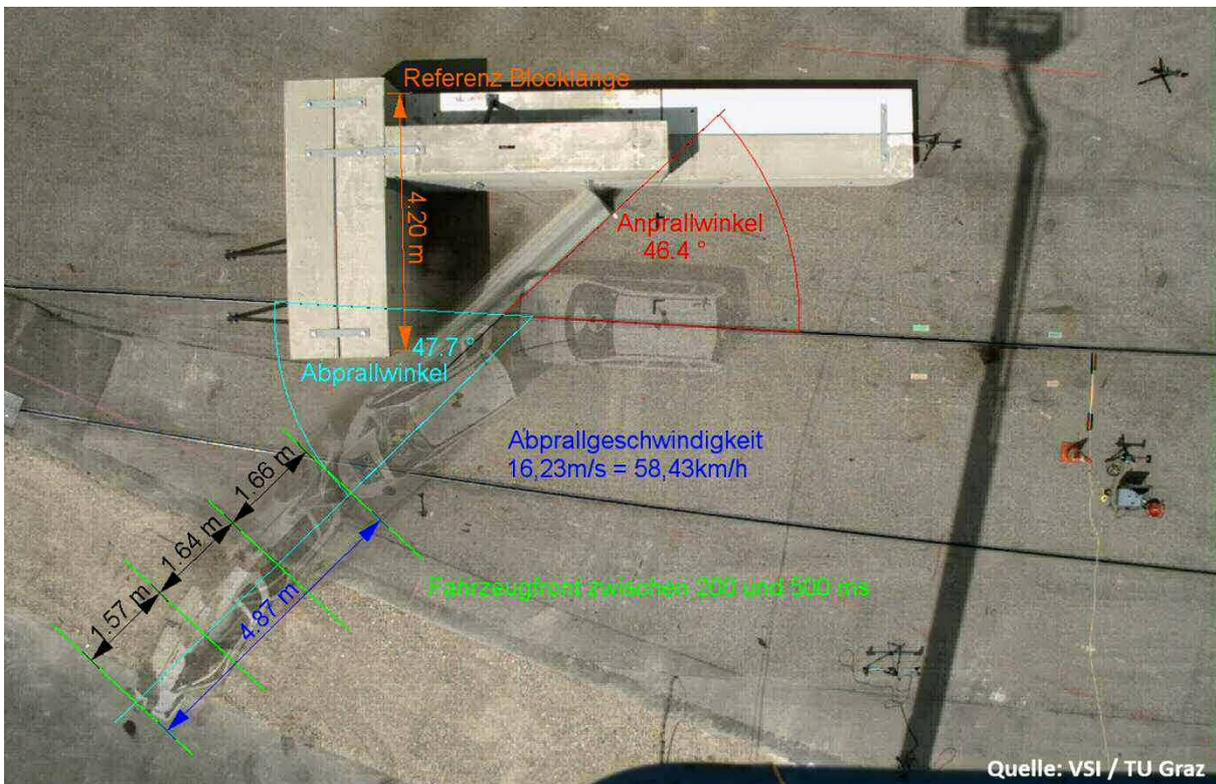


Abbildung 8: Videoanalyse Überblick "BMV17001"

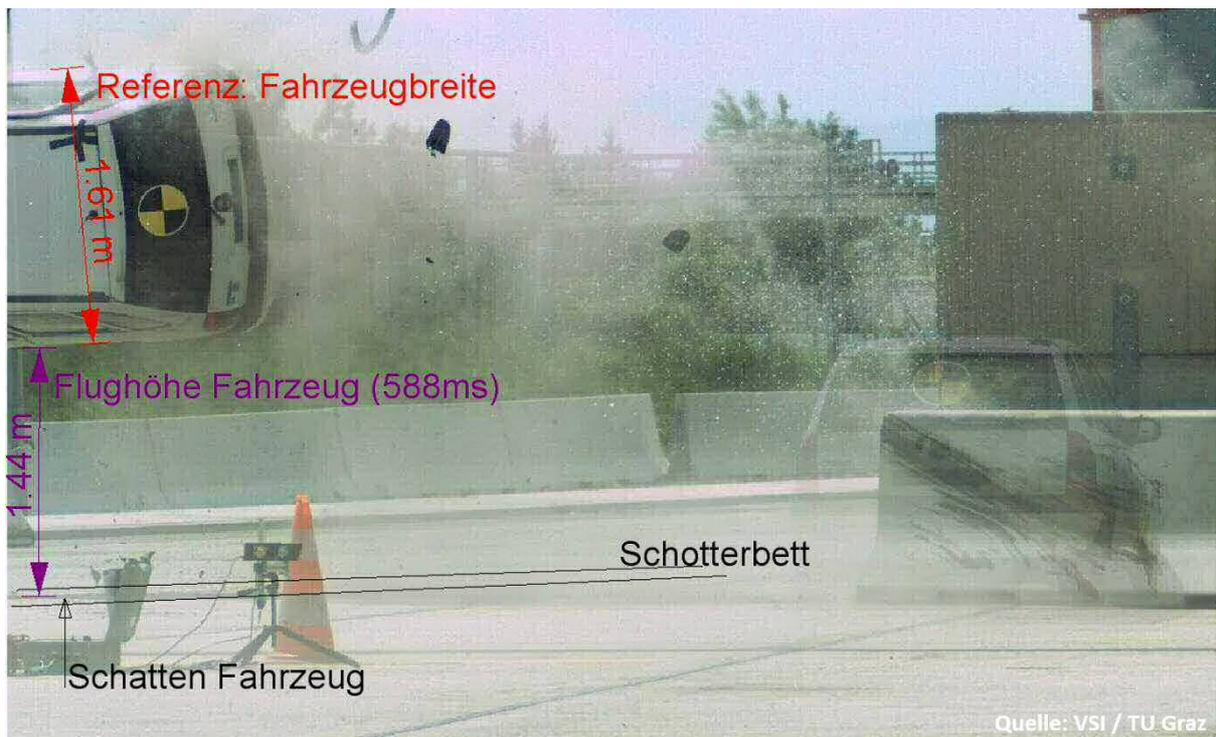


Abbildung 9: Videoanalyse Detail "BMV17001"

2.3.2 Fotodokumentation nach dem Test

Am Prüfling entstanden an den Kanten, die sich zur massiven Betonwand hin abstützten, leichte Beschädigungen. Die Anprallseite des Prüflings zeigt Schleifspuren. Der Prüfling bzw. Schäden am Prüfling nach dem Test sind in Abbildung 10, Abbildung 11 und Abbildung 12 ersichtlich.

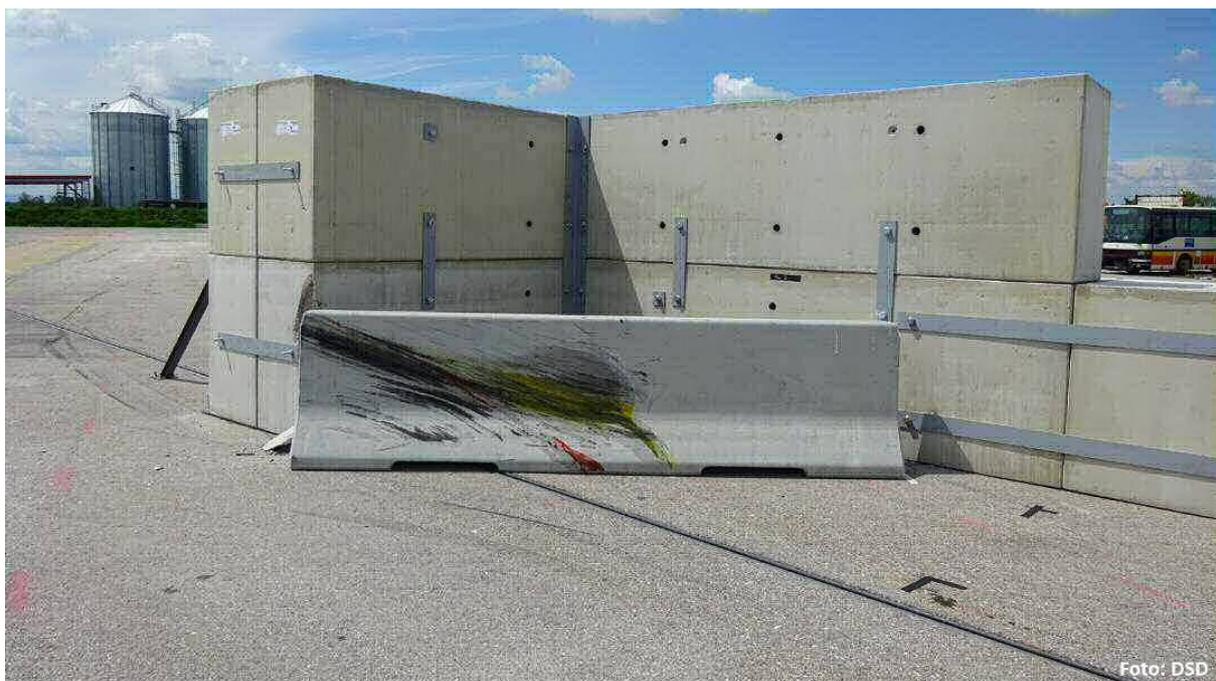


Abbildung 10: Prüfling Überblick "BMV17001"



Foto: DSD

Abbildung 11: Prüfling Detail 1 "BMV17001"



Foto: DSD

Abbildung 12: Prüfling Detail 2 "BMV17001"

Durch den Anprall am Prüfling wurde die Fahrzeugfront beifahrerseitig deformiert. Motorraum, Radkasten, Radaufhängung und Stoßfänger wurden eingedrückt. Fahrerseitig hat sich der Stoßfänger vom Längsträger gelöst. Die Motorhaube hat sich von der rechten Anbindung gelöst, die Windschutzscheibe ist beschädigt und hat sich teilweise vom Rahmen gelöst. Die A-Säule und Fahrgastzelle beifahrerseitig und das Fahrzeugdach wurden deformiert. Aus dem Video geht nicht klar hervor, ob die A-Säule beim Anprall an den Prüfling oder beim Sekundäranprall (Streckenbegrenzung) knickt. Das Fahrzeug nach dem Test ist in Abbildung 13 und Abbildung 14 ersichtlich.

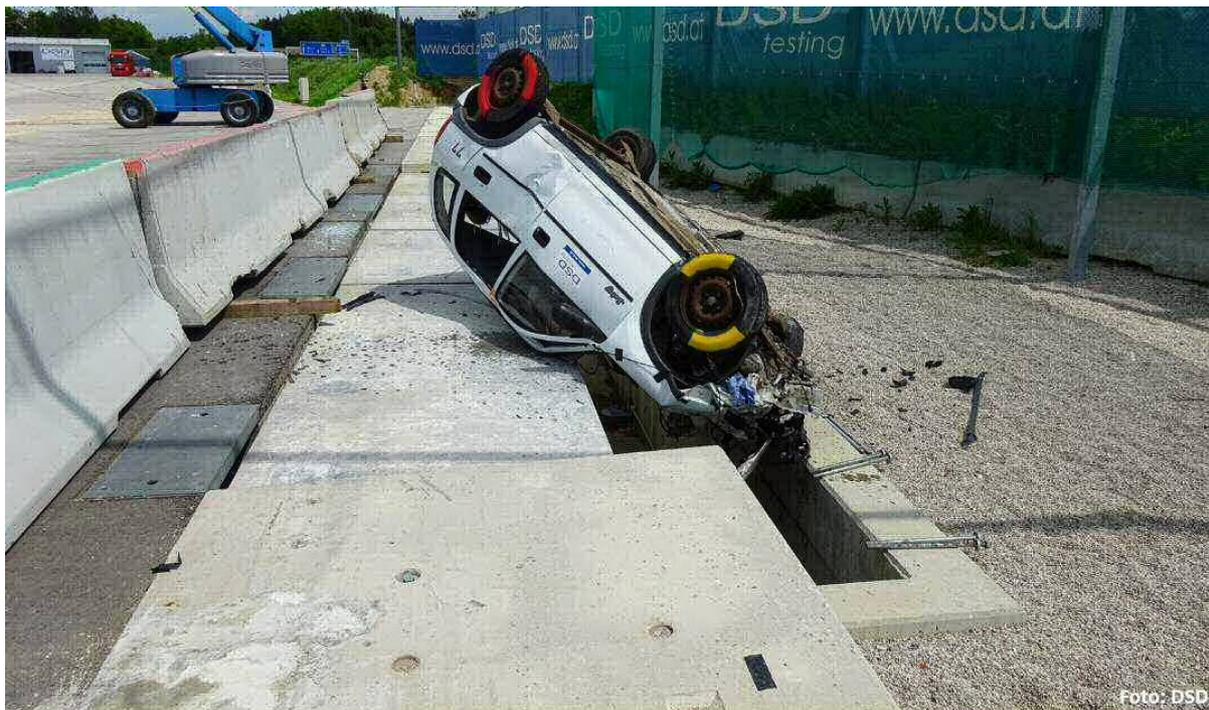


Abbildung 13: Fahrzeug in Endlage "BMV17001"



Abbildung 14: Beschädigungen am Fahrzeug "BMV17001"

2.3.3 Berechnung von Bewertungskriterien

Tabelle 4: Bewertungskriterien "BMV17001"

| Bewertungskriterium | Wert | Einheit |
|---|--------|---------|
| Anprallgeschwindigkeit | 101,12 | km/h |
| Anprallwinkel | 46,4 | ° |
| Kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung (Δv)* | 42,7 | km/h |
| Theoretical Head Impact Velocity (THIV)** | 53,2 | km/h |
| Acceleration Severity Index (ASI)** | 2,9 | - |
| Head Injury Criterion (HIC)** | 1.197 | - |

*Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung wurde mit Hilfe von Videoanalysen berechnet. Die angegebenen Werte stellen somit Richtwerte dar.

**Bei diesem Versuch wurde die Trägerplatte für die Beschleunigungssensoren von einem umherfliegenden Gegenstand getroffen. Dabei wurde ein Sensor (COG, front; Ser.-Nr.: A030635) aus der Verankerung gerissen. Die Werte dieses Sensors wurden zur Berechnung der Bewertungskriterien nicht herangezogen um eine Verfälschung der Ergebnisse auszuschließen.

