

---

# Aspekte für die temporäre Seitenstreifennutzung auf Autobahnen

---

Fachveröffentlichung der  
Bundesanstalt für  
Straßenwesen

---

# Aspekte für die temporäre Seitenstreifennutzung auf Autobahnen

---

von

Matthias Zimmermann, Corinna Auer, Nicolai Förter  
Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen

Claude Weyland, Sebastian Buck  
Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Verkehrswesen

---

## Impressum

Fachveröffentlichung zu Forschungsprojekt: 02.0367  
Aspekte für die temporäre Seitenstreifennutzung auf Autobahnen

Fachbetreuung:  
Dominik Schmitt

Referat:  
Straßenentwurf, Verkehrsablauf, Verkehrsregelung

Herausgeber:  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

<https://doi.org/10.60850/fv-v-02.0367>

Bergisch Gladbach, Juli 2024

Zu diesem Forschungsprojekt werden nur die Kurzfassung und der Kurzbericht veröffentlicht. Die Langfassung des Schlussberichts kann auf Anfrage an [verlag@bast.de](mailto:verlag@bast.de) zur Verfügung gestellt werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben. Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

## Kurzfassung

### Aspekte für die temporäre Seitenstreifennutzung auf Autobahnen

#### Aufgabenstellung

Temporäre Seitenstreifenfreigaben (TSF) haben sich in Deutschland auf rund 380 Streckenkilometern etabliert, um auf regelmäßig überlasteten Autobahnen kurzfristig die Kapazität zu erhöhen (BASt, 2021).

Im Rahmen des FE-Vorhabens werden anhand von 16 in Betrieb befindlichen Anlagen Aspekte der TSF zusammengefasst und daraus Empfehlungen für zukünftige Planungen abgeleitet.

#### Ergebnisse

##### Planerische Aspekte

Bei der Analyse der in den Bundesländern im Detail unterschiedlich ausgeführten Markierungs-, Anzeige- und Beschilderungslösungen können keine belastbaren Unterschiede hinsichtlich Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit festgestellt werden. In einem Workshop mit Vertretern der beteiligten Straßenbauverwaltungen und BMDV/Bast wurden Überarbeitungen der Musterdetailzeichnungen erarbeitet.

##### Betriebsdienst, Streckenkontrolle, Erhaltungsmanagement

Aus den Interviews mit Vertretern der Autobahnmeistereien bzw. der zugehörigen Kontrollräume zeigt sich, dass die Einbindung der TSF-Beschilderung in die betriebliche Praxis zumindest formal unterschiedlich gehandhabt wird. Sofern auch eine SBA vorhanden ist, können die Überkopfsignalisierung zu Fahrstreifensperrungen und deren Vorankündigung gemäß RSA (2021) genutzt werden.

##### Verkehrssicherheit

Die Unfallanalyse ist mehrstufig aufgebaut. Zur Einordnung der Unfallkennwerte der TSF-Strecken wird zunächst mit aggregierten Unfalldaten der BASt eine Analyse der richtungsbezogenen Unfallkennwerte für alle Netzabschnitte auf BAB in Abhängigkeit von deren Streifigkeit und DTV-Werten vorgenommen. Daraus wird vor allem deutlich, dass die ausgewiesenen mittleren Unfallraten für BAB (z.B. 0,08 UP/1 Mio Kfz-km) nur bei DTV-Werten deutlich unterhalb der Einsatzgrenzen von TSF-Strecken gelten und für höhere DTV-Werte eine lineare Zunahme der Unfallkennwerte festzustellen ist. Dieser Zusammenhang ist vor allem für die Gesamteinordnung des Unfallgeschehens auf TSF-Strecken von Bedeutung.

Insgesamt ist festzustellen, dass die UR(P) auf TSF-Strecken tendenziell niedriger liegt als auf Streckenabschnitten mit der gleichen Fahrstreifenanzahl ohne TSF sowie unter Berücksichtigung des jeweiligen DTV. Die Unfallraten aller einbezogenen Unfälle liegen jedoch deutlich höher. Dies deutet daraufhin, dass sich auf TSF-Strecken zwar vermehrt Sachschadensunfälle ereignen, die volkswirtschaftlich relevanteren schwereren Unfälle jedoch zurückgehen.

Eine weitere Auffälligkeit betrifft den Betriebszustand der Anlagen – bei freigegebenen Seitenstreifen liegen die Unfallrate bzw. UR(P) höher als bei gesperrten.

##### Makroskopische Analyse des Verkehrsablaufs

Ziel der Untersuchungen zum Verkehrsablauf ist es, verkehrliche Kenngrößen wie bspw. Kapazitäten auf eine breite Datenbasis vorhandener TSF-Anlagen zu stellen. Hierzu stehen vor allem Untersuchungsstrecken mit 3+1 Fahrstreifen zur Verfügung, welche allesamt mit einer SBA ausgestattet sind. Anknüpfend an die visuelle Analyse von Überlastungen wird sodann eine stochastische Kapazitätsanalyse durchgeführt, welche auf der Untersuchung von Zusammenbrüchen des Verkehrs beruht. Die insgesamt auf eine breitere Datenbasis gestellten 3+1 Strecken zeigen eine gute Übereinstimmung mit den im HBS (2015) angegebenen Kapazitätswerten von im Mittel ca. 5.000 Kfz/h bei geschlossener und ca. 6.800 Kfz/h bei geöffneter TSF. Mikroskopische Analyse des Verkehrsablaufs

Die Einsatzgrenzen verschiedener Ein- und Ausfahrttypen zu Beginn, innerhalb und am Ende von TSF werden mit Hilfe von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen untersucht. Dabei bestätigt sich die Erwartung, dass die zweistreifigen Ein- und Ausfahrten ihre Stärken im Bereich von hohen Einfahr- bzw. Ausfahranteilen ausspielen. Bei einstreifigen Aus- bzw. Einfahrten ist in den meisten Fällen eine Durchführung der Seitenstreifenfreigabe über die Anschlussstelle hinweg vorzuziehen.

#### Wirtschaftlichkeit

Bezüglich des Bewertungstools AVP stand innerhalb des Forschungsvorhabens dessen Eignung im Fokus, damit bundeseinheitlich Wirkungen einer TSF darzustellen; gleichzeitig sollte das Programm nicht strukturell angepasst werden. Sowohl was eine realistischere Abbildung der verkehrlichen Nutzen über vermiedene Staubelastungen angeht als auch z. B. die Einbeziehung standardisierter Unfallkostensätze, sollte eine Aktualisierung auch der Struktur von AVP geprüft werden.

#### Fazit

Insgesamt zeigt sich sowohl aus der umfangreichen Datenüberlagerung mit Analyse der Verkehrssicherheit und des Verkehrsablaufs sowie den weiteren Erkenntnissen aus Interviews, dass die untersuchten TSF-Streckenabschnitte ein gut funktionierendes Gesamtsystem darstellen.

Unterschiede in Abhängigkeit von der technischen Ausstattung – insbesondere dem Vorhandensein von SBA – sind mit dem Streckenkollektiv nicht nachweisbar, allerdings liegen auch nahezu keine Strecken vor allem aus der jüngeren Vergangenheit vor, die keine SBA beinhalten. Die Anlagen ohne SBA weisen besondere Randbedingungen auf, sodass nicht ableitbar ist, dass ihre Wirkungsweise mit denen mit SBA identisch sind.

# **Abstract**

## **Aspects of temporary hard shoulder use on highways**

### **Task**

Temporary hard shoulder use (THSU) is established on around 380 highway kilometers in Germany. They achieve a short-term increase of the capacity on highways that are congested on a regular basis (BAST, 2021).

This project will summarize aspects of THSU on the basis of 16 existing sections and derive recommendations for future planning.

### **Results**

#### Planning aspects

In the analysis of road markings, display and signage solutions implemented slightly differently in the federal states, no resilient differences can be identified with regard to traffic flow and traffic safety. In a workshop with representatives of the road construction authorities involved and BMDV/Bast, revisions of the model detail designs were developed.

#### Operational service, route control, maintenance management

The interviews with representatives of the freeway maintenance authorities and the associated control rooms show that the integration of THSU signage into operational practice is handled differently, at least in formal terms. If variable message signs (VMS) are available, the overhead signaling for lane closures and their preannouncements can be used in accordance with RSA (2021).

#### Road safety

In order to assess the accident characteristic values on THSU sections the accident analysis consists of several stages. First, the direction-related accident characteristic values for all network sections on national highways (BAB) are analysed using aggregated accident data from BAST, with regard to their number of lanes and their AADT values. This shows that the average accident rates for BAB (e.g. 0.08 accidents involving personal injury/1 million vehicle-km) are only valid for AADT values significantly below the operational limits of THSU sections. For higher AADT values, there is a linear increase in the accident characteristic values. This correlation is particularly important for the overall assessment of accidents on THSU sections.

