Optimierung der Abstände von Anzeigequerschnitten und Messquerschnitten in Streckenbeeinflussungsanlagen

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Verkehrstechnik Heft V 393

bast
Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

Optimierung der Abstände von Anzeigequerschnitten und Messquerschnitten in Streckenbeeinflussungsanlagen

von

Christoph Schwietering, Denis Löbbering, Milad Abarghooie
Schwietering Ingenieure GmbH, Aachen

Justin Geistefeldt, Hendrik Marnach
Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen – Planung und Management

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Verkehrstechnik Heft V 393

bast
Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

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 BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: https://bast.opus.hbz-nrw.de

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 03.0605
Optimierung der Abstände von Anzeigequerschnitten und Messquerschnitten in Streckenbeeinflussungsanlagen

Fachbetreuung:
Jessica Hegewald

Referat:
Verkehrsbeeinflussung und Straßenbetrieb

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

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331 | ISBN 978-3-95606-836-2 | https://doi.org/10.60850/bericht-v393

Bergisch Gladbach, März 2025

Kurzfassung – Abstract

Optimierung der Abstände von Anzeigequerschnitten und Messquerschnitten in Streckenbeeinflussungsanlagen

Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) werden eingesetzt, um den Verkehrsfluss zu verbessern und die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Wesentliche Bestandteile von SBA sind Messquerschnitte (MQ) zur Datenerfassung und Anzeigequerschnitte (AQ) zur Informationsübermittlung an die Verkehrsteilnehmenden. Die Abstände zwischen MQ bzw. AQ sollen so gewählt werden, dass die Grundsätze der Wirtschaftlichkeit eingehalten und die angestrebten verkehrlichen Nutzen erreicht werden. Sowohl für MQ als auch für AQ gibt es Regelabstände, die für die Planung als Orientierung dienen. Die Anordnung der MQ und AQ hängt jedoch auch von den örtlichen Gegebenheiten wie z. B. der Lage von Einfahrten und der Übersichtlichkeit der Trassenführung ab. Daher sind in Deutschland im Vergleich zwischen den SBA teils stark variierende Querschnittsabstände für die Sensorik und Aktorik umgesetzt worden. Eine empirische Überprüfung der Regelabstände wurde bisher nicht durchgeführt.

In der vorliegenden Untersuchung wurde die Wirksamkeit von Harmonisierungs- und Stauwarnungsschaltungen in Abhängigkeit von den MQ- und AQ-Abständen analysiert. Es wurde untersucht, inwiefern Abstände von AQ zueinander, Abstände von MQ zueinander sowie die Zuordnung von MQ (als Situationsauslösung) zu einem AQ (als Maßnahmenumsetzung in Form eines Schaltbilds) Auswirkungen auf die Wirksamkeit haben. Im Mittelpunkt stand die Frage, inwieweit kürzere AQ-Abstände die Befolgung von Geschwindigkeitsbeschränkungen erhöhen. Mit dem Untersuchungskonzept ist es grundsätzlich möglich, ggf. vorhandene Wirkungsunterschiede, die sich aus unterschiedlichen AQ- bzw. MQ-Abständen von SBA ergeben, zu analysieren. Eine absolute Nutzenbetrachtung ist nur über Vorher-Nachher-Vergleiche für neu realisierte Anlagen möglich.

Empirische Analysen von lokalen Verkehrsdaten der SBA, Einzelfahrzeugdaten aus Floating Car Data (FCD) und Trajektorien aus Luftbildanalysen zur systematischen Bewertung der Wirkung von AQ-Abständen auf die Verkehrsqualität haben für unterschiedliche AQ-Abstände grundsätzlich eine gute Befolgung der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkungen ab 100 km/h aufwärts gezeigt. Die Anzeigen restriktiverer Geschwindigkeitsbeschränkungen wurden weniger gut befolgt. Restriktive Geschwindigkeitsbeschränkungen in SBA werden im Rahmen von Stauwarnungen (Stautrichterung) oder zur Harmonisierung – als präventive Maßnahme zur Vermeidung oder Verzögerung von kritischen Verkehrszuständen – verwendet. Restriktive Geschwindigkeitsbeschränkungen während Stauwarnungen wurden besonders häufig deutlich überschritten. Insgesamt konnten keine Wirkungsunterschiede hinsichtlich der Befolgung von SBA-Schaltungen bei unterschiedlichen AQ-Abständen nachgewiesen werden. Daher liefern die empirischen Analysen keine Indizien für einen zusätzlichen Nutzen kürzerer AQ-Abstände für den Verkehrsablauf. Aus den Ergebnissen der empirischen Analyse lassen sich daher keine von den bereits geltenden Vorgaben der RWVA (1997) abweichenden Empfehlungen für einen verkehrstechnisch sinnvollen AQ-Abstand ableiten.

Mittels einer Simulation stellte sich die Lage des MQ stromabwärts des zugehörigen AQ als verkehrstechnisch günstiger heraus als eine Lage des MQ auf gleicher Höhe oder stromaufwärts des AQ. Eine schnellere Datenübertragung und -verarbeitung sowie die räumliche Verdichtung von Messquerschnitten innerhalb der SBA kann die zeitliche und räumliche Präzision der Schaltung verbessern. Bei einer Stauwarnung könnten so mehr Fahrzeuge rechtzeitig mit der Warnung erreicht werden und bei Harmonisierungsschaltungen sind die Schaltbilder aktueller, wodurch ggf. die Befolgung der Verkehrsteilnehmenden verbessert wird. Es wird empfohlen, beim Neu-

entwurf oder Ausbau bestehender SBA den Fokus auf die Verdichtung von MQ zu legen. Bei größeren AQ-Abständen wird in den RWVZ (FGSV, 1997) bereits geraten, eine Verdichtung der MQ zu prüfen.

Da eine Sicherheitswirkung von Gefahrenwarnungen durch erhöhte Aufmerksamkeit oder Bremsbereitschaft der Verkehrsteilnehmenden auch bei geringer Befolgung der Geschwindigkeitsbeschränkungen zu vermuten ist, werden weitergehende Untersuchungen zur Verkehrssicherheitswirkung von SBA empfohlen.