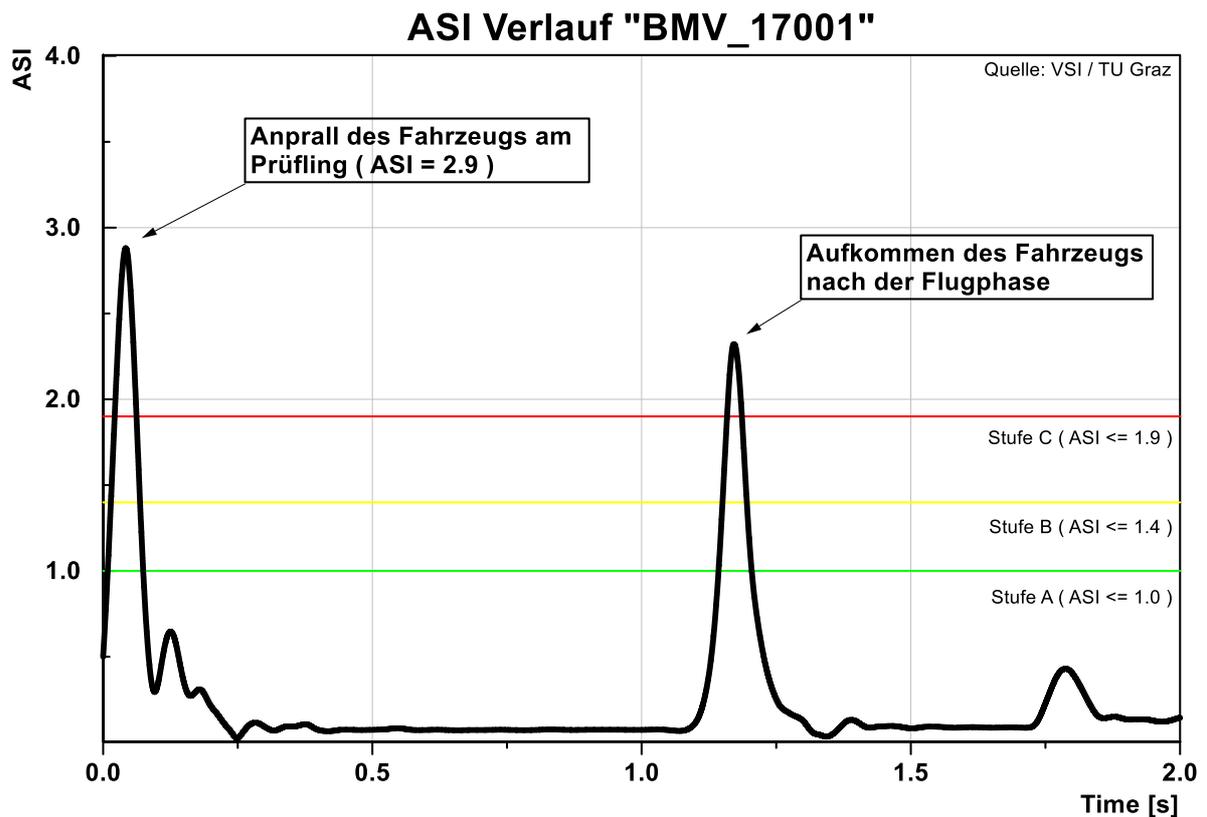


Abbildung 15: ASI-Verlauf (COG) "BMV17001"

3 TEST „BMV17002“

3.1 Allgemein

In Test „BMV17002“ wurde der Anprall eines Fahrzeuges an ein schräg aufgestelltes Betonleitelement in einer Tunnelnische nachgestellt. Die Tunnelnische bzw. -wand wurde im Versuch aus massiven Betonblöcken nachgebildet. Das Betonleitelement wurde direkt an die Tunnelnische bzw. -wand herangeschoben. Die wichtigsten Testparameter sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Eine Skizze der Anprallsituation ist in Abbildung 16/Abbildung 3 dargestellt.

Tabelle 5: Geplante Testkonfiguration „BMV17002“

| | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| Test-Nr. | BMV17002 |
| Datum | 15.05.2017 |
| Anprallsituation | Tunnelnische |
| Fahrzeug | TB11 (900 kg) |
| Anprallgeschwindigkeit | 100 km/h |
| Prüfling | Betonleitelement 8m „REBLOC H2“ |
| Anprallpunkt | mittig |
| Aufstellwinkel | 18° |
| Abkommenswinkel | 5° |
| Anprallseite Fahrzeug | Beifahrer |
| Verankerung | keine |

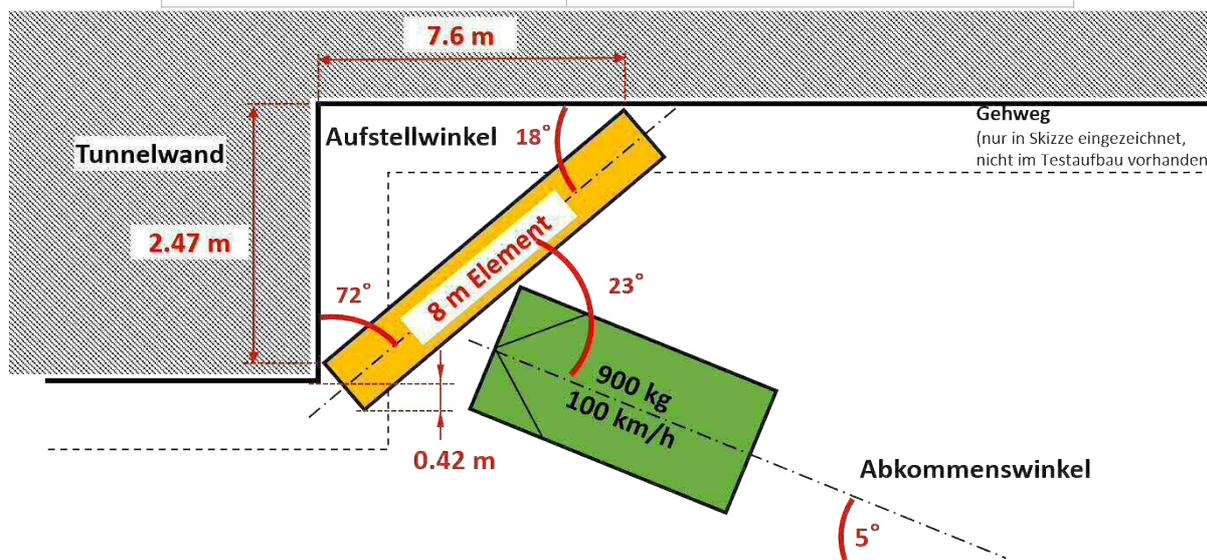


Abbildung 16: Geplante Testsituation "BMV17002"

3.2 Vorbereitung

3.2.1 Fotodokumentation vor dem Test



Abbildung 17: Fahrzeug "BMV17002"



Abbildung 18: Anprallsituation Überblick "BMV17002"



Abbildung 19: Anprallsituation Detail "BMV17002"

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Beschreibung des Testverlaufes

Nach dem Erstkontakt (siehe Abbildung 20) wurde das Fahrzeug in Richtung Fahrerseite und nach oben abgelenkt. Das Fahrzeug bewegte sich parallel zum Prüfling, hob ab, erreichte eine maximale Flughöhe von ca. 0,5 m und durchflog eine Strecke von ca. vier Fahrzeuglängen. Danach touchierte das Fahrzeug die Teststreckenbegrenzung und kam zum Stillstand. Eine Auswertung des Videomaterials ist in Abbildung 21 und Abbildung 22 ersichtlich.



Abbildung 20: Erstkontakt "BMV17002"



Abbildung 21: Videoanalyse Überblick "BMV17002"



Abbildung 22: Videoanalyse Detail "BMV17002"

3.3.2 Fotodokumentation nach dem Test

Am Prüfling entstanden an den Kanten, die sich zur massiven Betonwand hin abstützten, leichte Beschädigungen. Die Anprallseite des Prüflings zeigt Schleifspuren. Der Prüfling bzw. Schäden am Prüfling nach dem Test sind in Abbildung 23, Abbildung 24 und Abbildung 25 ersichtliche.



Abbildung 23: Prüfling Überblick "BMV17002"

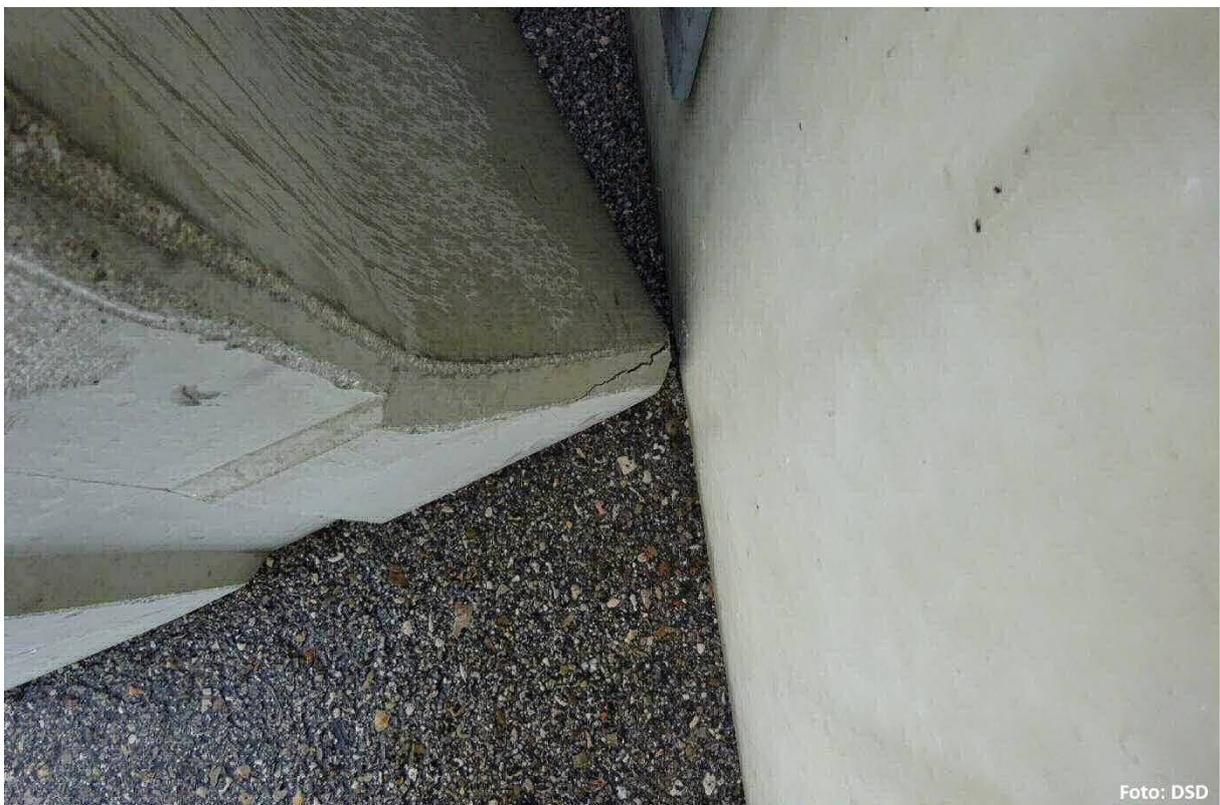


Abbildung 24: Prüfling Detail 1 "BMV17002"

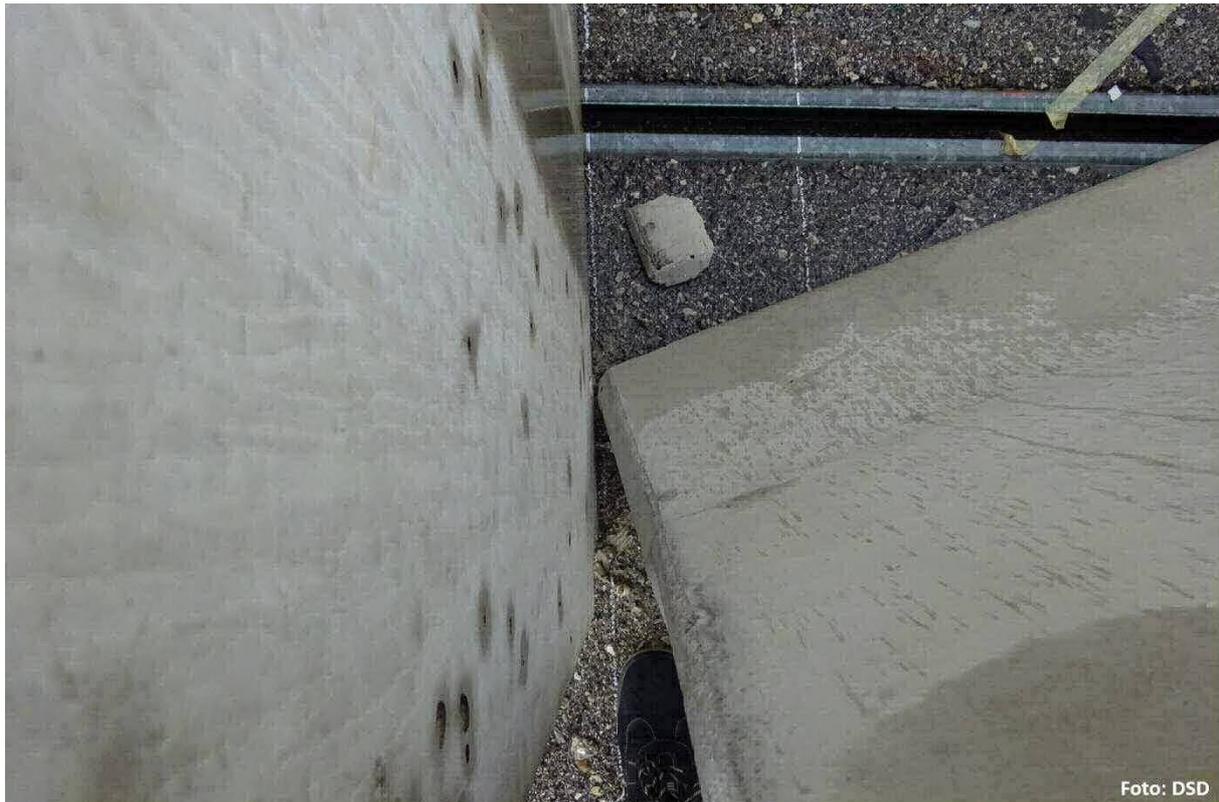


Abbildung 25: Prüfling Detail 2 "BMV17002"

Durch den Anprall am Prüfling wurde die Fahrzeugfront beifahrerseitig deformiert, die Fahrgastzelle blieb jedoch intakt. Die Schäden am Fahrzeug, welche nach dem Test in Abbildung 26 und Abbildung 27 ersichtlich sind, stammen Großteils vom Sekundäranprall (Teststreckenbegrenzung).