Overall, it can be seen that the rate of accidents involving personal injury AR(P) on THSU sections tends to be lower than on sections with the same number of lanes, but without THSU, while taking the respective AADT into account. However, the accident rates of all accidents are significantly higher on THSU sections. This indicates that although more property damage accidents occur on THSU sections, the more economically relevant serious accidents decline.

Moreover, the operating condition of the facilities is conspicuous – for opened hard shoulders, the rate of accidents or the AR(P) are higher than for blocked ones.

#### Macroscopic analysis of the traffic flow

The aim of the traffic flow studies is to derive traffic parameters such as capacities on a broad data basis of existing THSU systems. For this purpose, the study focuses on sections with 3+1 lanes, all of which are equipped with an VMS. After the visual analysis of congestion, a stochastic capacity analysis is carried out, which is based on the investigation of traffic collapses. The 3+1 sections, for which there is a broad data basis, show high conformity with the capacities given in the HBS (2015) of on average about 5,000 motor vehicles/h with the THSU closed and about 6,800 motor vehicles/h with the THSU open.

#### Microscopic analysis of the traffic flow

The application limits of different entry and exit types at the beginning, within and at the end of THSU are investigated by means of microscopic traffic flow simulations. These confirm

the expectation that two-lane entrances and exits exploit their strengths regarding high entry and exit shares. With single-lane exits and entrances, it is preferable to include the interchange in the THSU in most cases.

#### Economic efficiency

With regard to the evaluation tool „AVP“, the research project focused on evaluating its suitability for presenting the effects of a THSU in a uniform manner throughout Germany. At the same time, the program was not to be structurally adapted. An update of the structure of AVP was examined with regard to a more realistic representation of the traffic benefits due to avoided congestion loads and, for example, the inclusion of standardized accident cost rates.

#### **Conclusion**

Overall, both the extensive data overlay with analysis of traffic safety and traffic flow and the additional findings from interviews show that the examined THSU roadway sections represent a well-functioning system.

Differences due to the technical equipment – in particular the presence of VMS – are not detectable within this roadway collective. However, there are also almost no roadways, especially from the recent past, that do not contain VMS. The sections without VMS have special boundary conditions, so that it cannot be deduced that their operation is identical to those with VMS.

## **Kurzbericht**

# **Aspekte für die temporäre Seitenstreifennutzung auf Autobahnen**

### **Aufgabenstellung**

Temporäre Seitenstreifenfreigaben (TSF) haben sich in Deutschland auf rund 380 Streckenkilometern etabliert, um auf regelmäßig überlasteten Autobahnen kurzfristig die Kapazität zu erhöhen (BASt, 2021). TSF stellen dabei eine Möglichkeit dar, nicht nur Staus durch Überlastung zu vermeiden, sondern gleichzeitig den Verkehr zu homogenisieren und das Unfallrisiko zu reduzieren. Hierfür wird der Seitenstreifen zeitweise für den fließenden Verkehr freigegeben, während die eigentliche Funktion des Seitenstreifens, die Verkehrssicherheit durch das Aufnehmen von Pannenfahrzeugen zu gewährleisten und dem Betriebsdienst einen Arbeitsraum zu stellen, stark eingeschränkt wird (RAA, 2008). Auch deswegen kommt eine Freigabe des Seitenstreifens nur auf Streckenabschnitten in Frage, deren regelgerechter Ausbau im Bedarfsplan vorgesehen ist (ARS 20/2002).

Im Rahmen des FE-Vorhabens werden anhand von 16 in Betrieb befindlichen Anlagen Aspekte der TSF zusammengefasst und daraus Empfehlungen für zukünftige Planungen abgeleitet.

Zum Abschluss werden die bestehenden Musterdetailzeichnungen zu TSF diskutiert und mögliche Anpassungen vorgeschlagen.

### **Untersuchungsmethode**

Die Streckenauswahl beinhaltet primär dreistreifige Streckenabschnitte mit Streckenbeeinflussungsanlage (SBA) im Ballungsraum, aber auch zweistreifige Streckenabschnitte mit/ohne SBA und bildet die aktuell gängigsten Gestaltungsvarianten ab. Für die Analyse der vielfältigen Aspekte zu TSF werden von den Ländern Unfall-, Verkehrs- und TSF-Daten zur Verfügung gestellt, welche über die Uhrzeit kombiniert weitgehende Untersuchungen ermöglichen. Diese werden um Planungsunterlagen sowie zusätzliche Informationen und Erfahrungen aus Interviews ergänzt.

Zu den planerischen Aspekten von TSF werden RE-Unterlagen und die zugehörigen Unterlagen für den Wirtschaftlichkeitsnachweis hinsichtlich der Anlagenrandbedingungen, der Gestaltungselemente, und der Unterlagenstruktur analysiert. Parallel werden Interviews in der Straßenbauverwaltung und mit dem BMDV geführt, um sowohl die Blickweise beim Entwurf als auch beim Erteilen des Sichtvermerks zu erfassen.

Praxiserfahrungen sowie Chancen und Risiken, die sich für den Betriebsdienst aus der Seitenstreifenumnutzung ergeben, werden mit einem Fragenkatalog erhoben und anschließend in einer landesweit gebündelten Diskussionsrunde in den Autobahnmeistereien besprochen. Der Erhebungsschwerpunkt liegt bei den Folgen, die sich aus den Freigabezeiten oder aus der verkehrsabhängigen Freigabe ergeben, und bei Veränderungen im betrieblichen Aufwand.

Hinsichtlich der Verkehrssicherheit steht insbesondere im Fokus, das Sicherheitsniveau auf Strecken mit einer TSF gegenüber Strecken mit drei bzw. vier Fahrstreifen zu vergleichen. Ferner werden belastbare Kenngrößen in Bezug zu konkreten Schaltzuständen ermittelt. Hierfür werden die Unfalldaten mit den zeitlich exakt zugeordneten Daten aus TSF und SBA verknüpft und ausgewertet. Für Detailfragen, insbesondere zu vorherrschenden Unfallkonstellationen bei verschiedenen Schaltzuständen, werden auch Unfallhergangstexte ausgewertet, sofern diese verfügbar sind.

Um Aussagen zur Wirkungsweise der Anlagen unter verschiedenen Randbedingungen zu treffen, werden die verkehrlichen Anlagenrandbedingungen wie bspw. die Kapazitäten aus den Verkehrsdaten bestimmt und die q-v-Diagramme der Anlagen ausgewertet. Darüber hinaus werden in den Bundesländern Informationen zur Anlagenschaltung abgefragt und die Akzeptanz der Anlagen anhand der Fahrstreifenaufteilung ermittelt.

Der mikroskopische Verkehrsfluss wird an jeweils drei verschiedenen typischen Ein- und Ausfahrttypen simuliert. Somit können Belastungsgrenzen definiert werden, innerhalb welcher die verschiedenen Ein- und Ausfahrttypen sinnvoll angewendet werden können.

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird einerseits die Wirkungsweise der Software AVP getestet, indem einzelne Parameter variiert werden und der Effekt auf die Gesamtbetrachtung abgeschätzt wird. Bspw. werden aktualisierte und feiner abgestufte Unfallraten vorge schlagen, die die Verkehrssicherheit auf TSF-Strecken differenzierter abbilden.

## **Ergebnisse**

### Planerische Aspekte

Aus den analysierten RE-Unterlagen und Interviews lassen sich verschiedene Hinweise ableiten. Die wichtigsten davon sind im Folgenden aufgeführt.

Aus den RE-Unterlagen geht hervor, dass TSF primär eingerichtet werden, um die Leistungsfähigkeit in der Spitzenstunde auf dem Streckenabschnitt zu verbessern. Dies betrifft in der Regel den Berufsverkehr, lediglich auf zwei Streckenabschnitten sind dies die Reisezeiten am Wochenende bzw. in den Ferien. Eine weitere Strecke dient vor allem dem Zweck, den Verkehr im Steigungsbereich aufgrund der Geschwindigkeitsdifferenz zu entflechten.

Im ARS 20/2002 wird für die Umnutzung des Seitenstreifens u. a. als Voraussetzung genannt, dass mit dem HBS (2001) nachzuweisen ist, dass die Verkehrsqualität in mindestens 30 h schlechter als QSV D ist. Im HBS (2015) ist hingegen die Verkehrsstärke der 50. höchstbelasteten Stunde des Jahres für die verkehrstechnische Bemessung maßgebend. Bei einer möglichen Anpassung sollte diese Bemessungsverkehrsstärke auch für TSF zugrunde gelegt werden. Darüber hinaus soll der DTV bei vierstreifigen Strecken im gesamten Querschnitt mindestens 65.000 Kfz/24 h betragen, für 6-streifige Strecken liegt bislang kein Mindest-DTV vor. Da vermehrt dreistreifige Strecken mit TSF ausgestattet werden, für die tlw. auch mit den oben genannten Grenzwerten argumentiert wird, wird empfohlen, auch für 6-streifige Querschnitte Grenzwerte festzulegen.