Optimization of the distances between display cross-sections and measuring cross-sections in line control systems

Line control systems (LCS) are used to improve traffic flow and to increase road safety. The main components of LCS are measurement cross-sections (MCS) for data collection and display cross-sections (DCS) for giving information to the road users. The distances between MCS and DCS should be selected in such a way that the principles of economic efficiency are complied with and the desired traffic benefits are achieved. For both MCS and DCS, standard distances are defined, which serve as a guide for planning. The arrangement of the MCS and DCS also depends on the local conditions, such as the location of entrances and the clarity of the road. For this reason, the distances between cross-sections for sensors and actuators that were implemented in Germany vary significantly between the LCS. An empirical review of the standard distances have not yet been carried out.

In the present study, the effectiveness of control measures for traffic flow harmonization and congestion warning was analyzed as a function of the distances between MCS and DCS. It was investigated to what extent distances between DCS, distances between MCS and the assignment of a MCS (as situation trigger) to an DCS (as control measure implementation by sign settings) have an impact on effectiveness. The focus was the extent to which shorter DCS distances increase the compliance of speed limits. With the study concept, it is basically possible to analyze any existing differences in effect resulting from different DCS or MCS distances of LCS. An absolute benefit analysis is only applicable via before-and-after comparisons for newly implemented LCS.

Empirical analyses of local traffic data from the LCS, Floating Car Data (FCD) and trajectories from aerial image analyses for the systematic evaluation of the effect of AQ distances on traffic quality have generally shown good compliance with the indicated speed limits from 100 km/h upwards for different DCS distances with average exceedances of less than 10 km/h. The displays of more restrictive speed limits were less well complied with. Restrictive speed limits in LCS are also used in the context of traffic flow harmonization as preventive measures to avoid or delay critical traffic conditions. Low speed limits during congestion warnings were exceeded most significantly. Overall, no differences in the effect of following LCS switchings at different DCS distances could be verified. Therefore, the empirical analyses do not provide any indications of an additional benefit of short DCS distances for traffic flow. The results of the empirical analysis therefore do not lead to any recommendations for a reasonable DCS distance from a traffic engineering point of view that deviate from the existing specifications of the German guideline RWVA (FGSV, 1997).

By means of simulation, a location of the MCS downstream of the associated DCS was found to be more favorable than a location of the MCS at the same location or upstream of the DCS. Faster data transmission and processing as well as the spatial densification of MCS within the LCS can improve the temporal and spatial accuracy of the control. In the case of a congestion

warning, more vehicles could be reached in short time with the warning and, in the case of traffic flow harmonization, the switching patterns are more up-to-date, which may improve the compliance of road users.

It is recommended to focus on reducing the distances between DCS when designing new or expanding existing LCS. For larger DCS distances, the German guideline RWVZ (FGSV, 1997) already advises checking the compaction of MCS.

Since a safety effect of hazard warnings can be assumed due to increased attention or willingness of the road users to slow down even if the speed limits are not complied with, further studies on the road safety effect of LCS are recommended.

Summary

Optimization of the distances between display cross-sections and measuring cross-sections in line control systems

1 Problem Definition and Objectives

Line control systems (LCS) are used to improve traffic flow and to increase road safety. The main components of LCS are measurement cross-sections (MCS) for data collection and display cross-sections (DCS) for giving information to the road users. The distances between MCS and DCS should be selected in such a way that the principles of economic efficiency are complied with and the desired traffic benefits are achieved. For both MCS and DCS, standard distances are defined, which serve as a guide for planning. The arrangement of the MCS and DCS also depends on the local conditions, such as the location of entrances and the clarity of the road. For this reason, the distances between cross-sections for sensors and actuators that were implemented in Germany vary significantly between the LCS. An empirical review of the standard distances have not yet been carried out.

In the present study, the effectiveness of control measures for traffic flow harmonization and congestion warning was analyzed as a function of the distances between MCS and DCS. It was investigated to what extent distances between DCS, distances between MCS and the assignment of a MCS (as situation trigger) to an DCS (as control measure implementation by sign settings) have an impact on effectiveness. The focus was the extent to which shorter DCS distances increase the compliance of speed limits. The focus of the project was placed therefore exclusively upon evaluating the traffic flow.

2 Study Concept

First, research questions were defined that take into account the essential aspects of the principles to be observed for the evaluation of the MCS/DCS distances with regard to the effect on traffic flow harmonization and thus traffic quality. Based on this, an investigation and survey concept was developed that depicts traffic situations in spatial and temporal detail and with high accuracy for the analysis of detection and information distances which are useful in terms of traffic engineering.

A wide range of existing LCS were documented and evaluated as part of the empirical study. In the empirical analysis, various combinations of distances between MCS and DCS as well as assignments of MCS to DCS were considered. The traffic characteristics of the route, the system configurations as well as the control characteristics and thus the multiple causal relationships and interactions with the effectiveness of LCS were also considered in the analysis.

The central basis of the empirical analysis was the collection of microscopic traffic data of freeways equipped with LCS. This allowed the consideration of the relevant traffic parameters both microscopically for each vehicle and macroscopically for a collective, e.g. within a density wave in the traffic flow. The delay between the occurrence of the real spatio-temporal situation and the resulting implementation of measures (signal switchings) was also examined as a function of the measurement cycles. In addition, a comprehensive analysis of traffic data was carried out, which was evaluated for a much longer time period and a large number of freeway sections with the aim of gaining reliable and statistically significant findings. With the study concept, it is basically possible to analyze any existing differences in the effectiveness of LCS that result from different DSC or MCS distances of LCS. An absolute benefit analysis is only applicable via before-and-after comparisons for newly implemented LCS.

3 Research Results

3.1 FCD-based Analysis

As part of the FCD-based analysis of compliance with dynamic speed limits, individual vehicle data from 2019 was evaluated for six different LCS with a total route length of 129 km. DCS sections with DCS distances between 467 and 2,544 m were examined, which well represent the distribution of realized LCS in Germany. The DCS locations and distances result not only from control considerations, but also from the visibility depending on the route geometry and any existing bridges, as well as the traffic law requirement to display the required signs applicable to the preceding route section to traffic approaching the entrances.