Abbildung 26: Fahrzeug in Endlage "BMV17002"



Abbildung 27: Beschädigungen am Fahrzeug "BMV17002"

3.3.3 Berechnung von Bewertungskriterien

Tabelle 6: Bewertungskriterien "BMV17002"

| Bewertungskriterium | Wert | Einheit |
|---|--------|---------|
| Anprallgeschwindigkeit | 100,84 | km/h |
| Anprallwinkel | 22,2 | ° |
| Kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung (Δv)* | 11,9 | km/h |
| Theoretical Head Impact Velocity (THIV) | 29,6 | km/h |
| Acceleration Severity Index (ASI) | 1,6 | - |
| Head Injury Criterion (HIC) | 100 | - |

*Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung wurde mit Hilfe von Videoanalysen berechnet. Die angegebenen Werte stellen somit Richtwerte dar.

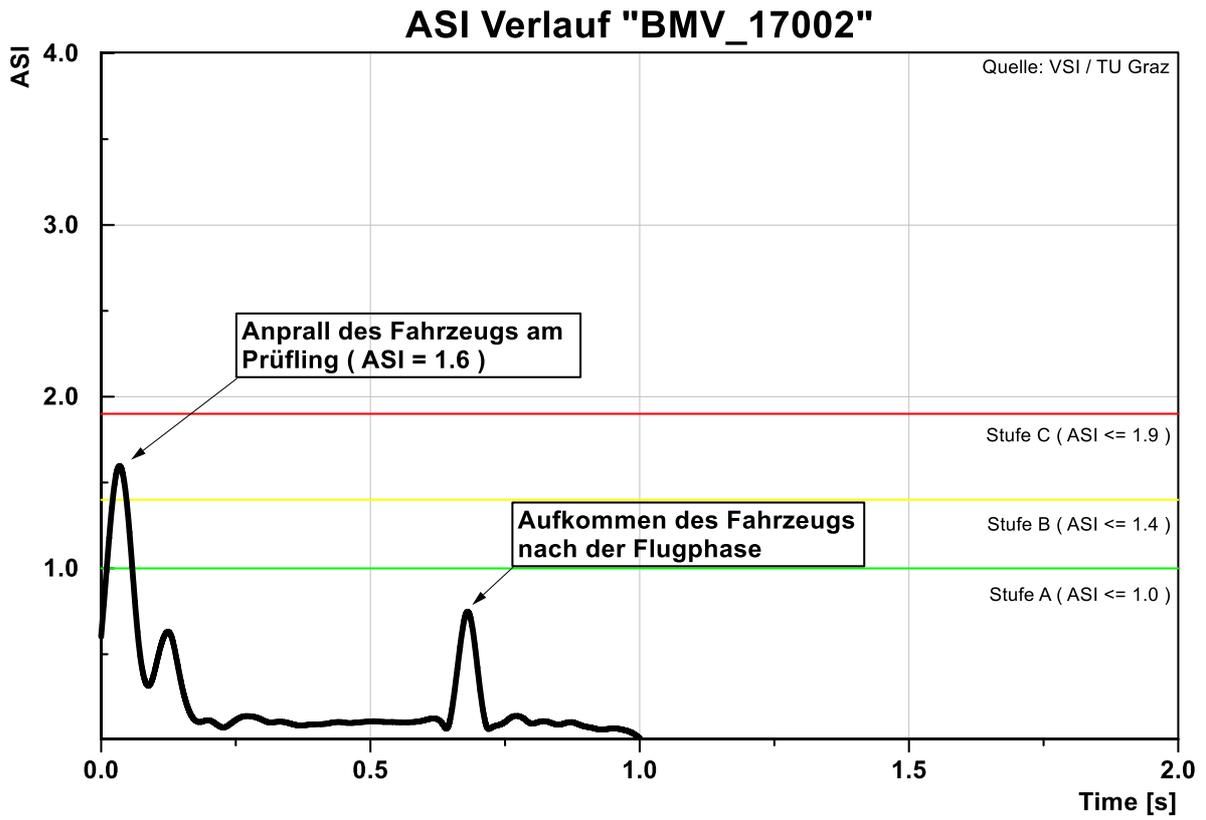


Abbildung 28: ASI-Verlauf (COG) "BMV17002"

4 TEST „BMV17003“

4.1 Allgemein

In Test „BMV17003“ wurde der Anprall eines Fahrzeuges an einen Anpralldämpfer in einer Tunnelnische nachgestellt. Die Tunnelnische bzw. -wand wurde im Versuch aus massiven Betonblöcken nachgebildet. Der Anpralldämpfer wurde nach hinten von einem massiven Betonkeil abgestützt und mit diesem mittels Spanngurte verzurrt. Anpralldämpfer und Betonkeil wurden freistehend – ohne Kontakt zur Tunnelnische bzw. –wand - positioniert. Die wichtigsten Testparameter sind in Tabelle 3 Tabelle 7 zusammengefasst. Eine Skizze der Anprallsituation ist in Abbildung 29 dargestellt.

Tabelle 7: Geplante Testkonfiguration „BMV17003“

| | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Test-Nr. | BMV17003 |
| Datum | 16.05.2017 |
| Anprallsituation | Tunnelnische |
| Fahrzeug | TB11 (900 kg) |
| Anprallgeschwindigkeit | 100 km/h |
| Prüfling | Anpralldämpfer „ALPINA <Neu>“ |
| Anprallpunkt | mittig |
| Aufstellwinkel | 0° |
| Abkommenswinkel | 5° |
| Anprallseite Fahrzeug | Beifahrer |
| Verankerung | lt. Hersteller |

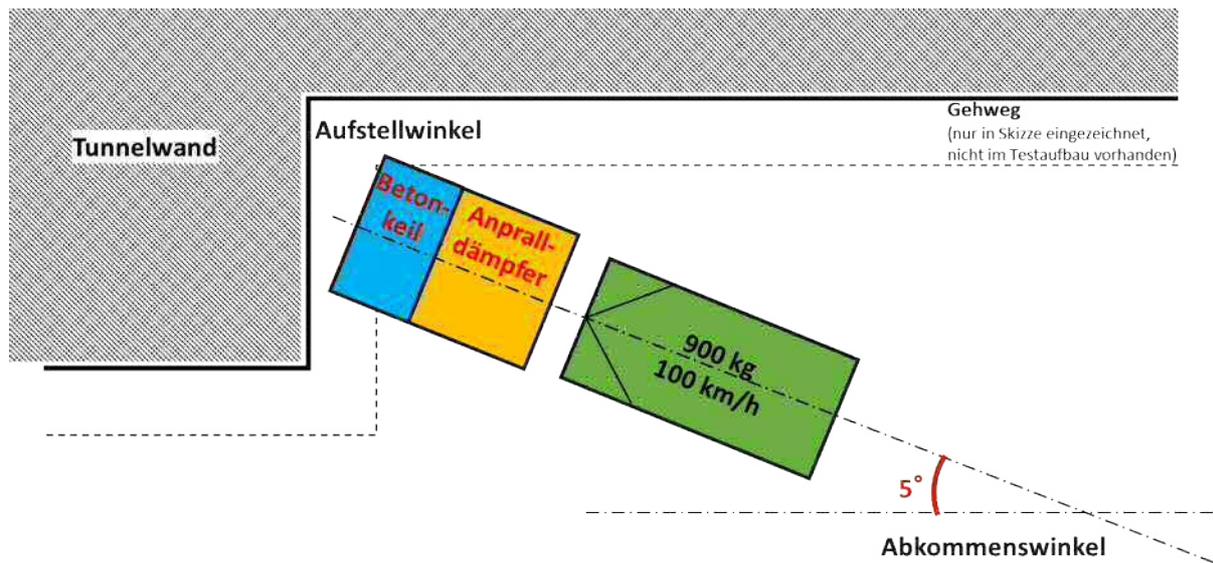


Abbildung 29: Geplante Testsituation "BMV17003"

4.2 Vorbereitung

4.2.1 Fotodokumentation vor dem Test



Abbildung 30: Fahrzeug "BMV17003"

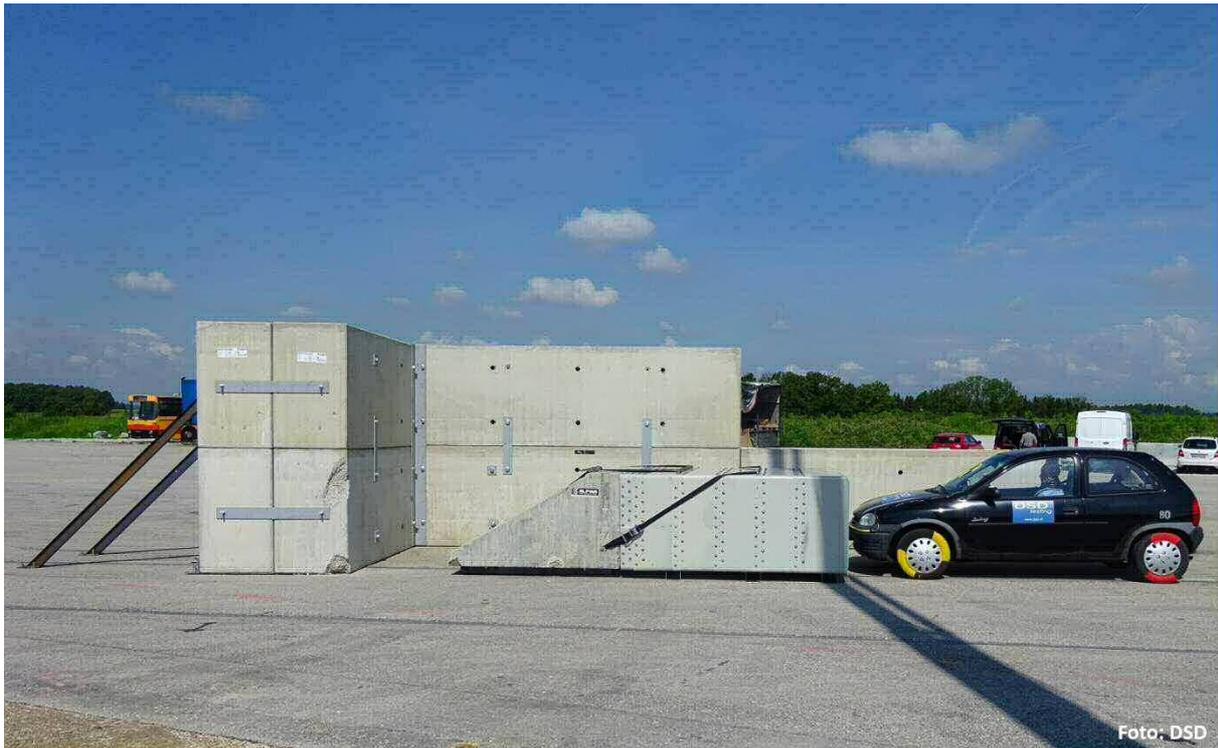


Abbildung 31: Anprallsituation Überblick "BMV17003"

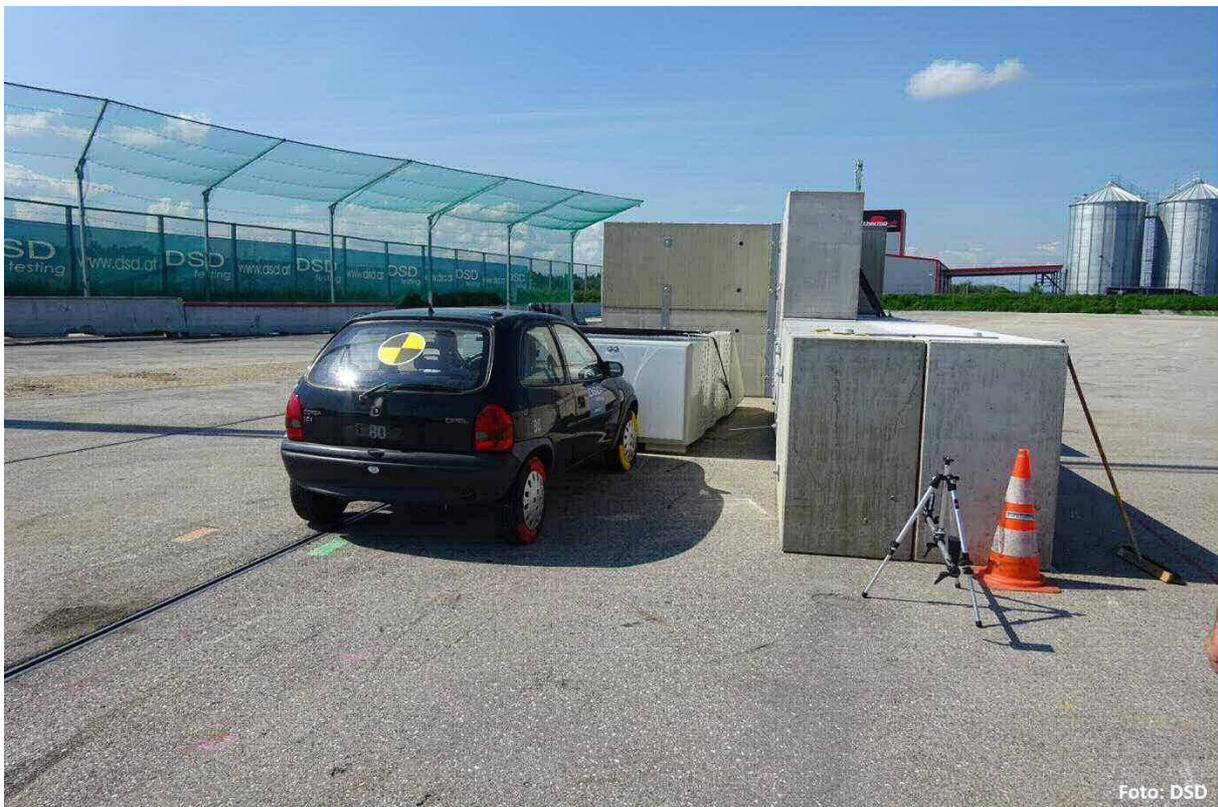


Abbildung 32: Anprallsituation Detail "BMV17003"

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Beschreibung des Testverlaufes

Nach dem Erstkontakt (siehe Abbildung 33) wurde der Prüfling etwa auf halbe Länge gestaucht und so das Fahrzeug abrupt abgebremst und zum Stillstand gebracht. Der Umkehrpunkt der Bewegung wurde nach 184 ms erreicht. Bis dorthin wurde ein Weg von ca. 2,3 m zurückgelegt. Das Fahrzeug wurde anschließend ca. 0,6 m zurückgeschleudert. Die Endlage des Fahrzeugs wurde nach ca. 1,7 s erreicht. An der rückwärtigen Abstützung (Betonkeil) entstanden Beschädigungen. Eine Auswertung des Videomaterials ist in Abbildung 34 ersichtlich.