Im Rahmen der Interviews wird aus den Erfahrungen der Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen aus der Straßenbauverwaltung auf verschiedene technische Komponenten hingewiesen, die den Verkehrsablauf oder die Verkehrssicherheit positiv beeinflussen könnten und zu einer standardisierten Gestaltungsbildung führen würden. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Meinungen zu einzelnen Punkten sehr heterogen sind. Da im Rahmen der Interviews ausschließlich Meinungen abgefragt und gegenübergestellt wurden, sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich, um belastbare Ergebnisse insbesondere zur Wirtschaftlichkeit der Komponenten zu erzielen. Nachfolgend werden die von den Straßenbauverwaltungen meistgenannten Aspekte dargestellt und jeweils vom Forschungsnehmer (*kursiv*) bewertet.

- Statt Prismenwendern sollten LED-Anzeigen für die TSF-Verkehrszeichen angewendet werden: Wenn Prismenwender genutzt werden, dann sollte eine vertikale Anordnung der Lamellen geprüft werden, um die Anzeige für einzelne Fahrstreifen anpassen zu können.  
*LED-AQ sind aktueller Stand der Technik und sollten daher bevorzugt werden.*
- Einheitliches Anordnen oder Nicht-Anordnen des roten Kreuzes zum Verdeutlichen der Fahrstreifensperrung.  
*Da keinerlei Unterschied im Fahrverhalten bzw. Unfallgeschehen erkennbar ist, hat diese Einheitlichkeit keine Priorität. Eher sollten Gewöhnungseffekte an bestehenden Strecken nicht in Frage gestellt werden.*
- Einheitlicher AQ-Abstand über alle Länder, jedoch weiterhin Anpassung an die vorhandenen Sichtverhältnisse.  
*Forderung nach einheitlichem Abstand in den Ergebnissen nicht abgebildet, daher keine Bewertung*
- Dass Fahrzeuge den Standstreifen nach dem Anlageneende aufgrund einer nicht eindeutigen Markierung und Beschilderung befahren, muss vermieden werden. Daher fließen die Hinweise zum Aufstellort für das Z 223.2 StVO (Seitenstreifen nicht mehr

befahren) in die Diskussion zu den überarbeiteten Musterdetailzeichnungen ein (Kapitel 10) *Vorschläge in Musterzeichnungen, insbesondere die Warnlinie am Ende der Einfahrt wird als Möglichkeit gesehen, Fehlbefahrungen einzudämmen.*

- Die Markierung der Verziehung vom Ausfädelungsstreifen auf die Ausfahrrampe sowie die Markierung der Verziehung vom Einfädelungsstreifen auf die Hauptfahrbahn soll in Zukunft mit einer Leitlinie von 4 m Strich und 2 m Lücke (als Schmalstrich) ausgeführt werden, deren Position zur optischen Führung analog zum Regelplan 16b der RMS-A verbleibt. An den Stellen, an denen bislang in Fortführung der Seitenstreifennutzung Fahrstreifenbegrenzungen überfahren werden mussten, soll in Zukunft auf diese verzichtet werden.

*Gemeinsam mit Betreuerkreis und Experten erarbeitet*

#### Wirtschaftlichkeit/AVP

Mit der Dokumentation zur Software könnte verstärkt der Hinweis gegeben werden, dass AVP auch als Planungstool genutzt werden kann, um bspw. verschiedene Varianten zu berechnen.

Anhand der geführten Wirtschaftlichkeitsnachweise erfolgter Planungen von TSF-Strecken ist zu erkennen, dass der Nachweis durchgängig auf dem Verfahren der BAST basiert, das auch in die Bewertung mit AVP einfließt. Zum Zeitpunkt des Interviews mit dem BMDV ist der Wirtschaftlichkeitsnachweis nicht zwingend mit AVP zu erbringen. Wenn die Software in den meisten Fällen genutzt wird, kann eine bessere Vergleichbarkeit erreicht werden und der Prozess vereinfacht werden.

#### Betriebsdienst, Streckenkontrolle, Erhaltungsmanagement

Aus den Interviews mit Mitarbeitenden der Autobahnmeistereien bzw. der zugehörigen Kontrollräume zeigt sich, dass die Einbindung der TSF-Beschilderung in die betriebliche Praxis zumindest formal unterschiedlich gehandhabt wird.

Unabhängig von der konkreten Beschilderung dieser Situationen können die Zeitfenster für Arbeiten des Straßenbetriebsdienstes deutlich ausgeweitet werden. An vielen TSF-Strecken sind die Verkehrsbelastungen zwischen den Morgen- und Abendspitzen so hoch, dass auch zu diesen Zeiten die Wegnahme eines Fahrstreifens zu Verkehrsstörungen führen würde, die durch die Freigabe des Seitenstreifens vermieden werden können. Für diesen wesentlichen betrieblichen Nutzen von TSF ist das gleichzeitige Vorhandensein einer SBA keine Voraussetzung. Selbstverständlich ist eine SBA durch ihre besseren Eingriffsmöglichkeiten in den fließenden Verkehr sowie die Möglichkeit, Fahrstreifenperrungen voranzukündigen und zu vollziehen, auch für den Betriebsdienst wie auch im Kontrollraum vorteilhaft, aber keine Voraussetzung.

Sofern auch eine SBA vorhanden ist, ergeben sich vielmehr mögliche Vorteile in der Ausnutzung der angesprochenen Überkopfsignalisierung zu Fahrstreifenperrungen und deren Vorankündigung. In die RSA (2021) wurde gegenüber der RSA-95 in Teil D, Kapitel 3 folgender Absatz (3) neu eingefügt: „Anordnungen von Verkehrszeichen mittels Verkehrsbeeinflussungsanlagen sollten in die Sicherung von Arbeitsstellen einbezogen werden, soweit ihre Funktionalitäten dies zulassen und die Regelungen dieser Richtlinie damit umgesetzt werden können. Zur Einbeziehung von Streckenbeeinflussungsanlagen in Arbeitsstellen kürzerer Dauer vgl. RWVZ. Bei ausreichend dichter Abfolge der Anzeigequerschnitte können Streckenbeeinflussungsanlagen die Funktion der Vorwarnung vollständig übernehmen.“

Um Mehraufwand bei der Gehölzpflege und im Grünschnitt zur Freihaltung von Kamerasisichtfeldern zu begegnen, sollte bereits während der Planung der Seitenstreifenfreigabe das Freihalten von Sichtbereichen berücksichtigt werden.

#### Verkehrssicherheit

Da im vorliegenden Projekt diverse Aspekte von TSF untersucht werden, liegen in diesem Vorhaben erstmalig für 16 Strecken vielfältig überlagerte Datensätze zu den TSF-Anlagen vor. Diese beinhalten zusätzlich zu den Unfalldaten die minutenfeinen, fahrstreifenbezogenen Verkehrsdaten wie auch die Schaltdaten der TSF über zwei Jahre. Somit können diese

drei Datensätze bundeslandspezifisch über das Datum und die Uhrzeit kombiniert werden, um eine einheitliche Datengrundlage zu erhalten. Dies hat den Vorteil, dass in der Auswertung nicht nur Unfallkenngrößen für einen Streckenabschnitt mit TSF bestimmt werden können, sondern die Analyse differenziert nach dem jeweiligen Betriebszustand aufgebaut werden kann. Um zu vermeiden, dass Unfälle durch mögliche Ungenauigkeiten in der Unfalldokumentation einem falschen Schaltzustand zugeordnet werden, werden Unfälle markiert, die sich in den 25 min. vor bzw. nach einem Schaltwechsel der TSF ereignen. Die Unfälle werden dem Status „Übergang“ zugeordnet und ausschließlich in den vom Schaltzustand unabhängigen Unfallkennzahlen berücksichtigt.

Die Unfallanalyse ist mehrstufig aufgebaut. Zunächst werden bundesweite DTV-abhängige Unfallkennwerte ermittelt, um die Verkehrssicherheit von TSF-Strecken gegenüber herkömmlichen Strecken mit drei bzw. vier Fahrstreifen ohne TSF einordnen zu können. Anschließend wird ein Zusammenhang zur Verkehrsstärke hergestellt und auf die Unfallkenngrößen bezogen auf den Schaltzustand eingegangen. Des Weiteren wird das Kapitel durch eine qualitative Analyse von Unfallhergangstexten bei freigegebenen TSF ergänzt. In der dritten Stufe werden Streckenbeginn und die Anschlussstellen im Streckenverlauf auf Unfallsauffälligkeiten untersucht.