Empirical analyses of local traffic data from the LCS, Floating Car Data (FCD) and trajectories from aerial image analyses for the systematic evaluation of the effect of DCS distances on traffic quality have generally shown good compliance with the indicated speed limits of 100 km/h or more for different DSC distances with average exceedances of less than 10 km/h. The displays of more restrictive speed limits were less well observed.

In addition to congestion warnings, restrictive speed limits in LCS are also used in the context of traffic flow harmonization as preventive measures to avoid or delay critical traffic conditions, whereby a speed limit of 80 km/h with an average exceedance of 18.8 km/h is better complied with than the speed limit of a congestion funnel. During congestion warnings, speed limits of 60 km/h were exceeded by 38.6 km/h on average, while speed limits of 80 km/h were exceeded by 32.1 km/h.

The results of the FCD-based analysis were confirmed by qualitative analyses of spatio-temporal vehicle trajectories from the drone images for a freeway section affected by changing traffic conditions.

3.2 Traffic Flow Simulations

The microscopic traffic flow simulation was used to simulate the control programs for traffic flow harmonization and congestion warning according to the MARZ (2018). The results of the simulation essentially confirmed the results of the empirical data analyses. Minor effects of different DCS distances on the speeds and their standard deviation were identified. Varying the MCS-DCS assignment showed that in the case of a congestion warning, it makes sense to position the MCS downstream of the DCS in order to significantly reduce the dispersion of the speeds traveled and slightly reduce the number of situations with a time to collision (TTC) < 2 s. For the harmonization scenario, the position of the MCS in relation to the DCS is less important. However, positioning the MCS upstream of the DCS led to occasional outliers on two-lane stretches, where the standard deviation of speeds increased significantly and traffic became more turbulent.

3.3 Impact Field Analysis of Congestion Warnings

The closer the MCS and DCS of a LCS are installed on a route affected by regular traffic jams, the faster and more precisely a traffic jam can be detected and displayed in order to warn road users approaching the end of the queue. It can be assumed that a displayed warning will influence the warned road user, e.g. in the form of increased attention or willingness to brake, regardless of compliance with the displayed speed limits. A theoretical model was developed to determine the impact of congestion warnings, which can be used to estimate the number of vehicles warned of the end of a traffic jam as a function of the DCS and MCS distance and the traffic volume. This is a complementary method for assessing the traffic safety effect of congestion warnings, since in addition to the pure warning effect, the speed at which a vehicle approaches the end of the jam

is also of great importance for the accident risk and thus the degree of effectiveness of a line control system.

The model is based on traffic flow theory approaches, which are combined with the basic functionality of a LCS.

The model for the effective field analysis of congestion warnings assumes an equal distribution of congestion formation between two MCS. It can also deviate from practice by assuming a largely uniform distribution of MCS and DCS: On sections with a close spacing between junctions and/or route geometric constraints, the MCS/DCS distances sometimes vary significantly in practice.

The application of the model showed that the number of unwarned vehicles stronger depends on the mean MCS distance than on the mean DCS distance. The number of unwarned vehicles can therefore be reduced primarily by reducing the MCS distances. This was confirmed by a variance-based sensitivity analysis: While the variation of the traffic volume between 2,000 and 6,000 veh/h has, as expected, the greatest influence on the number of unwarned vehicles (total order index TOI = 0.46), a significantly greater influence on the result was found for the mean MCS distance between 500 and 2,500 m (TOI = 0.34) than for the mean DCS distance between 500 and 2,500 m (TOI = 0.01). The variation of the data processing time of the LCS between 15 s and 3 min also resulted in a four times greater influence (TOI = 0.04) on the number of vehicles not warned of the traffic jam than the variation of the DCS distance between 500 and 2,500 m.

4 Conclusion and Outlook

Overall, no differences in effect could be verified with regard to the compliance of LCS switchings at different DCS distances. Therefore, the empirical analyses do not provide any indications of an additional benefit of small DCS distances for traffic flow. The results of the empirical analysis therefore do not lead to any recommendations for a reasonable DCS distance that deviate from the existing specifications of the RWVA (1997).

By means of simulation, a location of the MCS downstream of the associated DCS proved to be more favorable than a location of the MCS at the same location or upstream of the DCS. The arrangement of an MCS a few hundred meters downstream of the associated DCS was common practice when induction loops were generally used for traffic detection. However, the use of overhead sensors does not allow this spatial offset and in practice requires appropriate consideration in the configuration of the LCS. It is therefore not possible to give a general recommendation for the optimum distance between DCS and MCS in LCS. To date, no specific distance between DCS and MCS is recommended in the guidelines.

The arrangement of the MCS and DCS depends largely on the local conditions, such as the location of entrances and the clarity of the route. A close spacing between junctions in conurbations, often requires a high density of MCSs and DCSs. The knowledge of regularly activated bottlenecks (e.g. at exits or uphill sections) can substantiate additional DCS and MCS in order to support traffic safety and to maintain traffic quality. On the other hand, economic aspects must be considered when planning LCS.

The model developed in the study for the effective field analysis of congestion warnings indicates a significantly greater benefit of short MCS distances compared to short DCS distances. It is recommended to focus on the compression of MCS when designing new or expanding existing LCS. For larger DCS distances, the RWVZ (FGSV, 1997) already advises checking the compaction of the MCS.

Whether a shorter measurement interval can improve the response time of a LCS was not investigated empirically. However, it became clear during the simulation that the configuration of a LCS must be adapted for short measurement intervals. Appropriate smoothing methods must be used to maintain the quality of the traffic state determination due to the shortened intervals. In practice, 15 s intervals are already used, which are smoothed by moving averaging.

For the further development of planning and control, procedures, vehicle-generated data and assistance systems using vehicle-infrastructure communication can supplement the functions of collective traffic control. It is therefore advisable to investigate whether and how the integration of FCD into traffic condition detection is possible and whether this could achieve an effect comparable to that of MCS compaction. With increasing vehicle equipment, it should be investigated whether the transfer of VMS displays from FCD to the vehicles can improve the effect of FCD.

Since a safety effect of hazard warnings can be assumed due to increased attention or willingness to brake on the part of road users, even if the speed limits are not complied with to a great extent, further investigations of the road safety effect of LCS are recommended. In order to supplement the results of the present study in a useful way, the focus of the study should be on analyzing the correlation between DCS distances and accident parameters on freeway sections with LCS.