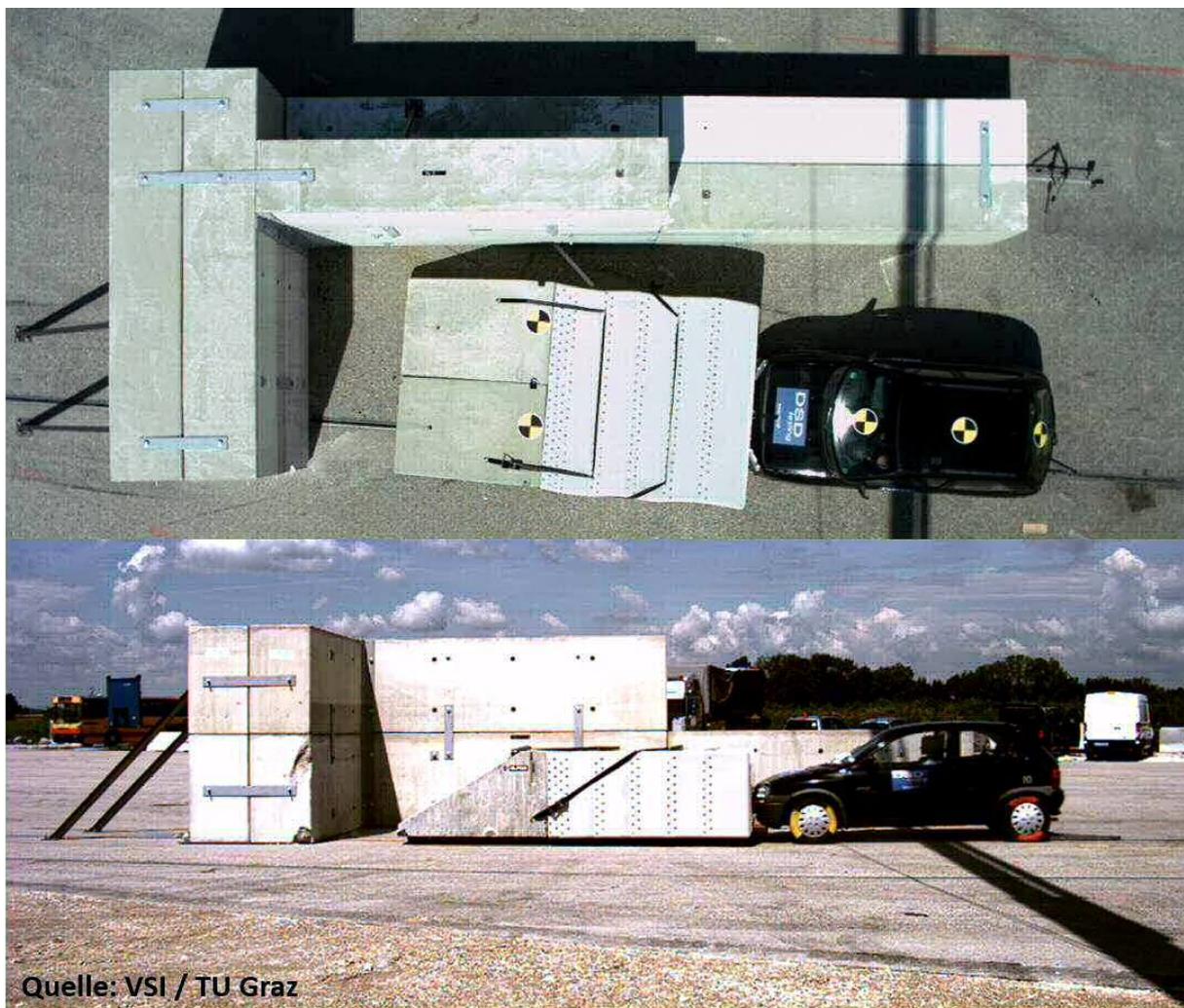


Abbildung 33: Erstkontakt "BMV17003"



Abbildung 34: Videoanalyse Überblick "BMV17003"

4.3.2 Fotodokumentation nach dem Test

Der Prüfling bzw. Schäden am Prüfling nach dem Test sind in Abbildung 35 bis Abbildung 39 ersichtlich.

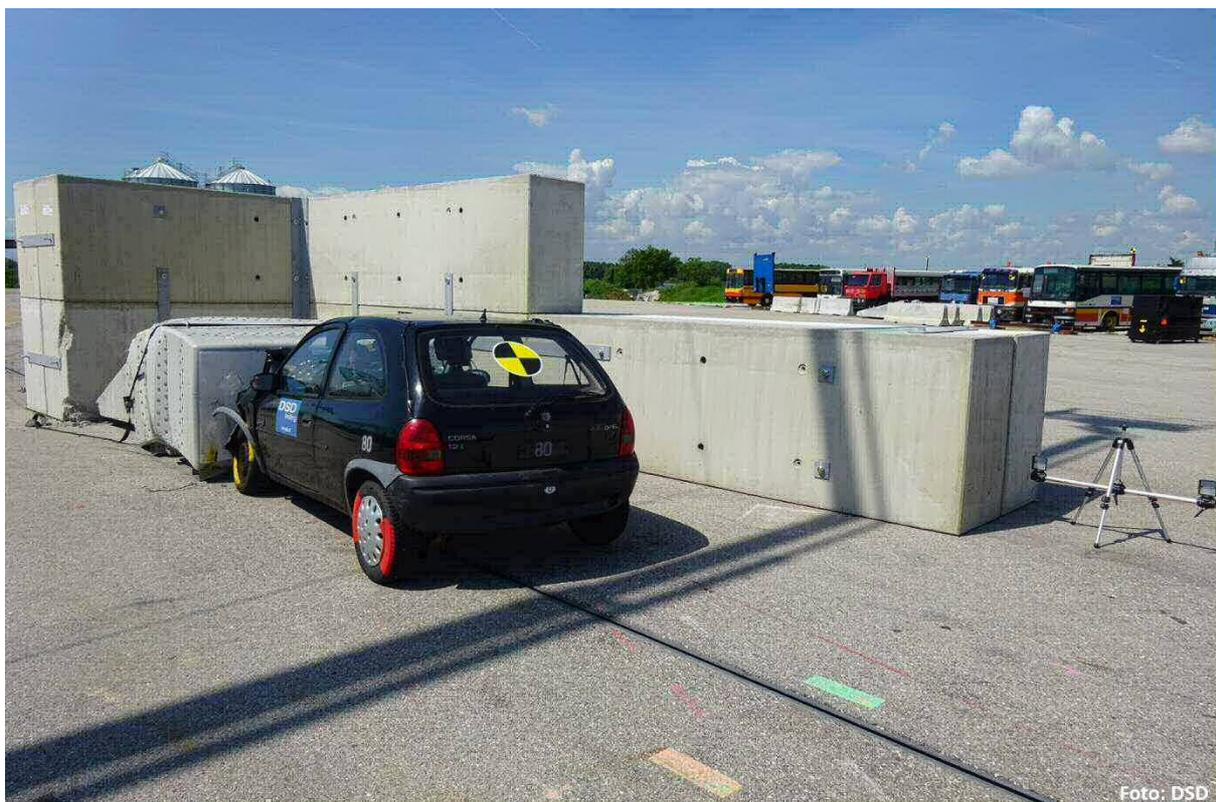


Abbildung 35: Prüfling Überblick "BMV17003"

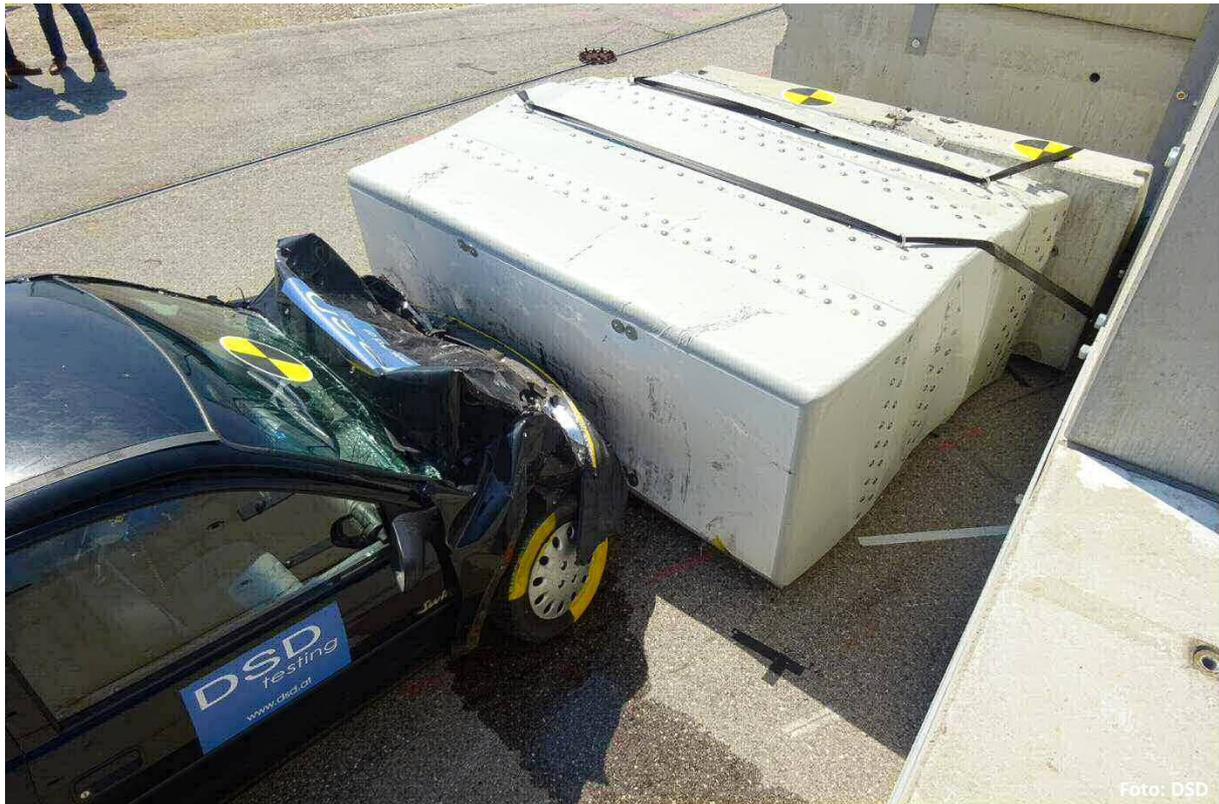


Abbildung 36: Prüfling Detail "BMV17003"

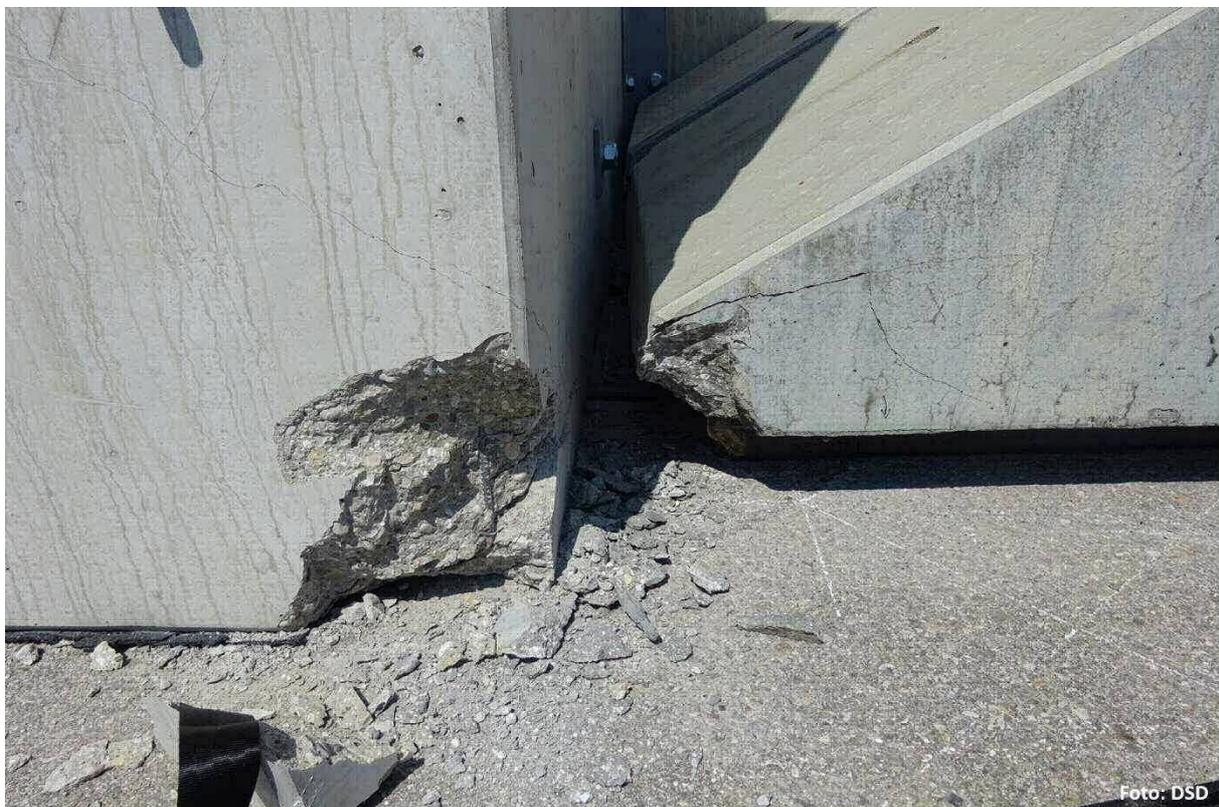


Abbildung 37: Anprall der rückwärtigen Abstützung an der massiven Mauer "BMV17003"