Zur Einordnung der Unfallkennwerte der TSF-Strecken wird zunächst mit aggregierten Unfalldaten der BAST eine Analyse der richtungsbezogenen Unfallkennwerte für alle Netzabschnitte auf BAB in Abhängigkeit von deren Streifigkeit und DTV-Werten vorgenommen. Daraus wird vor allem deutlich, dass die ausgewiesenen mittleren Unfallraten für BAB (z. B. 0,08 UP/1 Mio. Kfz-km) nur bei DTV-Werten deutlich unterhalb der Einsatzgrenzen von TSF-Strecken gelten und für höhere DTV-Werte eine lineare Zunahme der Unfallkennwerte festzustellen ist. Dieser Zusammenhang ist vor allem für die Gesamteinordnung des Unfallgeschehens auf TSF-Strecken von Bedeutung.

Insgesamt ist festzustellen, dass die UR(P) auf TSF-Strecken tendenziell niedriger liegt als auf Streckenabschnitten mit der gleichen Fahrstreifenanzahl ohne TSF und vergleichbarem DTV. Die Unfallraten aller einbezogenen Unfälle liegen jedoch deutlich höher. Dies deutet darauf hin, dass sich auf TSF-Strecken zwar vermehrt Sachschadensunfälle ereignen, die volkswirtschaftlich relevanteren schwereren Unfälle jedoch zurückgehen.

Insbesondere die Unfallrate bei Freigabe weist eine deutlich größere Streuung und eine stärkere Abhängigkeit von der Verkehrsstärke auf als bei Sperrung des Seitenstreifens. So fällt die mittlere UR(Freigabe) von 2,3 U/10<sup>6</sup>\*Kfz\*km bei einer Verkehrsstärke von bis zu 4.000 Kfz/h und das Intervall bei besonders hohen Verkehrsstärken ab 6.500 Kfz/h auf. Gleiches trifft auf die UR(P) (Freigabe) zu.

Dies spricht dafür, dass es eine Grundbelastung an Unfällen mit Personenschaden gibt. In den Intervallen zwischen 4.000 und 5.000 Kfz/h wird die gesamte UR aber primär durch Sachschadensunfälle beeinflusst. Dies betrifft die Zeiträume, in denen der Seitenstreifen freigegeben ist, und Zeiträume mit einer besonders hohen verkehrlichen Belastung.

Die UR(P) und UR bei Sperrung weisen im Intervall der Verkehrsstärke bis 4.000 Kfz/h tendenziell einen höheren Unfallkennwert auf und stabilisieren sich dann auf einem durchschnittlichen Niveau von ca. 0,04 U(P)/10<sup>6</sup>\*Kfz\*km und 0,21 U/10<sup>6</sup>\*Kfz\*km. Dies wird auch von PÖPPEL-DECKER et al. (2003) als durchschnittliche Unfallrate in einem mittleren Belastungsbereich auf dreistreifigen Richtungsfahrbahnen festgestellt.

Insgesamt zeigt sich auf den Untersuchungsstrecken ein stark divergierendes Sicherheitsniveau. Auf Streckenabschnitten mit 3+1 Fahrstreifen liegt die Unfallrate und weniger stark ausgeprägt auch die UR(P) auf der Vorlaufstrecke gegenüber der Strecke mit TSF höher. Eine weitere Auffälligkeit betrifft den Betriebszustand der Anlagen – bei freigegebenen Seitenstreifen liegt die Unfallrate bzw. die UR(P) höher als bei gesperrten.

Auf den zweistreifigen Streckenabschnitten mit TSF ist auf der Gesamtstrecke ein gleichmäßiges Niveau der UR(P) = 0,07 U(P)/Mio. Kfz km festzustellen, welches im Nachlauf geringfügig niedriger und im Vorlauf höher liegt. Die Unfallrate liegt für die betrachteten Streckenabschnitte gleichfalls unabhängig vom Schaltzustand bei 0,23 U/Mio. Kfz-km, dabei ist die Unfallrate sowohl im Vor- als auch Nachlauf erhöht.

Da die Dokumentation der Schaltzustände in den vorliegenden Unfallhergangstexten nicht durchgängig enthalten ist, kann eine Analyse der konkreten Hergänge nur für die Unfälle im Bereich des Seitenstreifens und ersten regulären Fahrstreifens bei freigegebenem Seitenstreifen erfolgen. In diesem Bereich treten deutlich häufiger Unfälle beim Wechsel vom ersten Fahrstreifen auf den Seitenstreifen auf als umgekehrt, auch sind deutlich mehr Unfälle beim Fahrstreifenwechsel zu verzeichnen als durch Auffahren. Darüber hinaus sind in diesen Konstellationen deutlich mehr Lkw und vor allem Sattelzüge als Beteiligte 1 zu verzeichnen als im Durchschnitt über alle Unfälle, während die Unfallbeteiligten 2 mit einem hohen Anteil an Pkw ähnlich verteilt sind wie üblich.

Auffällig sind textliche Hinweise, dass Fahrzeugführende bei drohender Kollision auf dem Seitenstreifen z. B. bei Fahrstreifenwechseln auszuweichen versuchen, dies wegen der häufig anzutreffenden Fahrzeugrückhaltesysteme unmittelbar neben dem Seitenstreifen jedoch nicht möglich ist. Einzelne Texte lassen auch vermuten, dass durch entsprechende Fahrzeugreaktionen insbesondere beim Schwerverkehr möglicherweise schwerwiegendere Folgen resultieren als bei vergleichbaren Situationen auf regulären Fahrstreifen.

Da sich in den Darstellungen zur Verteilung der Unfälle im Streckenverlauf einzelne Infrastrukturelemente als stärker unfallauffällig herausgestellt haben, wird untersucht, ob Markierung und Kennzeichnung des Streckenbeginns einen Einfluss auf die Verkehrssicherheit haben. Hierfür wird der Streckenbeginn der Untersuchungsstrecken klassifiziert und die häufigsten Varianten ausgewählt. Für die Auswahl werden die häufigsten Unfalltyp-Art-Kombinationen über die Unfallrate gegenübergestellt, um eine systematische Aussage zur Auswirkung der zwei häufigsten Gestaltungsvarianten zu treffen. Da sich die Randbedingungen der zwei Kollektive wie auch der einzelnen Untersuchungsstrecken aber stark unterscheiden bzw. die beiden Kollektive grundsätzlich deutlich unterschiedliche Unfallraten aufweisen, lassen sich nur allgemeine Aussagen innerhalb der Strecken ableiten, jedoch keine Aussage zu Auswirkungen unterschiedlicher Kennzeichnungen des TSF-Beginns treffen.

Auch für die sieben Anschlussstellen (AS) innerhalb der Strecken ist festzustellen, dass das Unfallgeschehen sehr streckenabhängig ausgeprägt ist. Dies lässt eine Verallgemeinerung der Aussagen für Anschlussstellen kaum zu. Auf Streckenabschnitten mit einer allgemein niedrigen Unfallrate sind auch die Anschlussstellen wenig unfallauffällig, während auf den stärker unfallbelasteten Streckenabschnitten auch die Anschlussstellen durch höhere Unfallraten auffallen. Ergänzend kommt auf den Streckenabschnitten, auf denen sich die Unfallrate je nach Betriebszustand bereits unterscheidet, dieser Aspekt im Bereich der AS noch stärker zum Tragen. Dies lässt sich durch zusätzliche Verflechtungsvorgänge begründen, die sich tlw. auch durch zusätzliche Unfälle beim Einbiegen zeigen. Somit bestätigt sich die Aussage von LEMKE (2007), dass das Sicherheitsniveau vom jeweiligen Streckenabschnitt abhängt und insbesondere Knotenpunkte vor der Anlage einer TSF einer Sicherheitsanalyse unterzogen werden sollten.

#### Makroskopische Analyse des Verkehrsablaufs

Ziel der Untersuchungen zum Verkehrsablauf ist es, verkehrliche Kenngrößen wie bspw. Kapazitäten auf eine breite Datenbasis vorhandener TSF-Anlagen zu stellen. Hierzu stehen vor allem Untersuchungsstrecken mit 3+1 Fahrstreifen zur Verfügung, welche allesamt mit einer SBA ausgestattet sind. Hierzu werden die Anlagen zunächst hinsichtlich ihrer verkehrlichen und betrieblichen Randbedingungen gegenübergestellt, charakterisiert und mit Streckenabschnitten mit drei oder vier Fahrstreifen verglichen. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass Vor- und Nachlauf der TSF-Strecken nur bedingt berücksichtigt werden konnten. Insbesondere lagen bei einem Großteil der Strecken stromaufwärts Autobahnknotenpunkte mit sehr hohen Ein- und Ausfahranteilen vor, die in dieser Analyse nicht abgebildet werden konnten.