Inhalt

1 Einleitung und Zielsetzung 14

2 Grundlagen 16

2.1 Verkehrsbeeinflussung, Verkehrsdetektion und Datenfusion 16

2.2 Wirkung und Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen 18

2.3 Befolgung von dynamischen Wechselverkehrszeichen-Inhalten und Harmonisierungswirkung 21

2.4 Optimierung der Steuerung für unterschiedliche AQ- und MQ-Abstände in SBA 23

2.5 Räumlich-zeitliche Dynamik von Verkehrszuständen 27

2.6 Wirtschaftlichkeit von SBA 30

2.7 Zwischenfazit 32

3 Untersuchungskonzept 34

3.1 Einführung 34

3.2 Forschungsthemen 35

3.2.1 AQ-Abstände 35

3.2.2 MQ-Abstände 36

3.2.3 Abstand von MQ zu AQ 36

3.2.4 Berücksichtigung der Dynamik der Verkehrszustände 36

3.2.5 Dependenzen von Steuerungsintervallen und MQ-AQ-Abständen 37

3.3 Bestandsaufnahme von SBA in Deutschland 37

3.4 Messkonzept 39

3.4.1 Grundsätzliche Vorgehensweise 39

3.4.2 Messkonzept für Analyse von Floating Car Data (FCD) 41

3.4.3 Messkonzept für die Analyse von Videodaten aus Drohnenerhebungen 42

3.5 Untersuchungsstrecken 44

3.5.1 Auswahlkriterien 44

3.5.2 Übersicht über die Untersuchungsstrecken 49

3.5.3 A 44 von der AS Soest bis zum AK Dortmund/Unna 52

3.5.4 A 57 zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch (nur FCD) 53

3.5.5 A 5 zwischen dem Gambacher Kreuz und der AS Friedberg 54

3.5.6 A 5 von der AS Reiskirchen bis zur L3146 55

3.5.7 A 2 zwischen der AS Lauenau und der AS Bad Nenndorf 56
3.5.8 A 81 von der AS Pleidelsheim bis zur AS Mundelsheim (Nur Drohne) 57

4 Empirische Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens 59
4.1 Datengrundlage und -aufbereitung 59
4.1.1 Räumlicher Bezug 59
4.1.2 FCD 59
4.1.3 Definition von AQ-Abschnitten und Knotenpunktbereichen 60
4.1.4 MQ-Daten 61
4.1.5 Schaltdaten 62
4.1.6 Umfelddaten 70
4.1.7 Längsneigungsdaten 72
4.1.8 Trajektoriendaten der Drohnenvideoaufnahmen 73
4.2 Datenweiterverarbeitung und -fusion 74
4.2.1 Zieldatensatz 74
4.2.2 Validierung der FCD-Geschwindigkeiten mit MQ-Daten 74
4.2.3 Bewertung der Verkehrszustände (MQ-Daten) 75
4.2.4 Datenfusion und FCD-Gesamtdatensatz 76
4.3 Methodik 78
4.3.1 Korrelationsanalyse 78
4.3.2 Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens über die Distanz zwischen zwei AQ 79
4.3.3 Weg-Zeit-Analyse der Trajektoriendaten 80
4.4 Ergebnisse 81
4.4.1 Schaltdaten 81
4.4.2 Korrelationsanalyse 83
4.4.3 Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens über die Distanz zwischen zwei AQ 86
4.4.4 Weg-Zeit-Analyse der Trajektoriendaten 92

5 Simulation 95
5.1 Methodische Rahmenbedingungen 95
5.2 Methodik 95
5.2.1 Zielgrößen 95
5.2.2 Modellstrecke „Harmonisierung“ 97
5.2.3 Modellstrecke „Stauwarnung“ 97
5.2.4 Kalibrierung 98

5.2.5 Ergebnis der Kalibrierung und Validierung 101
5.2.6 Variation von SBA-Parametern und Simulation 104
5.2.7 Anzahl der Simulationsläufe 104
5.3 Ergebnisse 105
5.3.1 Modellstrecke „Harmonisierung“ 105
5.3.2 Modellstrecke „Stauwarnung“ 110

6 Modell zur Wirkfeldanalyse von Stauwarnungen 115
6.1 Motivation 115
6.2 Beschreibung und Funktionsweise 115
6.2.1 Phase 0 und Phase 1 116
6.2.2 Phase 2 116
6.2.3 Phase 3 und Phasenübergang zu Phase 4 117
6.2.4 Phase 5 117
6.3 Verkehrsflusstheoretische Herleitung 118
6.4 Beispielergebnisse 122
6.4.1 Anwendungsbeispiele 122
6.4.2 Sensitivitätsanalyse 126

7 Zusammenfassung und Empfehlungen 129
7.1 FCD-basierte Analysen 129
7.2 Verkehrsflusssimulationen 129
7.3 Wirkfeldanalyse von Stauwarnungen 130
7.4 Fazit und Empfehlungen 131
7.5 Ausblick 131

Literatur 133

Bilder 137

Tabellen 142

Anhang 144

A.1 Ergebnisse der Korrelationsanalyse 144

A.1.1 Harmonisierungsschaltungen 144

A.1.2 Stauwarnungsschaltungen 148

A.2 Ergebnisse der Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens zwischen zwei AQ 151