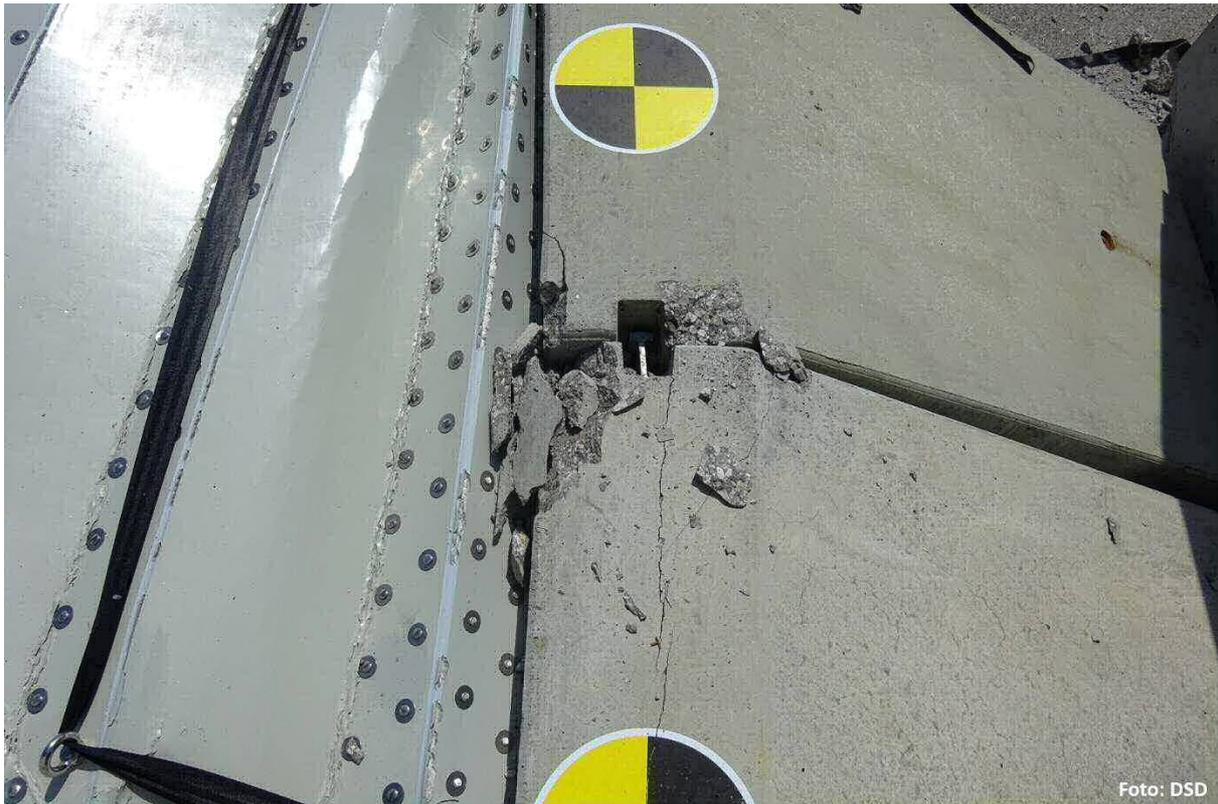


Abbildung 38: Beschädigungen an der rückwärtigen Abstützung "BMV17003"

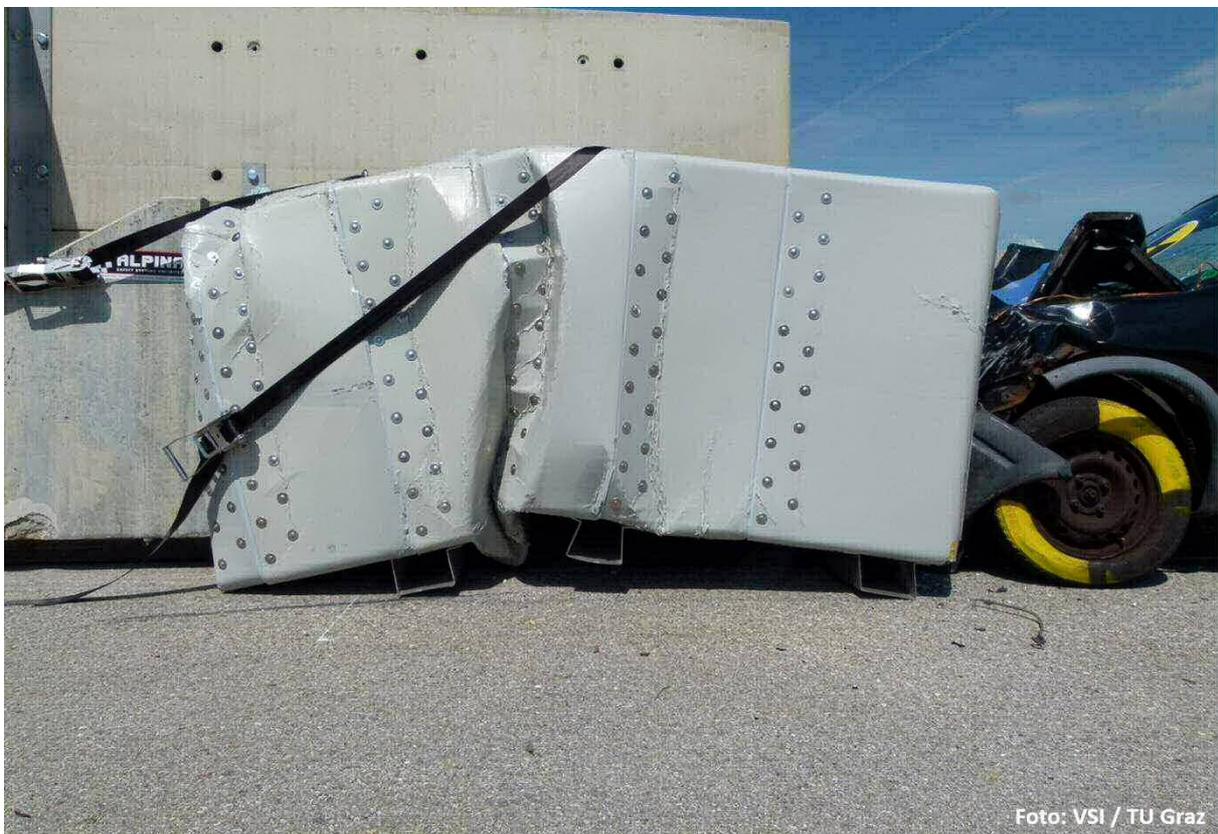


Abbildung 39: Beschädigungen am Prüfling "BMV17003"

Durch den Anprall am Prüfling wurde die Fahrzeugfront etwa bis vor der Vorderachse deformiert. Durch die Deformation der Motorhaube wurde die Windschutzscheibe beschädigt. Beide Radkästen und Radaufhängungen wurden deformiert. Beide A-Säulen sowie das Dachsystem zeigen leichte Verformungen, die Fahrgastzelle blieb jedoch intakt. Das Fahrzeug nach dem Test ist in Abbildung 40 ersichtlich.



Abbildung 40: Beschädigungen am Fahrzeug "BMV17003"

4.3.3 Berechnung von Bewertungskriterien

Tabelle 8: Bewertungskriterien "BMV17003"

| Bewertungskriterium | Wert | Einheit |
|--|--------|---------|
| Anprallgeschwindigkeit | 101,98 | km/h |
| Anprallwinkel | 0 | ° |
| Kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung (Δv) | 101,98 | km/h |
| Theoretical Head Impact Velocity (THIV) | 57,5 | km/h |
| Acceleration Severity Index (ASI) | 1,8 | - |
| Head Injury Criterion (HIC) | 1.028 | - |

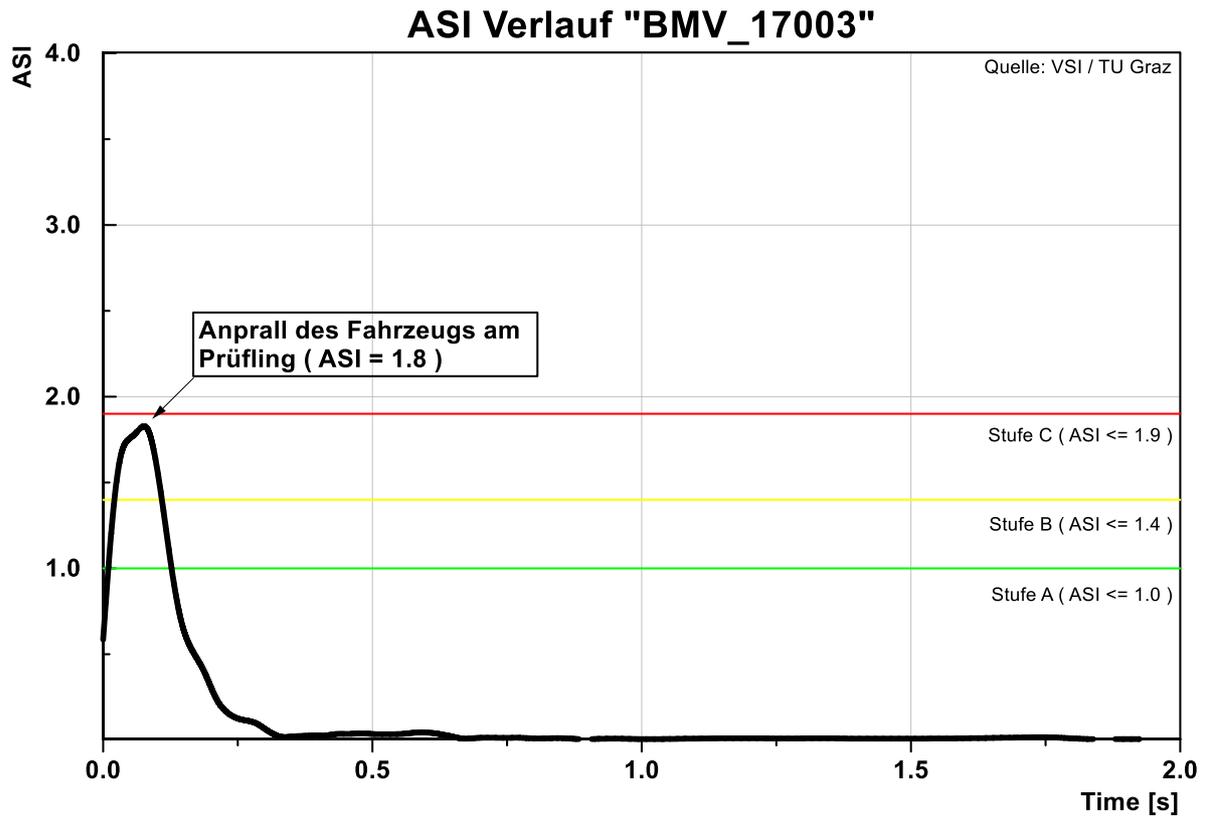


Abbildung 41: ASI-Verlauf (COG) "BMV17003"

5 TEST „BMV17004“

5.1 Allgemein

In Test „BMV17004“ wurde der Anprall eines Fahrzeuges an einen Anpralldämpfer in einer Tunnelnische nachgestellt. Die Tunnelnische bzw. -wand wurde im Versuch aus massiven Betonblöcken nachgebildet. Der Anpralldämpfer wurde nach hinten von einem massiven Betonkeil abgestützt und mit diesem mittels Spanngurte verzurrt. Anpralldämpfer und Betonkeil wurden freistehend – ohne Kontakt zur Tunnelnische bzw. –wand - positioniert. Die wichtigsten Testparameter sind in Tabelle 3 Tabelle 9 zusammengefasst. Eine Skizze der Anprallsituation ist in Abbildung 42 dargestellt.

Tabelle 9: Geplante Testkonfiguration „BMV17004“

| | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Test-Nr. | BMV17004 |
| Datum | 16.05.2017 |
| Anprallsituation | Tunnelnische |
| Fahrzeug | TB11 (900 kg) |
| Anprallgeschwindigkeit | 100 km/h |
| Prüfling | Anpralldämpfer „ALPINA F1-50“ |
| Anprallpunkt | mittig |
| Aufstellwinkel | 0° |
| Abkommenswinkel | 5° |
| Anprallseite Fahrzeug | Beifahrer |
| Verankerung | lt. Hersteller |

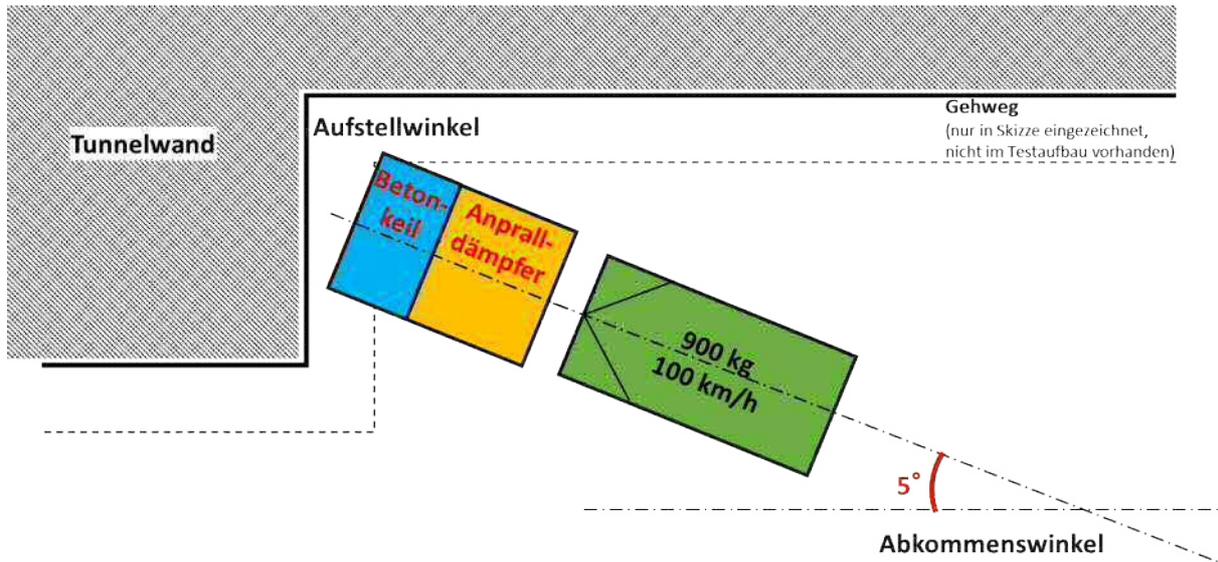


Abbildung 42: Geplante Testsituation "BMV17004"