Dazu werden zunächst maximale Verkehrsstärken, SV-Anteile sowie DTV-Werte eines repräsentativen Querschnitts der im Untersuchungskollektiv enthaltenden Strecken ermittelt sowie die zeitliche Verteilung der Anlagenöffnungen – und -schließungen – über den Tagesverlauf betrachtet. Hierbei zeigen sich gewisse Muster hinsichtlich des Betriebes der Anlagen, welche in vier Grundtypen unterschieden werden. In diesen Grundmustern spie-

geln sich die tageszeitlich vorkommenden Kapazitätsengpässe wider, aus denen sich letztlich auch die Notwendigkeit der Freigabe des Seitenstreifens ergibt. Einige der Anlagen weisen hierbei sehr ausgeprägte vor- bzw. nachmittägliche Peaks auf, bei anderen Anlagen ist die tageszeitliche Verteilung der Freigabe und Schließung der TSF stärker ausdifferenziert.

Aufbauend auf diesen Informationen zu den verkehrlichen und betrieblichen Randbedingungen der Anlagen werden q-v-Diagramme für die beiden Zustände der freigegebenen und gesperrten TSF erzeugt, um diese hinsichtlich ihrer Gestalt sowie vorhandener Überlastungen zu untersuchen. Dabei zeigt sich, dass zwar z. T. auch bei freigegebenem Seitenstreifen Verkehrszustände im Bereich des gestauten Verkehrs vorhanden sind, diese jedoch nur auf äußerst stark belasteten Streckenabschnitten mit DTV-Werten von über 73.000 Kfz/h auftreten und überwiegend aus Rückstauwirkungen aus stromabwärts liegenden Engpässen resultieren.

Anknüpfend an die visuelle Analyse von Überlastungen wird sodann eine stochastische Kapazitätsanalyse durchgeführt, welche auf der Untersuchung von Zusammenbrüchen des Verkehrs beruht. Die Einteilung in zensierte und unzensierte Intervalle dient dazu, eine Schätzfunktion für die Verteilungsfunktion der Kapazität zu ermitteln. Diese auf 5-Minuten-Intervallen aufbauenden Kapazitätswerte werden sodann in Stunden-Intervalle transformiert, um hierbei eine Vergleichbarkeit zu den im HBS (2015) hinterlegten Kapazitätswerten herstellen zu können. Die insgesamt auf eine breitere Datenbasis gestellten 3+1-Strecken zeigen dabei eine gute Übereinstimmung mit den im HBS (2015) angegebenen Kapazitätswerten von im Mittel ca. 5.000 Kfz/h bei geschlossener und ca. 6.800 Kfz/h bei geöffneter TSF. Es muss berücksichtigt werden, dass im Rahmen des Forschungsprojektes die Längsneigung der untersuchten Querschnitte nicht systematisch analysiert wurde. Allerdings finden sich in den untersuchten Anlagen auch keine ausgeprägten Steigungsstrecken wie z. B. die erst während der Projektlaufzeit eingerichtete TSF auf der A 8 östlich des Dreiecks Karlsruhe.

Im Hinblick auf die im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung durchgeführten AVP-Tests wird im Rahmen der verkehrlichen Analyse außerdem eine Modellierung der q-v-Beziehung mithilfe der Modellfunktion nach BRILON und PONZLET (1995) durchgeführt und die entsprechenden Parameterwerte ermittelt, um die realen Kurvenbeziehungen an ausgewählten Untersuchungsstrecken in AVP zu hinterlegen. Dies geschieht vor dem Hintergrund eines Vergleichs gegenüber den standardisierten Kurvenbeziehungen.

Im Rahmen der verkehrlichen Analyse wird außerdem eine Betrachtung der Akzeptanz im Sinne einer vergleichenden Betrachtung der idealtypischen Fahrstreifenaufteilung drei- bzw. vierstreifiger Richtungsfahrbahnen gegenüber TSF-Strecken durchgeführt. Dies erfolgt in Abhängigkeit von der Gesamtverkehrsstärke im Querschnitt. Dabei zeigen sich bei den untersuchten TSF-Strecken nahezu identische Fahrstreifenaufteilungen wie auf drei- bzw. vierstreifigen Richtungsfahrbahnen für vergleichbare Verkehrsstärkebereiche. Dies deutet auf eine ähnliche Akzeptanz des Seitenstreifens wie der eines regulären rechten Fahrstreifens hin.

Neben der grundsätzlichen verkehrlichen Betrachtung der Untersuchungsstrecken wird eine spezifische Betrachtung und Bewertung des Verkehrsablaufs um die Zeitpunkte der Freigabe und Sperrung der TSF durchgeführt. Dazu wird einerseits auf der Basis einer Abfrage der Schaltinformationen der Verkehrsleitzentralen ein Prozess erarbeitet, in welchen Schritten und unter welchen Prüfbedingungen und Kennwerten die Freigabe bzw. Rücknahme der Freigabe des Seitenstreifens erfolgt. Anschließend werden q-v-Diagramme um die Öffnungs- und Schließungszeiträume erstellt und die darin vorzufindenden Verkehrszusammenbrüche analysiert. Insgesamt lässt sich basierend auf den betrachteten Querschnitten festhalten, dass weder die Zeiträume kurz nach Freigabe noch nach Schließung der Anlage vermehrt von Verkehrszusammenbrüchen geprägt sind.

### Mikroskopische Analyse des Verkehrsablaufs

Die Einsatzgrenzen verschiedener Ein- und Ausfahrttypen im Bereich von TSF werden mit Hilfe von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen in PTV Vissim untersucht. Dazu werden Laborstrecken folgender Ein- und Ausfahrttypen aufgebaut:

- Beginn einer TSF (Einfahrttypen E1 und E4)
- Anschlussstelle innerhalb einer TSF (Einfahrttyp E1 und Ausfahrttyp A1)
- Ende einer TSF (Ausfahrttypen A1 und A3)

Der Verkehrsfluss auf den Ein- und Ausfahrten wird in Absprache mit Expertinnen und Experten aus Hessen, Bayern und NRW plausibilisiert. Zur Kalibrierung der Modelle werden Verkehrsdaten von Autobahnabschnitten mit TSF herangezogen. Die Kalibrierung wird zum einen anhand der beobachteten q-v-Beziehungen vor und nach den Anschlussstellen durchgeführt. Zum anderen wird die Fahrstreifenaufteilung betrachtet, welche Aufschluss über die Akzeptanz der Verkehrsteilnehmenden gegenüber den temporär freigegebenen Seitenstreifen liefern. Es ist das Ziel der Kalibrierung, möglichst allgemeingültige Parameter für die Simulation von TSF zu definieren. Lokale Gegebenheiten und Wechselwirkungen zwischen Ein- und Ausfahrten werden in den Simulationen nicht betrachtet.

In vier Szenarien wird der Ausfahranteil, der Einfahranteil, die Akzeptanz der Lkw und die Akzeptanz der Pkw variiert und untersucht.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die zweistreifigen Ein- und Ausfahrten ihre Stärken, wie zu erwarten ist, im Bereich von hohen Einfahr- bzw. Ausfahranteilen ausspielen. Bei einstreifigen Aus- bzw. Einfahrten ist in den meisten Fällen eine Durchführung der Seitenstreifenfreigabe über die Anschlussstelle hinweg vorzuziehen. Die Akzeptanz des Schwer- und Leichtverkehrs beeinflusst den Verkehrsfluss innerhalb der Ein- und Ausfahrten nicht wesentlich, sofern realistische Akzeptanzraten herangezogen werden.

### Wirtschaftlichkeit

Das Arbeitspaket Wirtschaftlichkeitsbetrachtung besteht aus den folgenden Bausteinen:

1. Testen der Software AVP für den Wirtschaftlichkeitsnachweis und
2. Überprüfen bzw. Anpassen von einzelnen Bestandteilen der Software.

Für AVP-Tests werden zunächst Szenarien festgelegt und anschließend durchgeführt. Dies beinhaltet das Variieren der aus den q-v-Beziehungen abgeleiteten Parameter, um die Wirkung auf die Gesamtbetrachtung abzuschätzen. Auch wenn aufgezeigt wird, dass sich die tatsächlichen Parameter der q-v-Beziehungen deutlich auf die Bewertung der TSF-Strecke auswirken, wird empfohlen, die Parameter der q-v-Beziehungen aus dem HBS (2015) beizubehalten. Die Parameter decken bereits eine Vielfalt an Komponenten in den q-v-Beziehungen ab und durch die festgelegten Parameter können Fehleingaben beim Wirtschaftlichkeitsnachweis vermieden werden.