A.2.1 A 44 von der AS Soest bis zum AK Dortmund/Unna 151

A.2.2 A 57 zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch 157

A.2.3 A 57 zwischen dem AK Meerbusch und dem AK Moers 160

A.2.4 A 5 zwischen dem Gambacher Kreuz und der AS Friedberg 163

A.2.5 A 5 zwischen der AS Friedberg und dem Gambacher Kreuz 168

A.2.6 A 5 von der AS Reiskirchen bis zur L3146 172

A.3 Weg-Zeit-Diagramme aus Drohnenmessungen 177

A.4 Parameter in PTV Vissim 183

A.5 Übersicht ausgewählter SBA-Strecken in Österreich und Schweiz 186

1 Einleitung und Zielsetzung

Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) werden eingesetzt, um den Verkehrsfluss zu verbessern und die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Sie sind ein seit den 1970er Jahren historisch gewachsenes System aus Sensorik, Steuerungslogik und Aktorik, welches mit den technologischen Fortschritten stetig weiterentwickelt wurde. Für die kollektive Verkehrsbeeinflussung gibt es zwei Ansätze zur Optimierung: Bauliche Maßnahmen (z. B. Verdichtung, Erweiterung) und betriebliche Maßnahmen (z. B. Anpassung der Steuerungslogik). Derzeit liegt der Fokus vorrangig auf dem Erhalt und dem Betrieb von SBA. Für die Verkehrs- und Umfelddatenerfassung werden Detektoren an Messquerschnitten (MQ) eingesetzt. Die auf der Grundlage der erfassten Verkehrs- und Umfelddaten bestimmten Maßnahmen werden über Anzeigequerschnitte (AQ) mittels Wechselverkehrszeichen (WVZ) an die Verkehrsteilnehmenden kommuniziert. Sowohl für MQ als auch für AQ gibt es Regelabstände, die für die Planung als Orientierung dienen. Die Abstände zwischen MQ bzw. AQ sollen so gewählt werden, dass die Grundsätze der Wirtschaftlichkeit eingehalten und die angestrebten verkehrlichen Nutzen erreicht werden. In der vorliegenden Untersuchung wird der Zusammenhang zwischen der Wirksamkeit und die Änderung der Harmonisierungswirkung von SBA im Kontext der MQ- und AQ-Abstände analysiert. Es wird geprüft, inwieweit kürzere AQ-Abstände die Wirksamkeit erhöhen und in welchem Verhältnis der erreichbare Wirksamkeitsgewinn zu den wirtschaftlichen Mehrkosten durch größeren Bauaufwand und Unterhaltung steht.

Die Anordnung der MQ und AQ hängt auch wesentlich von den örtlichen Gegebenheiten wie z. B. der Anschlussstellen-Dichte und der Übersichtlichkeit der Trassenführung ab. Daher sind in Deutschland im Vergleich zwischen den SBA teils stark variierende Querschnittsabstände für die Sensorik und Aktorik umgesetzt worden. Eine empirische Auswertung von Vor- und Nachteilen der unterschiedlichen Querschnittsabstände sowie eine Aktualisierung der Regelabstände wurden bisher nicht durchgeführt.

In diesem Projekt soll untersucht werden, inwiefern Abstände von AQ zueinander, Abstände von MQ zueinander sowie die Zuordnung von MQ (als Situationsauslösung) zu einem AQ (als Maßnahmenumsetzung in Form eines Schaltbilds) Auswirkungen auf die Wirksamkeit haben. Bezüglich der Wirkung sollen Szenarien in Abhängigkeit von den relevanten Rahmenbedingungen (maßgeblicher Zweck der Steuerung, Streckengeometrie, Verkehrsmenge und -zusammensetzung) entwickelt und hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit untersucht werden.

Dafür werden zunächst Forschungsthemen definiert, die die wesentlichen Teilaspekte der zu beachtenden Grundsätze zur Bewertung der MQ-/AQ-Abstände berücksichtigen. Darauf aufbauend wird ein Untersuchungs- und Bewertungskonzept erstellt, um die aufgestellten Forschungsthemen wissenschaftlich zu analysieren und zu bewerten. Im Rahmen der empirischen Untersuchung wird ein breites Spektrum bestehender SBA dokumentiert und bewertet. Bei der empirischen Analyse werden verschiedene Kombinationen von Abständen zwischen MQ und AQ sowie Zuordnungen von MQ zu AQ betrachtet. Die verkehrlichen Charakteristika der Strecke, die Anlagenkonfigurationen sowie die Steuerungseigenschaften und damit die mehrfach kausalen Zusammenhänge und Wechselwirkungen mit der Wirksamkeit von SBA werden bei der Analyse mitberücksichtigt.

Die zentrale Grundlage der empirischen Analyse ist die Erhebung von mikroskopischen Verkehrsdaten. Dadurch ist es möglich, die relevanten Verkehrskenngrößen sowohl mikroskopisch für jedes Fahrzeug als auch makroskopisch für ein Kollektiv, z. B. innerhalb einer Dichtewelle im Verkehrsfluss, zu betrachten. Die Verzögerung zwischen dem Eintreten der realen räumlich-zeitlichen Situation und der daraus resultierenden Maßnahmenumsetzung (Schaltbild) soll ebenfalls in Abhängigkeit von den Messzyklen untersucht werden. Zudem wird eine umfangreiche Analyse von Verkehrsdaten durchgeführt, die für einen deutlich längeren Zeitraum sowie eine große Anzahl von Streckenabschnitten ausgewertet werden mit dem Ziel, abgesicherte und statistisch signifikante Erkenntnisse zu gewinnen. Dabei ist zu beachten, dass hier ausschließlich der Verkehrsablauf bewertet wird. Ein möglicher zusätzlicher Nutzen für die Verkehrssicherheit ist nicht Gegenstand der empirischen Erhebungen im Rahmen des Projekts.

Aus den Ergebnissen der Untersuchung werden Empfehlungen für die zukünftige Planung, Erneuerung und ggf. Querschnittsverdichtung von SBA abgeleitet.

Das Projekt deckt als Forschungsschwerpunkte die räumlich-zeitliche Dynamik von Verkehrszuständen, die Wirkungsanalyse und die Optimierung von SBA in Abhängigkeit von den MQ- /AQ-Abständen ab und adressiert folgende Projektziele:

1. Entwicklung eines Erhebungskonzeptes, das Verkehrssituationen räumlich und zeitlich detailliert und mit hoher Genauigkeit zur Analyse von verkehrstechnisch sinnvollen Detektions- und Informationsabständen abbildet,
2. Entwicklung von Bewertungskonzepten für die SBA-Wirkung und -Wirksamkeit im Zusammenhang mit diversen kausalen Verknüpfungen und Wechselwirkungen der Wirksamkeit für unterschiedliche MQ-/AQ-Abstände,
3. Zusammenstellung von wissenschaftlichen Erkenntnissen zu idealen MQ-/AQ-Abständen sowie der optimalen Zuordnung von MQ und AQ in Abhängigkeit von relevanten Rahmenbedingungen wie Streckenfunktion und Wirkzielen,
4. Vorschlag eines praktischen Umsetzungskonzeptes zur Optimierung der Wirksamkeit von SBA durch Anpassung der Anlagenkonzeption.