5.2 Vorbereitung

5.2.1 Fotodokumentation vor dem Test



Abbildung 43: Fahrzeug "BMV17004"

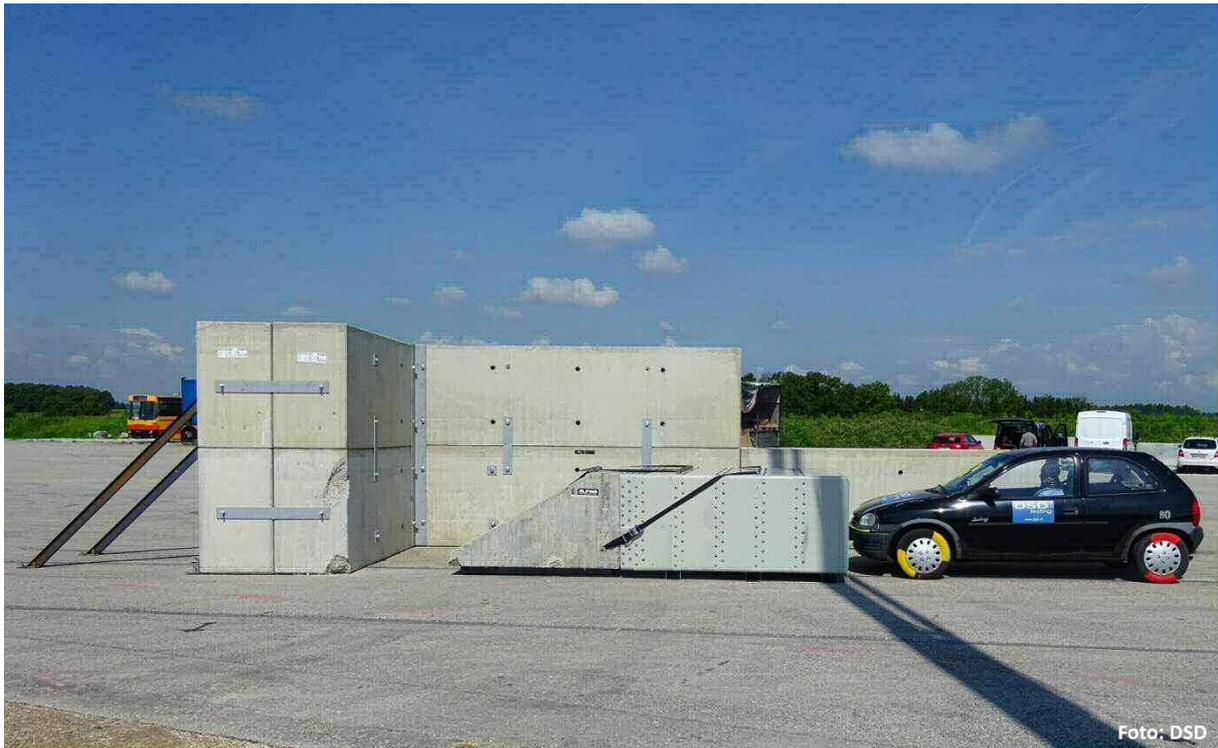


Abbildung 44: Anprallsituation Überblick "BMV17004"

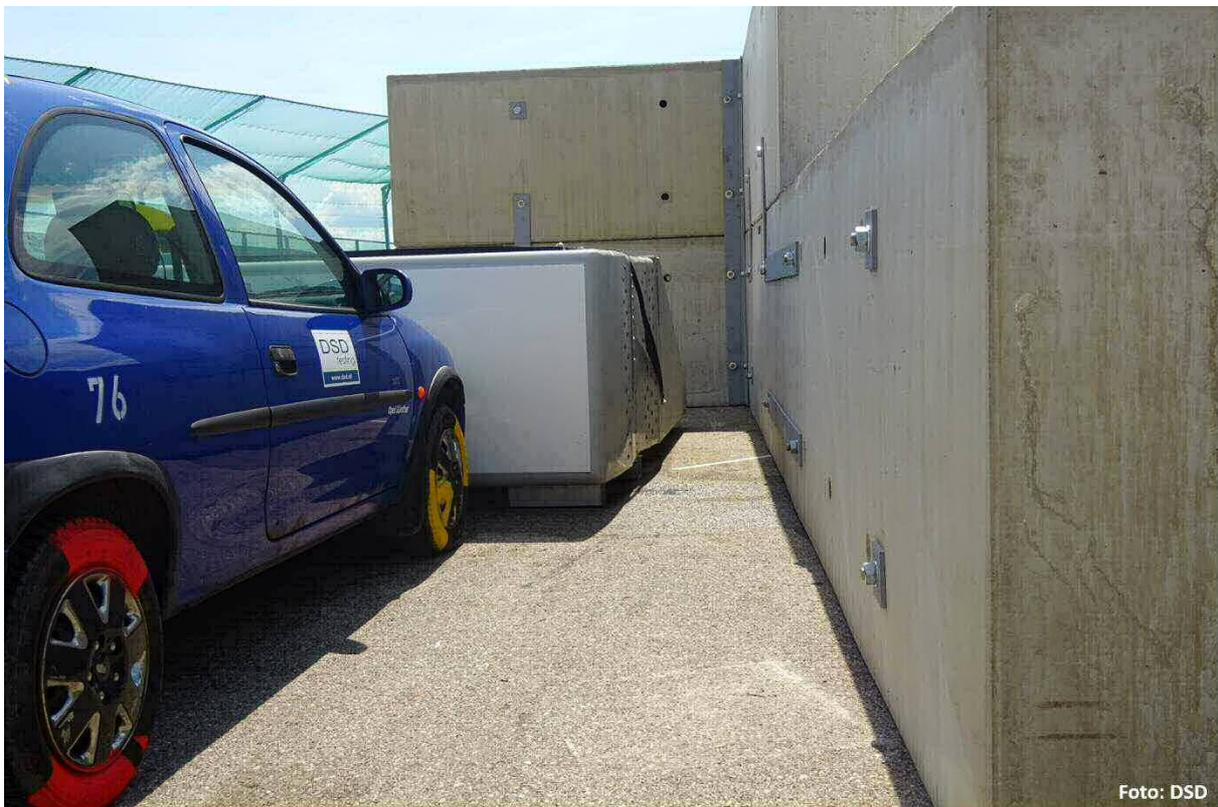


Abbildung 45: Anprallsituation Detail "BMV17004"

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Beschreibung des Testverlaufes

Nach dem Erstkontakt (siehe Abbildung 46) wurde der Prüfling auf ganzer Länge gestaucht und so das Fahrzeug abrupt abgebremst und zum Stillstand gebracht. Der Umkehrpunkt der Bewegung wurde nach 110 ms erreicht. Bis dorthin wurde ein Weg von ca. 2,1 m zurückgelegt. Das Fahrzeug wurde anschließend ca. 0,4 m zurückgeschleudert. Die Endlage des Fahrzeugs wurde nach ca. 1,3 s erreicht. An der rückwärtigen Abstützung (Betonkeil) entstanden Beschädigungen. Eine Auswertung des Videomaterials ist in Abbildung 47 ersichtlich.

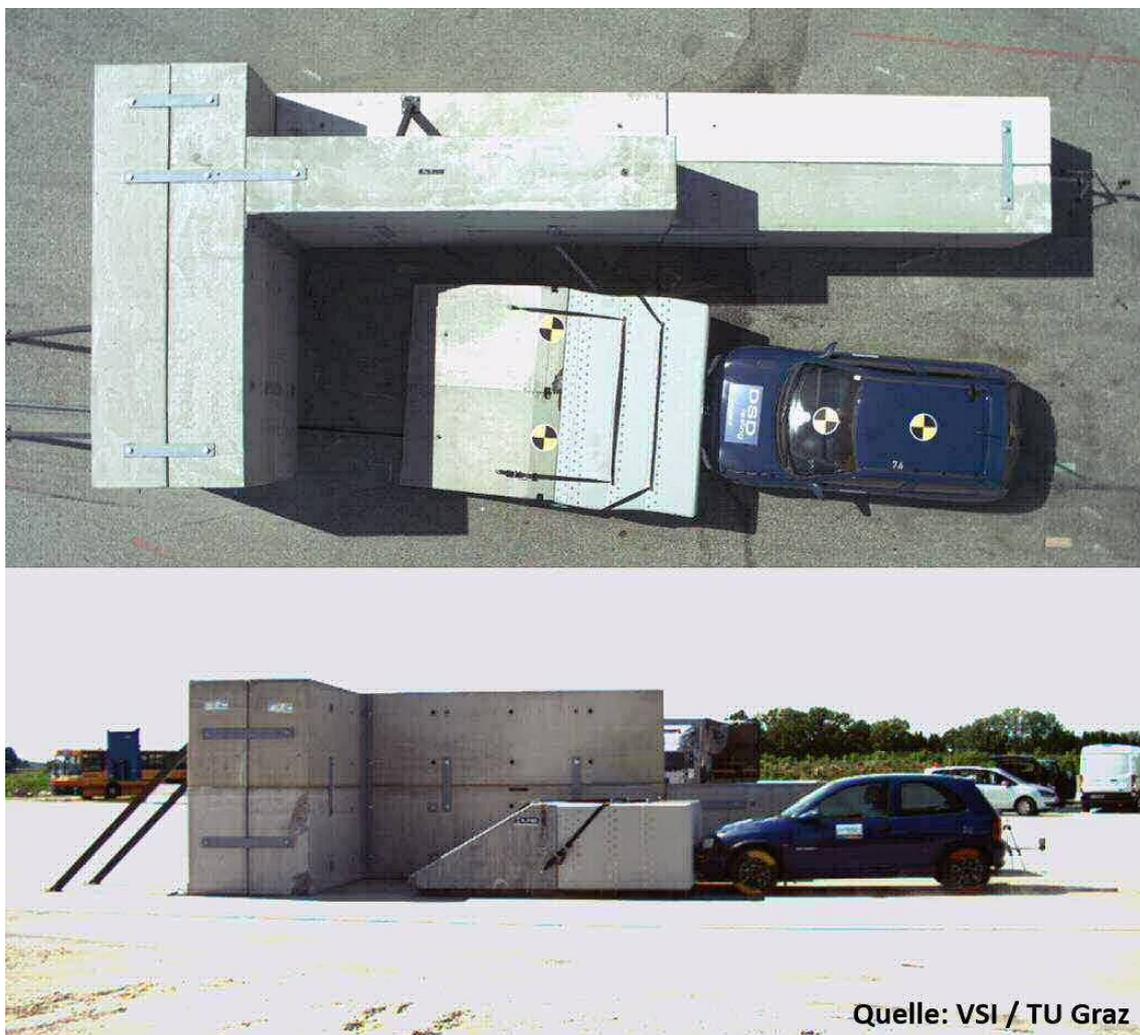


Abbildung 46: Erstkontakt "BMV17004"

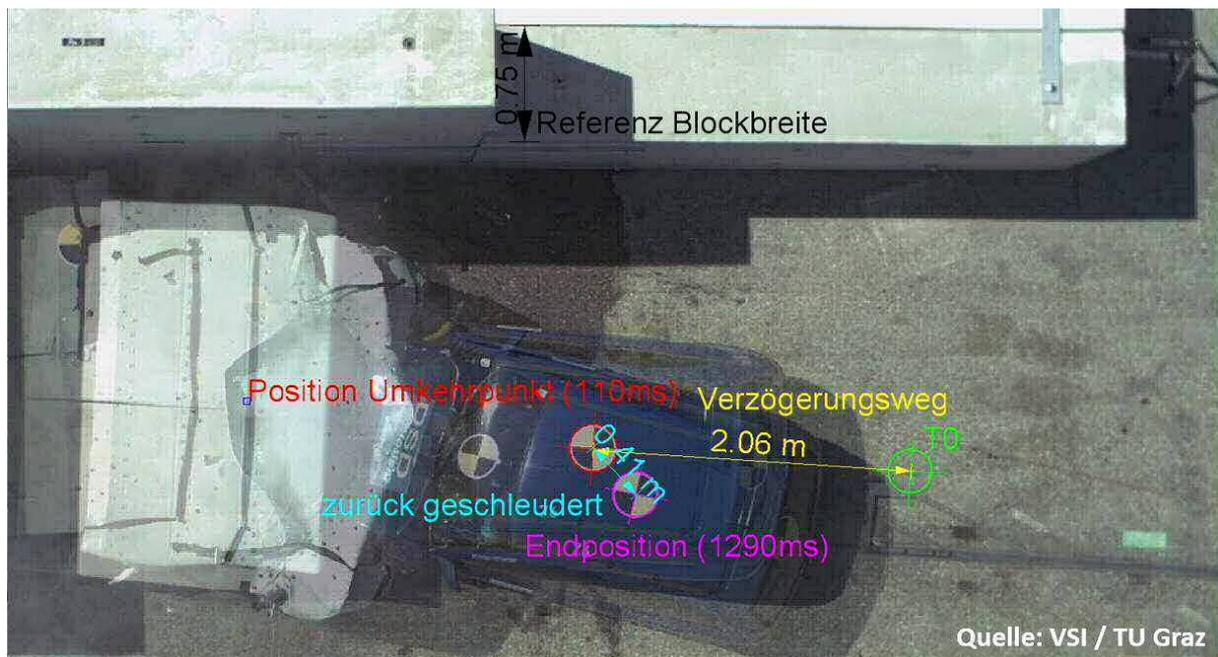


Abbildung 47: Videoanalyse Überblick "BMV17004"

5.3.2 Fotodokumentation nach dem Test

Der Prüfling bzw. Schäden am Prüfling nach dem Test sind in Abbildung 48 bis Abbildung 53 ersichtlich.