Zum anderen werden die AVP-Beiträge bevorzugt durch Listenanpassungen aufgearbeitet und dokumentiert. Dabei ist anzumerken, dass durch den bestehenden Softwareaufbau keine programmtechnischen Änderungen in AVP möglich bzw. gewollt sind. Dies bedeutet, dass aktualisierte Kennwerte mit einem Softwareupdate eingepflegt werden können, strukturelle Änderungen aber eines größeren Aufwands bedürfen.

Hinsichtlich der Verkehrssicherheit wird empfohlen, die Unfallrate zukünftig feiner abgestuft in AVP abzubilden. Dies betrifft die Unterscheidung nach den Strecken mit 2+1 und 3+1 Fahrstreifen, die zusätzliche Angabe der Unfallkennzahlen aus dem Streckenvorlauf und das Bilden der Unfallraten mit den gängigen Unfallkategorien 1 - 3 und 4 - 6. Somit lassen sich die sicherheitsbeschreibenden Kenngrößen auf TSF-Strecken möglichst differenziert darstellen.

Ebenfalls werden die Kostensätze zum Programm AVP aktualisiert, sofern das mit den zur Verfügung stehenden Daten möglich ist.

An einem exemplarischen Datenauszug werden die betrieblichen Mehraufwände an TSF-Strecken beschrieben.

## Fazit und Ausblick

Bezüglich des Bewertungstools AVP stand innerhalb des Forschungsvorhabens dessen Eignung im Fokus, damit bundeseinheitlich Wirkungen einer TSF darzustellen; gleichzeitig sollte das Programm nicht strukturell angepasst werden. Sowohl was eine realistischere Abbildung der verkehrlichen Nutzen über vermiedene Staubebelastungen angeht als auch z. B. die Einbeziehung standardisierter Unfallkostensätze, sollte eine Aktualisierung auch der Struktur von AVP geprüft werden.

Insgesamt zeigt sich sowohl aus der umfangreichen Datenüberlagerung mit Analyse der Verkehrssicherheit und des Verkehrsablaufs sowie den weiteren Erkenntnissen aus Interviews, dass die untersuchten TSF-Streckenabschnitte ein gut funktionierendes Gesamtsystem darstellen.

Da letztendlich der Großteil aller Strecken im Kollektiv enthalten ist, die 2018/2019 fertiggestellt waren und bei denen im Projektzeitraum keine Umbauarbeiten erfolgt sind, steht diese Gesamtaussage auf einer sehr breiten Basis. Unterschiede in Abhängigkeit von der technischen Ausstattung – insbesondere dem Vorhandensein von SBA – sind mit dem Streckenkollektiv nicht nachweisbar, allerdings liegen auch nahezu keine Strecken vor allem aus der jüngeren Vergangenheit vor, die keine SBA beinhalten (alle 3+1-Strecken sowie bis auf einen Abschnitt auch die 2+1-Strecken mit SBA). Da die Anlagen ohne SBA darüber hinaus zu den ältesten Anlagen zählen und besondere Randbedingungen aufweisen, kann daraus jedoch nicht abgeleitet werden, dass ihre Wirkungsweise mit denen mit SBA identisch sind.

Neben den generell unstrittigen Vorteilen von SBA für die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf werden in den Berichten der Meistereien und Kontrollräume vielfach auch die Vorteile der SBA für den Betriebsdienst herausgestellt. Auch wenn deren Nutzen innerhalb der Wirtschaftlichkeitsnachweise nur schwer nachweisbar ist, so hat es sich zumindest für die bestehenden Anlagen offensichtlich gelohnt, dass die RE-Entwürfe auch die SBA enthalten haben und insgesamt als wirtschaftlich eingestuft worden sind, was möglicherweise auch auf Synergien aus den beiden Telematikpaketen zurückzuführen ist.

Die mit Strecken ohne TSF vergleichbaren Unfallkennzahlen sowie der Nachweis, dass die Anlagen ihre verkehrliche Wirkung zuverlässig erzielen, zeigt, dass durch den Wirtschaftlichkeitsnachweis bedingt keine Strecken gebaut werden, die nicht sinnvoll betrieben werden. Auch eine Obergrenze der Verkehrsbelastungen für TSF-Strecken ergibt sich aus den untersuchten Strecken nicht. Schließlich ist erkennbar, dass auch bei den Strecken mit den höchsten DTV-Belastungen weiterhin nur zu einem geringen Teil des Tages die Freigabe des Seitenstreifens erforderlich ist, sodass dessen originäre Funktion während des Großteils des Tages erhalten bleibt.

## Summary

### Aspects of the temporary use of hard shoulders on freeways

#### Task

Temporary hard shoulder use (THSU) is established on around 380 highway kilometers in Germany. They achieve a short-term increase of the capacity on highways that are congested on a regular basis (BAST, 2021). THSU are a way of avoiding congestion caused by high traffic volumes, but also of homogenizing traffic and reducing the risk of accidents. For this purpose, the hard shoulder is temporarily opened for moving traffic, while the original function of the hard shoulder, i. e. to ensure traffic safety by accommodating broken-down vehicles and providing a working area for the operating services, is severely limited (RAA, 2008). This is one of the reasons why the hard shoulder can only be opened on stretches of road where an upgrade in accordance with the regulations is planned in the Federal Transport Infrastructure Plan (ARS 20/2002).

This project will summarize aspects of THSU on the basis of 16 existing sections and derive recommendations for future planning.

Finally, the existing model detail designs on THSU are discussed and possible adjustments are suggested.

#### Investigation method

The route selection primarily includes three-lane sections with variable message signs (VMS) in conurbations, but also two-lane sections with/without VMS. The selection represents the currently most common design variants. For the analysis of the manifold aspects concerning THSU, accident, traffic and THSU data are provided by the federal states, which, combined over time, allow extensive investigations. These are supplemented by planning documents as well as additional information and experiences from interviews.

Regarding the planning aspects of THSU, design guidelines and the related documents for the economic efficiency certificate are analyzed in terms of THSU boundary conditions, design elements and document structure. In parallel, interviews with road administrations and with the BMDV are conducted to capture both the design and endorsement viewpoints.

Practical experience, opportunities and risks arising for operational services from the temporary use of hard shoulders by moving traffic are collected using a questionnaire and then discussed in a nationwide round table in the highway maintenance departments. The focus of the survey lies on consequences resulting from the release times or from the traffic-dependent release as well as on changes in the operational effort.

With regard to traffic safety, the focus lies on comparing the safety level on highway sections with THSU with regular highway sections with three or four lanes. Furthermore, reliable parameters regarding specific opening conditions are determined. For this purpose, the accident data will be linked and evaluated with the precisely timed data from the THSU and the VMS. For detailed questions, in particular on prevailing accident constellations at different opening status, accident reports are evaluated, if they are available.

In order to make statements on the effectiveness of the systems under various boundary conditions, the traffic-related system boundary conditions, such as the capacities, are determined from the traffic data and the q-v diagrams of the systems are analysed. In addition, information on the VMS program is requested from the federal states and the acceptance of the THSU is determined on the basis of the lane distribution.

The microscopic traffic flow is simulated with three different typical entry and exit types. Thus, traffic volume classes can be defined, within which the different entry and exit types can be reasonably applied.

For the economic analysis, the effectiveness of the AVP software is tested by varying individual parameters and estimating the effect on the overall analysis. For example, updated and more finely graduated accident rates are proposed, which represent the traffic safety on THSU sections in a more differentiated way.

## Results

### Planning aspects

Various indications can be derived from the analyzed design guidelines and interviews. Some of these are listed below.

The design guidelines show that THSUs are primarily installed to improve performance on the highway section during the rush hour. Mostly, this is during commuting hours; only on two sections, this concerns travel times on weekends or during vacations. Another section is installed to disentangle traffic in the uphill section due to the speed difference.

In ARS 20/2002, one of the prerequisites for the use of the hard shoulder is that it must be demonstrated in the HBS (2001) that the traffic quality is worse than QSV D for at least 30 hours. In the HBS (2015), on the other hand, the traffic volume in the 50th highest-loaded hour of the year is decisive for the road dimensioning. In the event of a possible adjustment, this decisive traffic volume should also be used as the basis for THSU. In addition, for four-lane routes, the AADT in the entire cross-section should generally be at least 65,000 motor vehicles/24 h; for six-lane routes, no minimum AADT has been specified to date. Since more and more three-lane routes are being equipped with THSU, for which the above-mentioned limit values are sometimes also used as an argument, it is recommended that limit values should also be set for 6-lane cross-sections.

In the course of the interviews, various technical components were pointed out which, from the experience of the employees from the road construction administration, could positively influence the traffic flow or traffic safety and would lead to a more standardized design. It has shown that the diversity of opinions on individual points has proved to be very heterogeneous. Since only opinions were queried and contrasted during the interviews, further research is needed to obtain robust results, especially on the economic viability of the components. In the following, the aspects most frequently mentioned by the road construction authorities are presented and evaluated in each case by the researcher (*in italics*).