2 Grundlagen

Als Grundlage für das Untersuchungs- und Auswertekonzept werden nachfolgend der Stand der Wissenschaft und Technik sowie Vorschriften und Gesetze zu den Themenbereichen

- Verkehrsbeeinflussung, Verkehrsdetektion und Datenfusion,
- Wirkung und Wirksamkeit von SBA,
- Befolgung von dynamischen WVZ-Inhalten,
- Optimierung der MQ-/AQ-Abstände in SBA,
- Räumlich-zeitliche Dynamik von Verkehrszuständen sowie
- Wirtschaftlichkeit von SBA

beschrieben.

2.1 Verkehrsbeeinflussung, Verkehrsdetektion und Datenfusion

Verkehrsbeeinflussung, also die kollektive Beeinflussung von Verkehrsteilnehmenden auf Autobahnen durch WVZ, findet im Wesentlichen an lokalen Anzeigequerschnitten statt und basiert auf den detektieren Verkehrsdaten von lokalen MQ. Die Abstände zwischen den Querschnitten hängen von den Randbedingungen der Strecke ab und sind das Ergebnis einer Abwägung zwischen wirtschaftlichen und verkehrstechnischen Zielen. Vorbereitend für die weitere Betrachtung dieser Aspekte werden nachfolgend kurz die Wirkungsweise von SBA, die Abstände von MQ/AQ in Regelwerken und der Praxis sowie eine Fusion der Daten(arten) beschrieben.

Wirkungsweise von SBA

Die Anzeigen einer SBA dienen dazu, den Verkehrsteilnehmenden durch Gefahrzeichen, Vorschriftzeichen oder Richtzeichen eine gezielte Maßnahme zu vermitteln, sodass diese ihr Fahrverhalten anpassen. Die dynamischen Schaltungen von WVZ reagieren auf vorhandene Verkehrsverhältnisse und lokale Ereignisse wie z. B. Unfälle, die manuell durch Operatorinnen und Operatoren oder automatisch durch eine Steuerungslogik im Anlagensystem aufbereitet werden. Durch die Abstände zwischen Anzeigequerschnitten entstehen Abschnitte, für welche die angezeigten Beeinflussungsmaßnahmen eine räumliche Gültigkeit besitzen. Analog verhält es sich mit den MQ, sodass eine räumliche Eingrenzung der Verkehrszustände vorliegt. Beeinflussungsmaßnahmen mittels SBA werden sowohl zur Aufrechterhaltung oder Verbesserung des Verkehrsflusses als auch zur Erhöhung der Aufmerksamkeit auf bzw. zur Vorwarnung vor gefährlichen Verkehrssituationen wie z. B. ein vorausliegendes Stauende eingesetzt. Hierfür ist es wichtig, dass die Maßnahme die Verkehrsteilnehmenden zeitlich und räumlich vorab erreicht, wodurch die Wahrscheinlichkeit verringert wird, dass diese von einer anlagenseitigen Fehleinschätzung oder gar einem Fehlalarm der Anlage ausgeht (vgl. LÖBBERING, 2018).

Abstände von MQ/AQ in Regelwerken und Praxis

Laut den Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen (RWVA 1997) stellt ein Abstand von 1,5 bis 2,5 km zwischen AQ den Regelfall dar. Vor allem auf Autobahnen mit dichten Knotenpunktabständen im Bereich von Ballungsräumen sowie auf

Autobahnen, auf denen die SBA auch zur Steuerung einer temporären Seitenstreifenfreigabe mitgenutzt wird, wurden häufig auch geringere AQ-Abstände umgesetzt. Diese stellen nach den RWVA (1997) Sonderfälle dar (Abstände zwischen 800 und 1.500 m).

Das schweizerische Bundesamt für Strassen (ASTRA) empfiehlt für die Abstände zwischen AQ eine Entfernung von 1.000 m (ASTRA 15016, 2015); allerdings weisen die Bestandsanlagen in der Schweiz zum Teil deutlich größere Abstände auf. Im Hinblick auf die Akzeptanz durch die Verkehrsteilnehmenden soll der Abstand nicht mehr als 1.500 m sowie aufgrund der Reaktionszeit nicht weniger als 400 m betragen. Die ASFINAG gibt für österreichische Autobahnen den Regelwert für Abstände zwischen AQ mit einem Bereich von 1.000 bis 2.000 m an (ASFINAG, 2006). In Großbritannien betragen die AQ-Abstände für zwei- und dreistreifige Autobahn-Richtungsfahrbahnen ungefähr 3.200 m und bei mehr als 3 Fahrstreifen 1.200 m. In den Niederlanden sind die AQ zwischen 500 und 900 m voneinander entfernt (vgl. STEINHOFF et al., 2002).

Die Regelabstände zwischen MQ im Bereich oder im Vorfeld von Maßnahmen zur Streckenbeeinflussung betragen nach den RWVA (1997) ca. 1.500 bis 3.000 m. Heutzutage werden zumeist Überkopfsensoren als Messdetektoren verwendet. Anzeige- und Messquerschnitt liegen in diesem Fall am gleichen Ort. Früher wurden in der Regel in die Fahrbahn eingelegte Induktionsschleifen eingesetzt, die vom AQ unabhängig und zumeist mit Abstand zu diesem stromaufwärts eingebaut wurden. Das Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ 2018) enthält keine allgemeinen Vorgaben zur Zuordnung von Mess- zu Anzeigequerschnitten. Die Zuordnung ist im Rahmen der verkehrsrechtlichen Anordnung in Form von Zuordnungstabellen festzulegen und muss parametrierbar sein. Es wird empfohlen, eine variable Zuordnung von Mess- und Anzeigequerschnitt zu verwenden, um z. B. technische Latenzen auszugleichen und die Bewegungen des Verkehrs zu berücksichtigen.