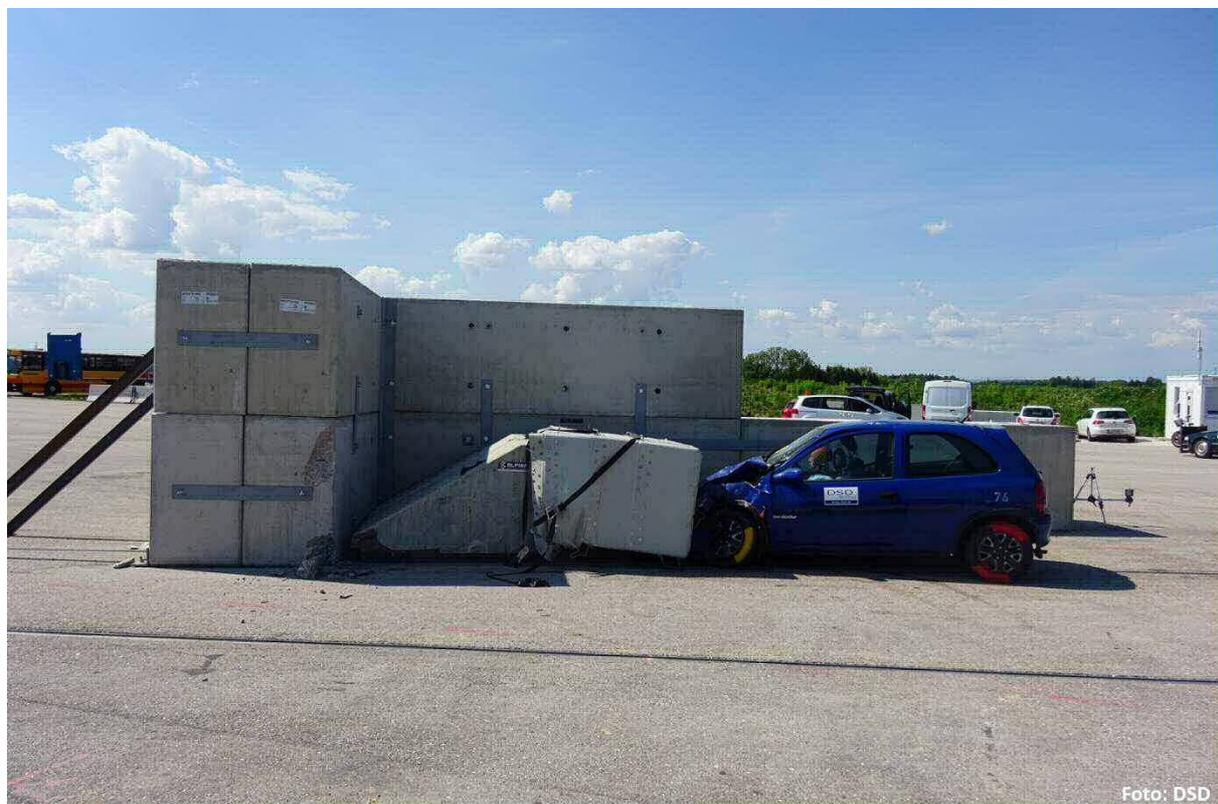


Abbildung 48: Prüfling Überblick "BMV17004"

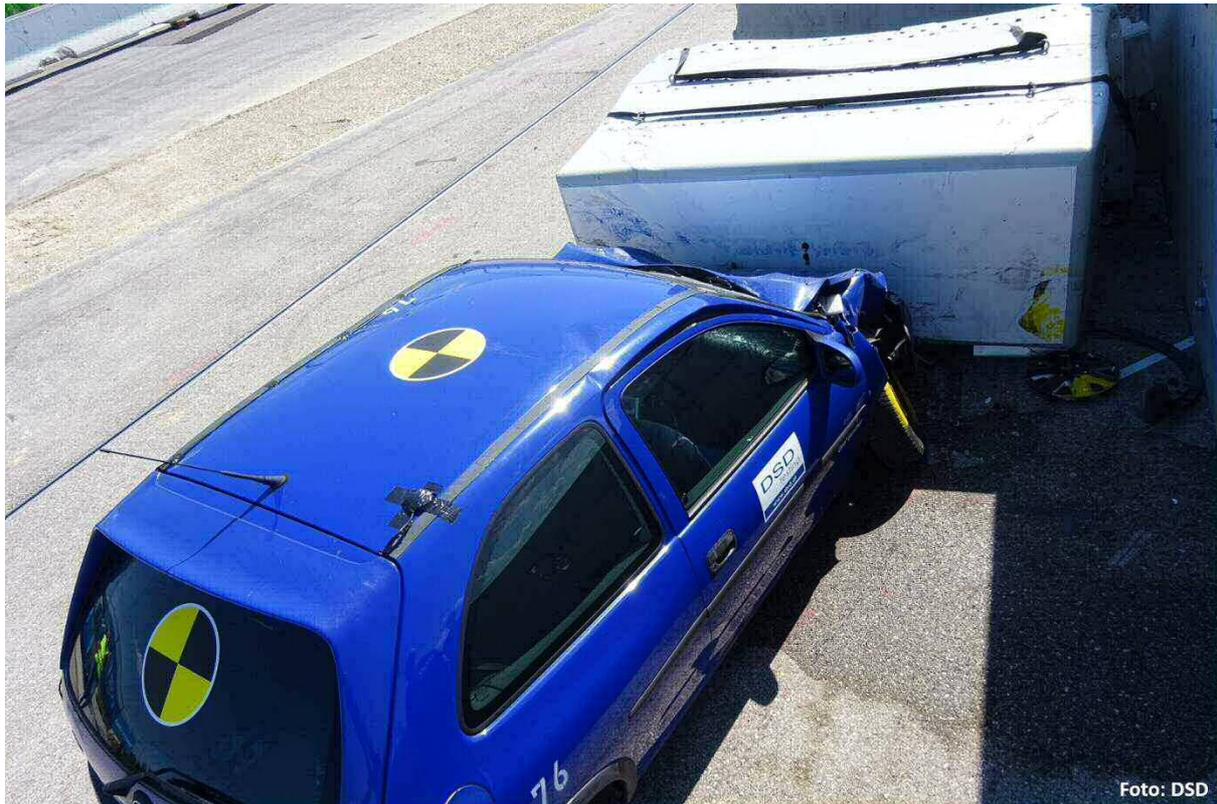


Abbildung 49: Prüfling Detail "BMV17004"



Abbildung 50: Anprall der rückwärtigen Abstützung an der massiven Mauer "BMV17004"



Foto: DSD

Abbildung 51: Beschädigungen an der rückwärtigen Abstützung "BMV17004"



Foto: VSI / TU Graz

Abbildung 52: Beschädigungen am Prüfling 1 "BMV17004"

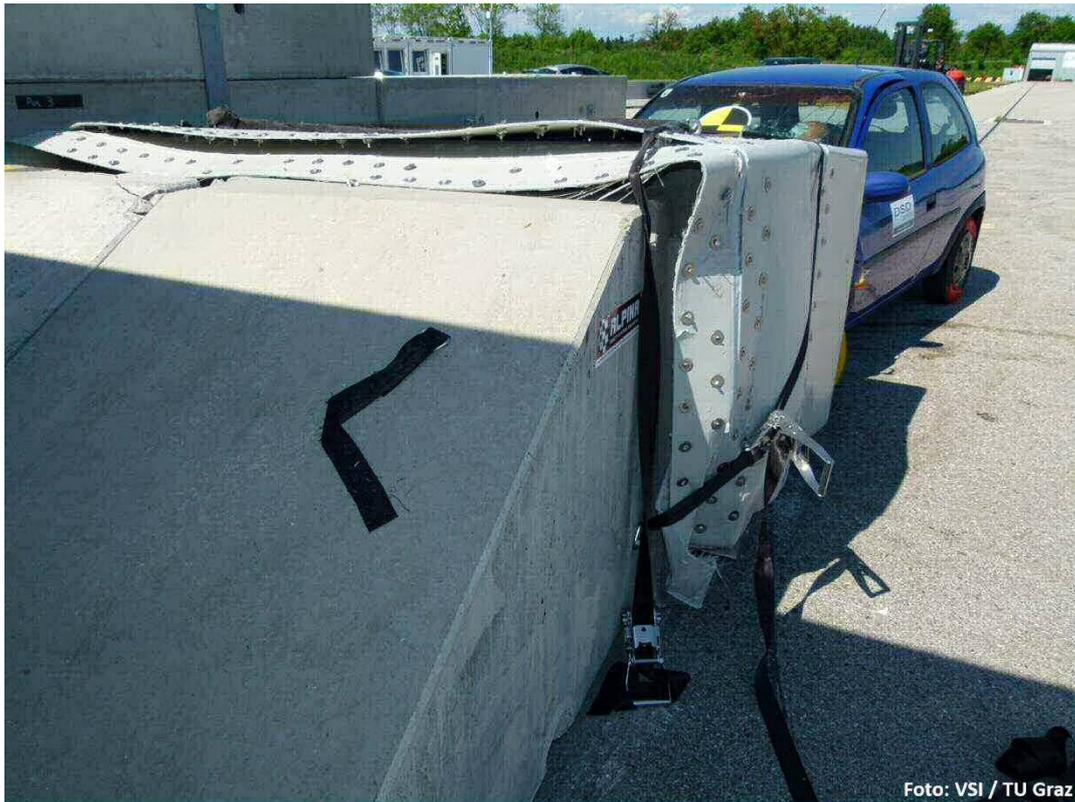


Abbildung 53: Beschädigungen am Prüfling 2 „BMV17004“

Durch den Anprall am Prüfling wurde die Fahrzeugfront und die Längsträger etwa bis zur Vorderachse deformiert. Durch die Deformation der Motorhaube wurde die Windschutzscheibe beschädigt. Beide Radkästen und Radaufhängungen wurden deformiert. Beide A-Säulen sowie das Dachsystem zeigten leichte Verformungen, die Fahrgastzelle blieb jedoch intakt. Der Fahrersitz samt Dummy wurde aus der Verankerung gerissen und Richtung Armaturenbrett verschoben. Lenkrad und Armaturenbrett wurden deformiert. Zudem wurde bei der Bergung des Dummies festgestellt, dass der Sicherheitsgurt nicht mehr intakt und im Bereich des Dummybeckens abgerissen war. Das Fahrzeug nach dem Test, sowie der beschädigte Sicherheitsgurt sind in Abbildung 54 und Abbildung 55 ersichtlich.



Abbildung 54: Beschädigungen am Fahrzeug "BMW17004"



Abbildung 55: Durchtrennter fahrerseitiger Sicherheitsgurt

5.3.3 Berechnung von Bewertungskriterien

Tabelle 10: Bewertungskriterien "BMV17004"

| Bewertungskriterium | Wert | Einheit |
|--|--------|---------|
| Anprallgeschwindigkeit | 102,27 | km/h |
| Anprallwinkel | 0 | ° |
| Kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung (Δv) | 102,27 | km/h |
| Theoretical Head Impact Velocity (THIV) | 73,5 | km/h |
| Acceleration Severity Index (ASI) | 3,3 | - |
| Head Injury Criterion (HIC) | 2.330 | - |

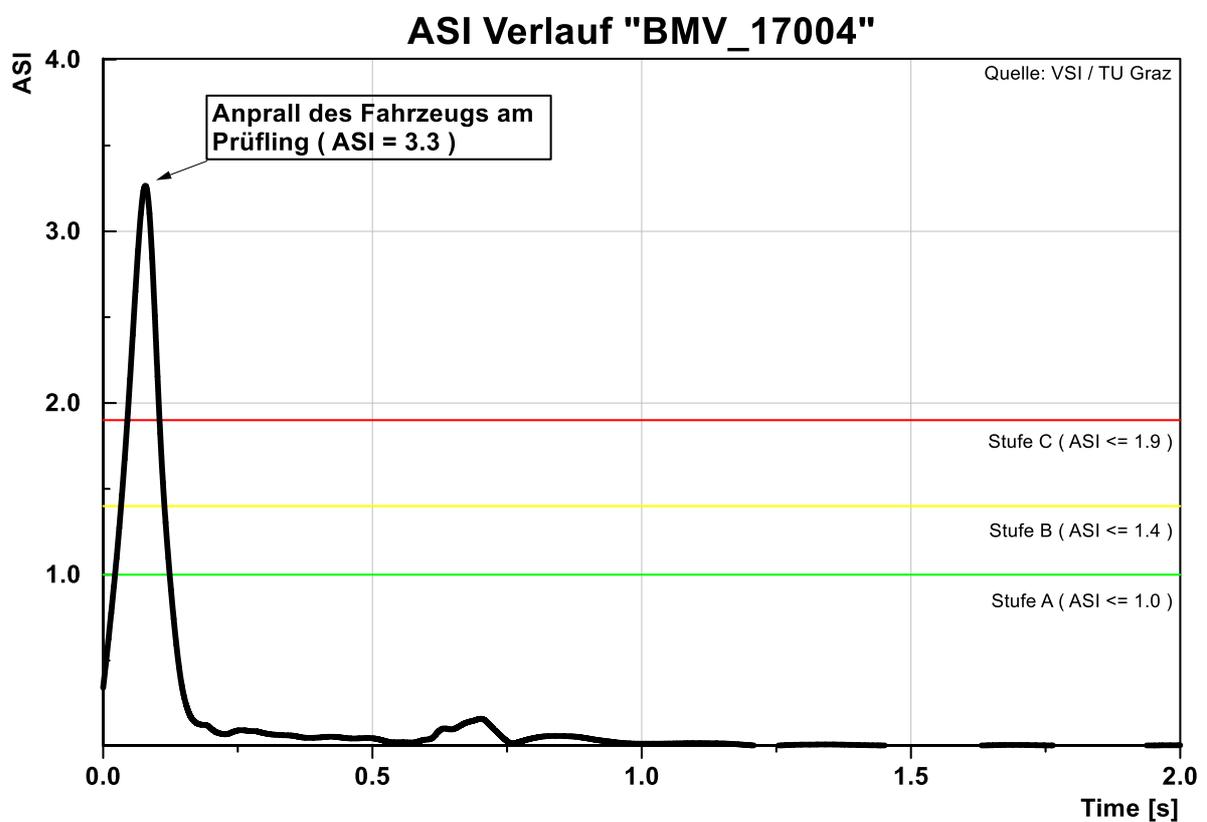


Abbildung 56: ASI-Verlauf (COG) "BMV17004"

6 TEST „BMV17005“

6.1 Allgemein

In Test „BMV17005“ wurde der Anprall eines Fahrzeuges an ein schräg aufgestelltes Betonleitsystem vor einem Tunnelportal nachgestellt. Das Tunnelportal wurde im Versuch aus massiven Betonblöcken nachgebildet. Das Betonleitsystem besteht aus je einem abgesenkten Anfangs- bzw. Endelement und dazwischen vier miteinander verbundenen Mittelelementen. Anfangs- bzw. Endelement wurden mittels Adapterplatten lt. Herstellerangaben im Boden verankert. Das Betonleitsystem wurde derart positioniert, dass die Mittelachse des Systems eine gedachte Verlängerung der Wand des Tunnelportals im Abstand von 1 m schneidet. Die wichtigsten Testparameter sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Eine Skizze der Anprallsituation ist in Abbildung 57 dargestellt.