- LED displays should be used instead of prismatic turners: If prismatic turners are used, then a vertical arrangement of the blades should be considered in order to be able to adjust the display for individual lanes. *LED displays are state of the art and should be preferred.*
- Uniform arrangement or non-arrangement of the red cross to clarify the lane closure. *Since no difference in driving behavior or accident occurrence is discernible, this uniformity is not a priority; rather, habituation effects on existing routes should not be questioned.*
- Uniform display positions spacing across all countries, but still adjustment to existing visibility conditions. *Requirement for uniform spacing is not covered in the results, therefore no evaluation.*
- The fact that vehicles drive on the hard shoulder after the end of the opened section due to ambiguous marking and signage must be avoided. For this reason, the information on the installation location for sign 223.2 StVO (do no longer drive on the hard shoulder) is included in the discussion on the revised model detailed designs (chapter 10) *Suggestions in model designs, especially the warning line at the end of the driveway, are seen as a way to curb erroneous driving.*
- In the future, the marking of the lane change from the exit lane to the exit ramp as well as the marking of the lane change from the entry lane to the main lane shall be carried out with a guideline of 4 m dash and 2 m gap in the dash-gap ratio 2:1 of a warning line (as a narrow dash), whose position for visual guidance shall remain analogous to the regulation plan 16b of the RMS-A. At the points where lane markings had to be driven over in continuation of the use of the hard shoulder, these are to be dispensed in the future.

### Economy/AVP

It has shown that AVP can also be used as a planning tool, e.g. to calculate different variants.

On the basis of the economic feasibility studies of THSU sections, it can be seen that the analysis is consistently based on the BAST procedure, which is also used in the evaluation with AVP. At the time of the interview with the representatives of the BMDV, the proof of economic viability does not necessarily have to be provided with AVP. If the software is used in most cases, better comparability can be achieved and the process simplified.

#### Operational service, route inspectionzeitf, maintenance management

From the interviews with representatives of the highway maintenance departments or the associated control rooms, it is apparent that the integration of THSU signage into operational practice is handled differently, at least in formal terms.

Regardless of the specific signage used in these situations, the time slots for road operational services can be significantly expanded. On many of the THSU routes, traffic volumes are also high between the morning and evening peaks that even at these times, taking away a lane would cause traffic disruptions that can be avoided by opening up the hard shoulder. The simultaneous presence of a VMS is not a prerequisite for this essential operational benefit of THSU. Of course, a VMS is also beneficial to operational services as well as in the control room due to its better ability to intervene in moving traffic and the ability to give preannouncements of and enforce lane closures, but it is not a requirement.

If a VMS is also available, there are possible advantages in the utilization of the overhead signaling mentioned for lane closures and their preannouncements. In the RSA (2021), compared to the RSA-95, the following new paragraph (3) was added in Part D, Chapter 3: "Arrangements of traffic signs by means of traffic control systems should be included in the safeguarding of work sites, insofar as their functionalities permit this and the regulations of this guideline can thus be implemented. For the inclusion of route inspection systems in working sites of shorter duration, see RWVZ. If the display cross-sections are sufficiently dense, route inspection systems can completely take over the function of advance warning."

To counteract extra work in grove maintenance and green pruning to keep camera viewing areas clear, consideration should be given to keeping viewing areas clear while planning the THSU.

#### Traffic safety

Since various aspects of THSU are being investigated in this project, for the first time, variously overlaid data sets on the THSU systems are available for 16 sections. In addition to the accident data, these data sets contain minute-by-minute, lane-related traffic data as well as the program data of the THSU over a period of two years. Thus, these three data sets can be combined on a federal state-specific basis using the date and time in order to obtain a uniform data basis. This has the advantage that in the evaluation, not only accident characteristics can be determined for a route section with THSU, but the analysis can be structured differentiated according to the respective opening status. To avoid accidents being assigned to the wrong opening status due to possible inaccuracies in the accident documentation, accidents are marked that occur in the 25 min before or after a status change of the THSU. The accidents are assigned to the status "transition" and are only taken into account in the accident figures that are independent of the opening state.

The accident analysis is structured into several stages. First, nationwide AADT-dependent accident characteristics are determined in order to be able to classify the traffic safety of THSU routes compared to conventional routes with three or four lanes without THSU. Subsequently, a correlation to the traffic volume is established and the accident characteristics related to the opening status are discussed. Furthermore, the chapter is supplemented by a qualitative analysis of accident reports for opened THSU. In the third stage, the beginning of the THSU section and the interchanges along the route are examined for accident characteristics.

In order to assess the accident characteristic values on THSU routes, the direction-related accident characteristic values for all network sections on national highways (BAB) are analysed using aggregated accident data from BAST, with regard to their number of lanes and their AADT values. This shows that the average accident rates for BAB (e.g. 0.08 accidents involving personal injury / 1 million vehicle-km) are only valid for AADT values significantly below the operational limits of THSU sections. For higher AADT values, there is a linear

increase in the accident characteristic values. This correlation is particularly important for the overall assessment of accidents on THSU routes.

Overall, it can be seen that the accident rate involving personal injury (AR(P)) on THSU sections tends to be lower than on sections with the same number of lanes without THSU when taking into account the respective AADT. However, the accident rates of all included accidents are significantly higher. This indicates that although more property damage accidents occur on THSU sections, the more economically relevant serious accidents are declining.

In particular, the accident rate when the hard shoulder is open shows a significantly greater variation and a stronger dependence on traffic volume than when the hard shoulder is closed. Thus, the average AR (open THSU) of 2.3 accidents/10<sup>6</sup> \*vehicle\*km is noticeable at a traffic volume of up to 4,000 vehicles/h and the interval at particularly high traffic volumes of 6,500 vehicles/h and above. The same applies to the AR(P) (open THSU).

This indicates that there is a basic load of accidents with personal injury. However, in the intervals between 4,000 and 5,000 vehicles/h, the overall AR is primarily influenced by property damage accidents. This affects the periods when the THSU is open and periods with a particularly high traffic volume.

The AR(P) and AR at closure tend to have a higher accident characteristic value in the interval of traffic volume up to 4,000 vehicles/h and then stabilize at an average level of about 0.04 A(P)/10<sup>6</sup> \*vehicles\*km and 0.21 A/10<sup>6</sup> \*vehicles\*km, respectively. This is also found by PÖPPEL-DECKER et al. (2003) as the average accident rate in a medium load area on three-lane directional carriageways.

Overall, a strongly diverging safety level can be seen on the study sections. On sections with 3+1 lanes, the accident rate and, to a lesser extent, the AR(P) on the approach section are higher than on the main section. The other conspicuous feature concerns the opening condition of the facilities – the accident rate and AR(P) are higher on open hard shoulders than on closed hard shoulders.

On the two-lane sections with THSU, a uniform level of AR(P) = 0.07 A(P)/million vehicle km can be observed on the entire section, which is slightly lower behind the THSU and higher in the approach section. The accident rate for the considered route sections is also 0.23 A(P)/million vehicle-km, independent of the opening state, and the accident rate is increased both behind and in the approach of the THSU section.

Since the documentation of the opening states is not consistently included in the accident reports, an analysis of the specific sequences can only be carried out for the accidents in the area of the hard shoulder and the first regular lane when the hard shoulder is open. In this area, accidents occur significantly more frequently when changing from the first lane to the hard shoulder than vice versa, and there are also significantly more accidents during the change of lanes than rear-impact crashes. Also, in these constellations, significantly more trucks and especially semitrailer trucks are recorded as mainly responsible than on average over all accidents, while the accident victims are distributed as usual with a high proportion of passenger cars.

There are noticeable textual references to vehicle drivers attempting to take evasive action in the event of an imminent collision on the hard shoulder, e.g. when changing lanes, but this is not possible due to the frequently encountered vehicle restraint systems immediately adjacent to the hard shoulder. Individual reports also suggest that corresponding vehicle reactions, especially in heavy traffic, may result in more serious consequences than in comparable situations on regular lanes.

Since individual infrastructure elements were found to be more accident-prone, it is investigated whether markings and signage of the beginning of the THSU section have an influence on traffic safety. For this purpose, the beginning of the examined sections is classified and the most frequent variants are selected. For the selection, the most frequent combinations of conflict and collision types are compared via the accident rate in order to make a systematic statement on the effect of the two most frequent design variants. However, since the boundary conditions of the two collectives as well as of the individual examined

sections differ strongly or the two collectives and show very diverging accident rates, only general statements within the sections can be derived, but no statement can be made on the effects of different markings of the THSU beginning.