Datenfusion

Die in den Verkehrszentralen verwendeten SBA-Daten werden über lokale MQ detektiert und werden i. d. R. aggregiert weiterverarbeitet. Eine räumlich-zeitliche Erfassung der Verkehrsdaten kann über diese MQ nicht erfolgen. Für die räumliche Einschätzung des Verkehrszustands werden Verkehrskenngrößen aus lokalen Verkehrsdaten abgeleitet. Eine räumlich ausgedehnte Erfassung kann z. B. über Videodetektion erfolgen. Im Projekt FE 03.0521 „Harmonisierung des Verkehrsablaufs im Bereich von SBA – Optimierung und Erweiterung der Verfahren“ (SCHWIETERING et al. 2022) wurden wesentliche Grundlagen für die Erstellung eines entsprechenden Messkonzepts unter Berücksichtigung verschiedener querschnitts- und abschnittsbezogener Datenarten sowie die Aufbereitung und Haltung der erhobenen Daten in einer Datenbank erarbeitet und erprobt. Ziel dieser Datenbank ist es, die erhobenen Daten zu vereinheitlichen und kompatibel zueinander zu machen, sodass eine vervollständigte, gesamtheitliche Auswertung aller Datenarten erfolgen kann.

Die „Hinweise zur Datenvervollständigung und Datenaufbereitung in verkehrstechnischen Anwendungen“ (FGSV 2003a) enthalten einen Leitfaden für den Umgang mit der Datenvervollständigung und Datenaufbereitung sowie Überlegungen auf konzeptioneller Ebene. Es werden vier Ebenen für die Datenintegration definiert. In jeder Ebene wird der Grad der Komplexität der vorhandenen Informationen verringert:

- Ebene 1: Lokale Datenerfassung
- Ebene 2: Verbindung von Daten aus mehreren Quellen eines Streckenabschnitts
- Ebene 3 und 4: Netzweite Datenfusion und Intermodalität

Die Messdaten aus verschiedenen Quellen können unterschiedlich aussagekräftig sein. Messwerte können zudem fehlerbehaftet sein und ggf. Ausreißer enthalten. Diese gilt es in der ersten Ebene zu korrigieren und herauszufiltern, z. B. durch eine geeignete Messwertglättung. Zu beachten ist hierbei, dass dadurch längere Reaktionszeiten entstehen und die Dynamik der Messdaten verloren geht. Auch bei Floating Car Data (FCD) kann es zu Unschärfen kommen, z. B. durch Ungenauigkeiten der GPS-Verortung.

Nachdem die Verkehrsdaten abhängig von der Intervalllänge aggregiert wurden, werden diese anhand von unterschiedlichen Methoden qualitätsgesichert. Für Anwendungen außerorts sind Plausibilitätsprüfungen gemäß dem MARZ (2018) durchzuführen und unplausible Werte zu ersetzen. Um die Verkehrsdaten der aggregierten Zeitintervalle zu ermitteln, werden laut FGSV (2003a) folgende vier Verfahren angewendet:

- einfache arithmetische Mittelwertbildung,
- gleitende arithmetische Mittelwertbildung,
- gewichtete, gleitende arithmetische Mittelwertbildung,
- exponentielle Mittelwertbildung.

Manuell gemeldete Daten, Unfallmeldungen und Baustellenberichte werden jedoch erst auf einer höheren Ebene fusioniert.

In der zweiten Ebene soll die Aussagekraft der Daten weiter gestärkt werden. Hierfür können z. B. Muster identifiziert, räumliche und/oder zeitliche Informationslücken geschlossen sowie Prognosen angestellt werden. Die Verbindung der Datengrundlage aus Ebene 1 mit weiteren Informationsquellen wie erkannten Störungen und Umfeldinformationen erhöht die Datenqualität. Auch eine Verkehrsmodellierung kann im Zuge einer Datenfusion eine weitere Schärfung der Daten bringen.

Die höheren Ebenen 3 und 4 zeichnen sich charakteristisch durch großräumige Klassifikationen und Entscheidungen mit strategischen Komponenten aus. In Ebene 3 können Daten mittels eines Verkehrsablaufmodells innerhalb eines Verkehrsnetzes fusioniert werden. Die Berücksichtigung der Wechselwirkung mit der Verkehrssteuerung, wie z. B. die Ansteuerung von WVZ oder die strategische Beeinflussung von Lichtsignalanlagen, erfolgt in Ebene 4. Die Hinweise der FGSV (2003a) gehen für die beiden höchsten Ebenen jedoch nicht näher ins Detail.

2.2 Wirkung und Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen

Der Einsatz von SBA hat zwei wesentliche Ziele. Zum einen ist dies die Erhöhung der Verkehrssicherheit, insbesondere durch situationsabhängige Gefahrenwarnungen. Zum anderen soll auch die Verkehrsqualität durch Harmonisierung des Verkehrsablaufes erhöht werden. Die „Hinweise zur Wirksamkeitsschätzung und Wirksamkeitsberechnung von VBA“ (FGSV 2007) benennen die Erhöhung der Verkehrssicherheit dabei als Primärziel, weisen aber darauf hin, dass Verkehrssicherheit und Verkehrsqualität in einer Wechselbeziehung zueinanderstehen.

MANGOLD et al. (1996) haben im Rahmen einer Wirksamkeitsuntersuchung für alle untersuchten Streckenabschnitte einen positiven Einfluss von SBA auf die Unfallentwicklung festgestellt, betonten jedoch den weiterhin großen Anteil von Unfällen bei Nässe am Gesamtunfallaufkommen. Die Auswirkungen von SBA auf die Verkehrssicherheit werden von SIEGENER et al. (2000) quantifiziert, welche einen Rückgang der Unfallrate auf 0,12 Unfälle je 10^6 Fahrzeugkilometer auf zwei- und dreistreifigen Fahrbahnabschnitten ermitteln. Für bereits vorhandene, geringere Unfallraten gehen SIEGENER et al. von einer neutralen Wirkung der SBA aus, d.h. es ist davon auszugehen, dass eine SBA keine zusätzliche Verkehrssicherheitswirkung mehr erzielen kann. Sie ermitteln einen Rückgang der Unfallrate bei Nebel von 80 % und einen Rückgang der Unfallrate bei Massenunfällen von 54 %.