Tabelle 11: Geplante Testkonfiguration „BMV17005“

| | |
|-------------------------------|--|
| Test-Nr. | BMV17005 |
| Datum | 17.05.2017 |
| Anprallsituation | Tunnelportal |
| Fahrzeug | TB32 (1.500 kg) |
| Anprallgeschwindigkeit | 100 km/h |
| Prüfling | 6 x Beton 4m „DELTABLOC H2“ |
| Anprallpunkt | zwischen 2. und 3. Element |
| Aufstellwinkel | 5° |
| Abkommenswinkel | 20° |
| Anprallseite Fahrzeug | Fahrer |
| Verankerung | 1. und 6. Element sind verankerte Absenker |

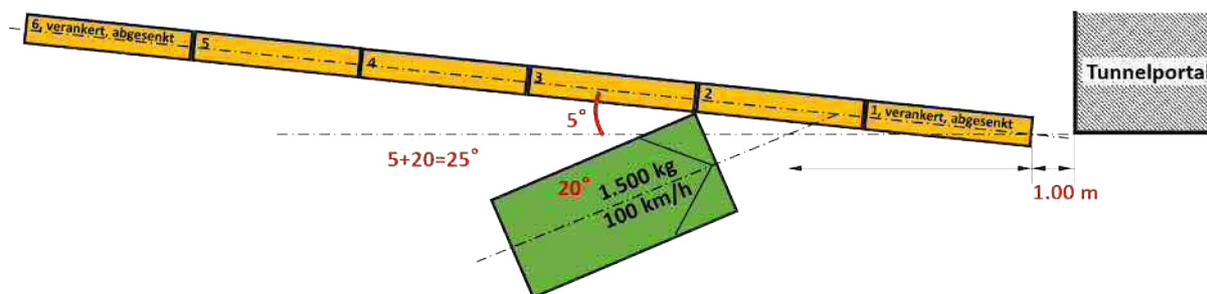


Abbildung 57: Geplante Testsituation "BMV17005"

6.2 Vorbereitung

6.2.1 Fotodokumentation vor dem Test



Abbildung 58: Fahrzeug "BMV17005"



Abbildung 59: Anprallsituation Überblick "BMV17005"

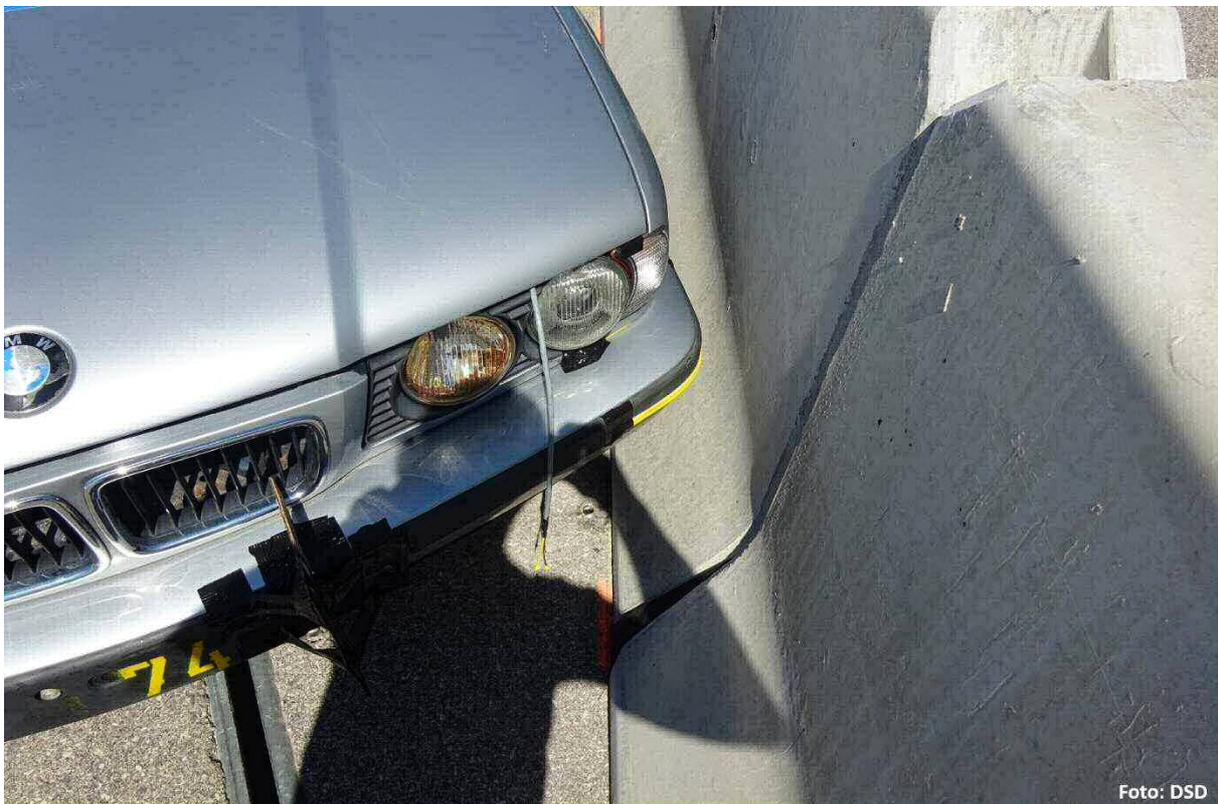


Abbildung 60: Anprallsituation Detail "BMV17005"

6.3 Ergebnisse

6.3.1 Beschreibung des Testverlaufes

Nach dem Erstkontakt (siehe Abbildung 61) wurde das Fahrzeug in Richtung Fahrerseite und nach oben abgelenkt. Das Fahrzeug bewegte sich vom Prüfling weg, hob ab und erreichte eine maximale Flughöhe von ca. 0,6 m. Das Fahrzeug durchflog eine Strecke von ca. drei Fahrzeuglängen und kam nach mehreren Metern Bremsweg zum Stillstand. Die massive Betonwand zur Darstellung eines Tunnelportals wurde vom Fahrzeug in einer Distanz von 0,075m verfehlt und somit nicht berührt. Eine Auswertung des Videomaterials ist in Abbildung 62, Abbildung 63 und Abbildung 64 ersichtlich.



Abbildung 61: Erstkontakt "BMV17005"



Abbildung 62: Videoanalyse Überblick "BMV17005"



Abbildung 63: Videoanalyse Detail "BMV17005"



Abbildung 64: Distanz zwischen Fahrzeug und Tunnelportal

6.3.2 Fotodokumentation nach dem Test

Am Prüfling entstanden an den Kanten leichte Beschädigungen. Die Anprallseite des Prüflings zeigt Schleifspuren. Die Verankerung der Elemente 1 und 6 wurde nicht beschädigt. Der Prüfling bzw. Schäden am Prüfling nach dem Test sind in Abbildung 65, Abbildung 66 und Abbildung 67 ersichtlich.

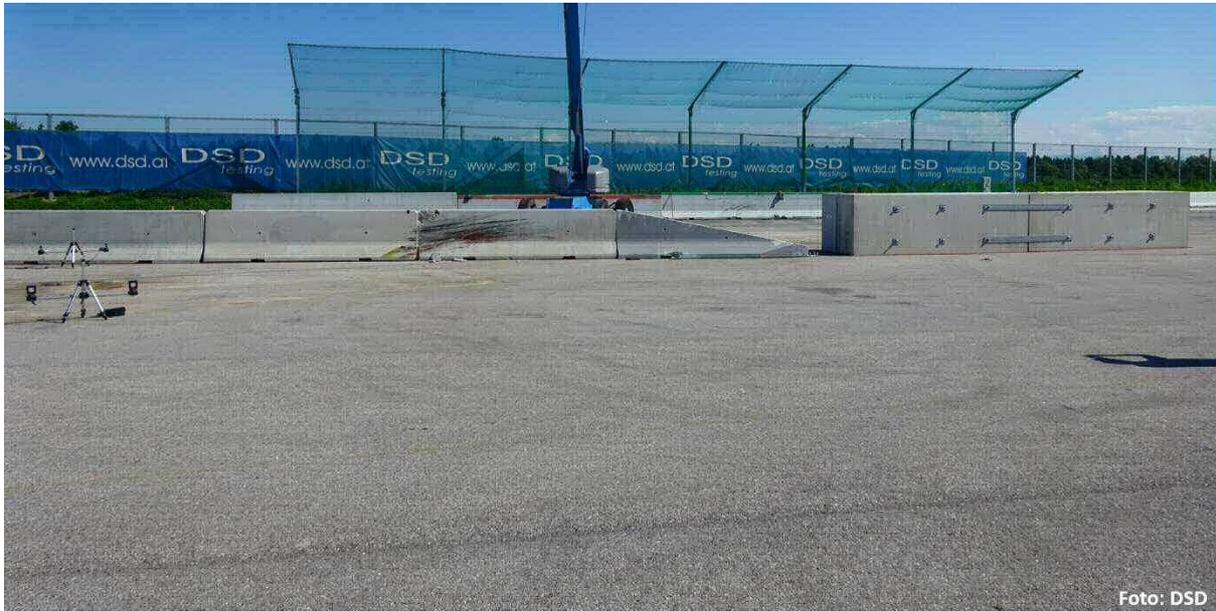


Abbildung 65: Prüfling Überblick "BMV17005"



Abbildung 66: Prüfling Detail 1 "BMV17005"



Abbildung 67: Prüfling Detail 2 "BMV17005"

Durch den Anprall am Prüfling wurde die Fahrzeugfront fahrerseitig deformiert. Motorhaube, Radkasten und Stoßfänger wurden deformiert. Die Windschutzscheibe, sowie die Seitenscheibe fahrerseitig, wurden beschädigt. Die innere Türverkleidung sowie die Seitenscheibe wurden fahrerseitig beim Anprall vom Dummykopf berührt. Die fahrerseitige A-Säule zeigte leichte Verformungen, die Fahrgastzelle blieb jedoch intakt. Beide fahrerseitigen Räder wurden beschädigt. Die fahrerseitige Fahrzeugseite weist Schleifspuren auf. Die Schäden am Fahrzeug nach dem Test sind in Abbildung 68, Abbildung 69 und Abbildung 70 ersichtlich.



Abbildung 68: Fahrzeug in Endlage "BMV17005"



Abbildung 69: Beschädigungen am Fahrzeug "BMV17005"



Abbildung 70: Beschädigungen am Fahrzeug Detail "BMV17005"

6.3.3 Berechnung von Bewertungskriterien

Tabelle 12: Bewertungskriterien "BMV17005"

| Bewertungskriterium | Wert | Einheit |
|---|--------|---------|
| Anprallgeschwindigkeit | 101,40 | km/h |
| Anprallwinkel | 25 | ° |
| Kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung (Δv)* | 17,8 | km/h |
| Theoretical Head Impact Velocity (THIV) | 30,3 | km/h |
| Acceleration Severity Index (ASI) | 1,6 | - |
| Head Injury Criterion (HIC) | 564 | - |

*Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung wurde mit Hilfe von Videoanalysen berechnet. Die angegebenen Werte stellen somit Richtwerte dar.

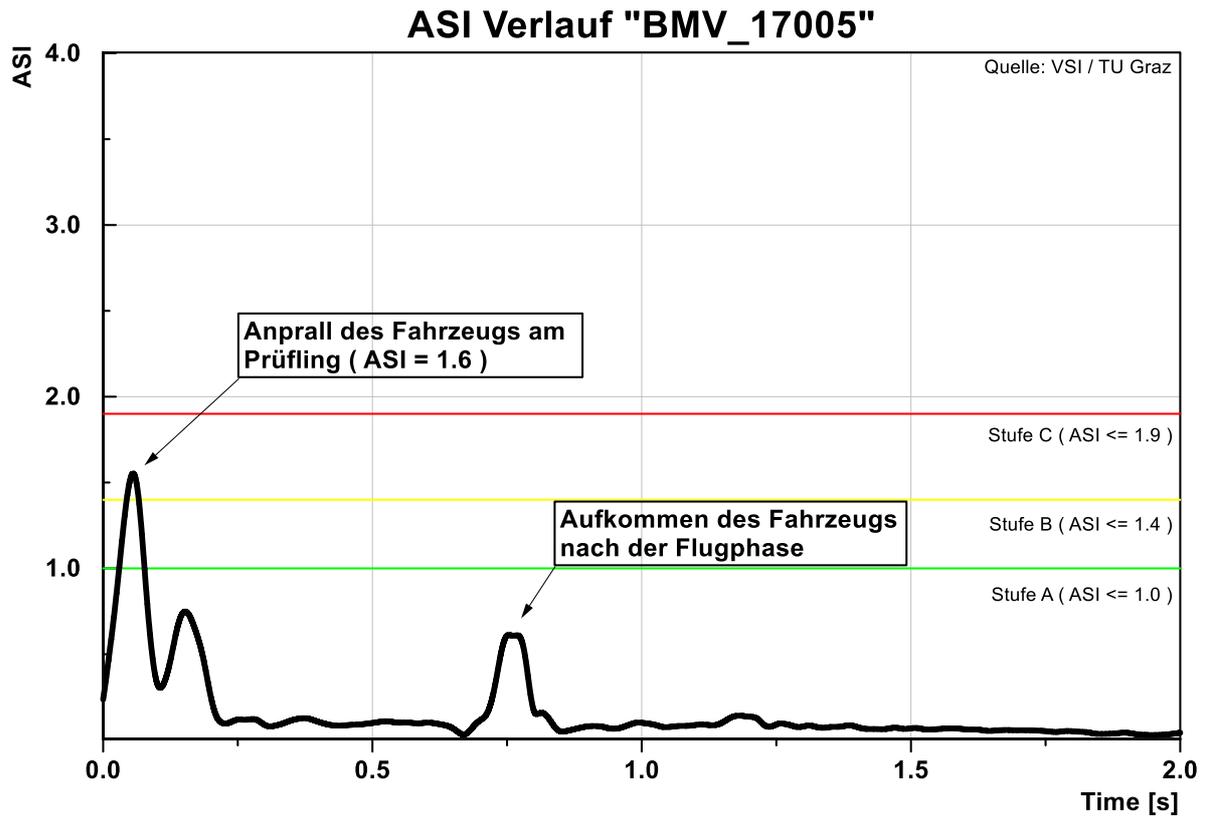


Abbildung 71: ASI-Verlauf (COG) "BMV17005"