For the seven interchanges within the sections, it can be seen that the accident volume is very section-specific. This inhibits a generalization for interchanges. On sections with a generally low accident rate, the interchanges also have a low accident rate, while on sections with a higher accident rate, the interchanges also have a higher accident rate. In addition, on sections where the accident rate already differs depending on the opening status, this aspect is even more pronounced in the area of the interchanges. This can be explained by additional intertwining processes, which are sometimes also reflected by additional accidents when turning into the highway. This confirms the statement of LEMKE (2007) that the safety level depends on the respective section and that intersections in particular should be subject of a safety analysis before THSU is installed.

#### Macroscopic analysis of the traffic flow

The aim of the traffic flow studies is to provide traffic parameters such as capacities on a broad data basis of existing THSU sections. For this purpose, there are mainly sections with 3+1 lanes available, all of which are equipped with a VMS. For this purpose, the sections are first compared regarding their traffic and operational boundary conditions, characterized and compared with sections of road with three or four lanes. In this context, it should be noted that the pre-carriageway and onward carriageway of the THSU sections could only be taken into account to a limited extent. In particular, a large part of the sections upstream had highway junctions with very high entry and exit shares, which could not be represented in this analysis.

For this purpose, the maximum traffic volumes, heavy traffic shares and AADT values of a representative cross-section of the sections included in the study collective are determined and the temporal distribution of the THSU openings – and closings – over the course of the day is also examined. Hereby, certain patterns regarding the operation of the facilities become apparent, which are classified into four basic types. These basic patterns reflect the capacity bottlenecks that occur during the course of the day, which ultimately also result in the need to open the hard shoulder. Some of the facilities show very pronounced peaks in the morning or afternoon, while the distribution of the opening and closure of the THSU is more differentiated in other sections.

Based on this information on the traffic and operational boundary conditions of the sections, q-v diagrams are generated for the two statuses, open and closed THSU, in order to examine them with regard to their design and existing congestion. The results show that traffic conditions in the area of congested traffic are also present in some cases when the THSU is open, but that these only occur on extremely heavily used stretches of road with AADT values of over 73,000 vehicles/h and are mainly the result of backwater effects from downstream bottlenecks.

Following on from the visual analysis of congestion, a stochastic capacity analysis has been carried out, which is based on the study of traffic collapses. The division into censored and uncensored intervals is used to determine an estimator for the distribution function of the capacity. These capacity values, which are based on 5-minute intervals, are then transformed into hourly intervals in order to establish comparability with the capacity values stored in the HBS (2015). The 3+1 sections, which are based on a broader data basis, show a high conformity with the capacity values of approx. 5,000 motor vehicles/h on average when the THSU is closed and approx. 6,800 motor vehicles/h when the THSU is open, as stated in the HBS (2015). It must be taken into account that within the scope of the research project, the longitudinal gradient of the cross sections investigated was not systematically analyzed. However, there are also no pronounced gradient sections in the examined sections, such as the THSU on the BAB 8 east of the Karlsruhe Triangle, which was only set up during the project period.

With regard to the AVP tests carried out in the context of the economic feasibility study, a modeling of the q-v relationship using the model function according to BRILON and PONZLET (1995) is also carried out in the context of the traffic analysis and the corresponding parameter values are determined in order to store the real curve relationships at selected

examined sections in AVP. This is done against the background of a comparison with the standardized curve relations.

As part of the traffic analysis, a consideration of acceptance is also carried out in the sense of a comparative analysis of the ideal-typical lane distribution of three- or four-lane directional carriageways compared with THSU sections. This is done as a function of the total traffic volume in the cross-section. In the case of the examined THSU sections, almost identical lane distributions as on three- or four-lane directional carriageways for comparable traffic volume ranges are found. This indicates a similar acceptance of the hard shoulder as that of a regular right-hand lane.

In addition to the basic traffic analysis of the examined sections, a specific analysis and evaluation of the traffic flow around the times of the opening and closure of the hard shoulder will be carried out. For this purpose, on the one hand, on the basis of a query of the opening status information of the traffic control centers, a process is worked out in which steps and under which test conditions and characteristic values the opening or closure of the hard shoulder takes place. Subsequently, q-v diagrams are created around the opening and closing periods and the traffic collapses found therein are analyzed. Overall, based on the observed cross-sections, it can be stated that neither the periods shortly after the opening nor after the closing of the hard shoulder are characterized by increased traffic congestion.

#### Microscopic analysis of the traffic flow

The operational limits of different entry and exit types in the area of THSU are investigated using microscopic traffic flow simulations in PTV Vissim. For this purpose, laboratory sections of the following entry and exit types will be set up:

- Start of a THSU (entry types E1 and E4)
- Connection point within a THSU (entry type E1 and exit type A1)
- End of a THSU (exit types A1 and A3)

The traffic flow on the entrances and exits is checked for plausibility in consultation with experts from Hessen, Bavaria and NRW. Traffic data from highway sections with THSU are used to calibrate the models. On the one hand, the calibration is performed using the observed q-v relationships before and after the interchanges. On the other hand, the lane distribution is considered, which provides information about the acceptance of the road users towards the THSU. The aim of the calibration is to define parameters for the simulation of THSU that are as generally valid as possible. Local conditions and interactions between entrances and exits are not considered in the simulations.

In four scenarios, the exit percentage, the entry percentage, the acceptance of trucks, and the acceptance of cars are varied and investigated.

Overall, it can be stated that the two-lane entrances and exits exploit their strengths, as is to be expected, regarding high entry or exit shares. In the case of single-lane exits or entrances, it is preferable in most cases to implement hard shoulder use across the interchange. Acceptance rates for heavy and light traffic do not significantly affect traffic flow within the entry and exit lanes, provided realistic acceptance rates are used.

#### Economic efficiency

The economic feasibility work package consists of the following components:

1. testing of the AVP software for the proof of economic viability and
2. check or adjust individual components of the software.

For AVP tests, scenarios are first defined and then run. This involves varying the parameters derived from the q-v relationships to estimate the effect on the overall assessment. Although it is shown that the actual parameters of the q-v relationships have a significant impact on the THSU section evaluation, it is recommended that the parameters of the q-v relationships from the HBS (2015) be retained. The parameters already cover a variety of components in the q-v relationships, and the fixed parameters can avoid erroneous entries in the economic analysis.

On the other hand, the AVP contributions are preferably processed and documented by list adjustments. It should be noted that, due to the existing software structure, no changes to the code are possible or desired in AVP. This means that updated characteristic values can be incorporated with a software update, but structural changes require more effort.

With regard to road safety, it is recommended to show the accident rate in AVP in a more finely graded way in the future. This concerns the differentiation between routes with 2+1 and 3+1 lanes, the additional indication of the accident figures from the approach section and the calculation of the accident rates with the common accident categories 1 - 3 and 4 - 6. In this way, the safety-describing parameters on THSU sections can be represented as differentiated as possible.

Likewise, the cost rates for the AVP program are updated as far as this is possible with the available data.

An exemplary data excerpt is used to describe the additional operational costs on THSU sections.

### **Conclusion and outlook**

With regard to the AVP evaluation tool, the research project focused on its suitability for representing the effects of a THSU in a uniform manner throughout Germany; at the same time, the program was not to be structurally adapted. An update of the structure of AVP should also be examined with regard to a more realistic representation of the traffic benefits due to avoided congestion loads as well as, for example, the inclusion of standardized accident cost rates.

Overall, both the extensive data overlay with analysis of traffic safety and traffic flow and the additional findings from interviews indicate that the examined THSU sections represent a well-functioning system.

Since the majority of all sections that were completed in 2018/2019 and have not been altered are included in the collective, this statement has a very broad basis. Differences depending on the technical equipment – in particular the presence of VMS – are not detectable with the section collective, however, there are also almost no sections, especially from the recent past, that do not contain VMS (all 3+1 sections as well as, except for one section, the 2+1 sections with VMS). Furthermore, the sections without VMS are among the oldest sections and have special boundary conditions that do not allow us to deduce from their analysis that their mode of operation is identical to that of those with VMS.

In addition to the generally undisputed benefits of VMS for traffic safety and traffic flow, the reports of the freeway administrations and control rooms frequently emphasize the advantages of VMS for operational services. Even if their benefits are difficult to demonstrate within the economic efficiency proofs, it has obviously been worthwhile, at least for the existing installations, that the design guidelines' drafts have also included VMS and have been classified as overall economic, which may also be due to synergies from the two telematics packages.

The accident figures, which are comparable with sections without THSU, as well as the proof that the facilities reliably achieve their capacity enhancing effect, show that, as a result of the proof of economic viability, no sections are built that are not operated sensibly. There is also no upper limit on traffic volumes for THSU sections, at least from the examined sections. Finally, it can be seen that even on the sections with the highest AADT, the opening of the hard shoulder is still only necessary for a small part of the day, so that its original function is maintained for significant parts of the day.