Nach PISCHNER et al. (2003) wird durch die Harmonisierung der Geschwindigkeiten während hoher Verkehrsbelastungen die Wahrscheinlichkeit von Verkehrszusammenbrüchen gesenkt. Die mittlere Geschwindigkeit steigt dabei um 10 % an. SCHICK (2003) kommt ebenfalls zu der Erkenntnis, dass SBA die Wahrscheinlichkeit für Verkehrszusammenbrüche reduzieren. GEISTEFELDT (2009) ermittelte für Strecken mit SBA eine deutlich geringere Varianz der Kapazitätsverteilung infolge der Geschwindigkeitsharmonisierung und begründete damit die schon von PISCHNER et al. (2003) und SCHICK (2003) festgestellte Reduzierung der Anzahl der Verkehrszusammenbrüche zu Spitzenbelastungszeiten. In den „Hinweisen zur Wirksamkeitsschätzung und Wirksamkeitsberechnung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen“ (FGSV, 2007) wird mit Verweis auf die Untersuchung durch PISCHNER et al. (2003) zu Prognosezwecken davon ausgegangen, dass eine SBA 5 % der Staustunden vermeidet. Basierend auf den zuvor genannten Erkenntnissen wird im „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“ (HBS, FGSV 2015) das Vorhandensein einer SBA auf einer (Teil-) Strecke im Verfahren für die Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs auf Strecken von Autobahnen durch eine Erhöhung der Grenze des Auslastungsgrads zwischen Qualitätsstufe D und E von 0,90 auf 0,92 berücksichtigt.

Insbesondere beim Neubau einer SBA können Planende auf vorhandene Regelwerke und Erfahrungswerte zurückgreifen. In den „Hinweisen zur Wirksamkeitsschätzung und Wirksamkeitsberechnung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen“ (FGSV, 2007) wird ein Verfahren zur Wirksamkeitsschätzung (ex ante) und zur Wirksamkeitsberechnung (ex post) beschrieben. Die Schätzung basiert auf den Daten des unbeeinflussten Verkehrs des Untersuchungsbereichs. Dies ermöglicht auch einen Vergleich der Wirkungen vor und nach der Inbetriebnahme der SBA sowie daraus folgend der Wirksamkeit der Anlage bzw. der Maßnahmen. Um den Einfluss einer SBA auf den Verkehrsablauf möglichst sauber identifizieren zu können, müssen für die beiden zu vergleichenden Datensätze möglichst ähnliche Randbedingungen sowie Einflussfaktoren wie Umfeld- und Verkehrsbedingungen vorliegen (vgl. SCHICK, 2003).

Für die Untersuchung der Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen werden in den „Hinweisen zur Wirksamkeitsschätzung und Wirksamkeitsberechnung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen“ (FGSV, 2007) standardisierte Verfahren auf Basis von Vorher-Nachher-Vergleichen (s. u.) aufgestellt. Diese Verfahren werden im Forschungsprojekt „Begleitforschung und Ergänzung des Merkblatts ’Ermittlung der Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen’“ (BUSCH et al., 2009) evaluiert und für den Bereich der Wirksamkeitsschätzung (ex ante) ergänzt.

Die Begriffe „Wirkung“ und „Wirksamkeit“ werden in der verkehrstechnischen Literatur häufig synonym verwendet, weswegen die beiden Begriffe voneinander abgegrenzt werden sollten. Unter dem Begriff „Wirkung“ werden sowohl erwünschte Effekte hinsichtlich definierter Wirkziele als auch zusätzliche, ggf. auch negative Effekte verstanden. Die Wirksamkeit einer Maß-

nahme der Verkehrsbeeinflussung beschreibt dagegen ausschließlich erwünschte Effekte bezüglich vorher definierter Wirkziele und quantifiziert, in welchem Maße diese Ziele erreicht wurden. Wirkziele können gemäß HILGERS et al. (2021) die Steigerung der Verkehrssicherheit, die Verstetigung des Verkehrsflusses, die Steigerung der Leistungsfähigkeit der Verkehrsanlage, die Verbesserung der Regelbefolgung oder weitere sein. Die Wirkung spiegelt sich in Kenngrößen wie Reisegeschwindigkeit, Pulkgröße, Pulkdichte, Geschwindigkeitsdifferenzen, Standardabweichung der Geschwindigkeit, Fahrstreifenauslastung, Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs, Änderung der Verkehrsdichte, mittlere Nettozeit- und -weglücken, Anteil kritischer Nettozeit- und -weglücken etc. wider und ist als makroskopische oder mikroskopische Kenngröße messbar. Die Wirksamkeit quantifiziert die Erreichung definierter Wirkziele einer Verkehrsbeeinflussungsmaßnahme und wird durch (positive) Wirkungskenngrößen beschreibbar.

Bei Untersuchungen hinsichtlich der Wirkung bzw. Wirksamkeit von SBA müssen Vergleiche mit ähnlichen Randbedingungen zwischen den Vergleichssituationen, also z. B. bei beeinflusstem gegenüber unbeeinflusstem Verkehrsablauf, angestellt werden. Einflussfaktoren wie Umfeld- und Verkehrsbedingungen müssen im Idealfall für einen plausiblen Vergleich konstant bleiben und die Weg- bzw. Standortparameter vergleichbar sein, sodass ein Einfluss einer SBA auf den Verkehrsablauf identifiziert werden kann (vgl. SCHICK 2003). Ergänzend ist zu berücksichtigen, dass selbst bei konstanten Randbedingungen die stochastischen Einflüsse auf den Verkehrsfluss variieren können, dem aber grundsätzlich mit hinreichender Datenmenge entgegengewirkt werden kann (statistische Signifikanz). Da solch ideale Randbedingungen nur äußerst schwer zu erreichen sind, werden meist vereinfachte Bedingungen angenommen. SCHICK (2003) hat daher die verschiedenen Messkonzepte beschrieben; Vorher-Nachher-Vergleich (Vergleich von Daten vor und nach Inbetriebnahme einer SBA), „Idealer“ Mit-Ohne-Vergleich, „unechter“ Mit-Ohne-Vergleich (Daten eines Standorts zu unterschiedlichen Zeiten, idealerweise mit deaktivierter SBA) sowie Mit-Ohne-Vergleich (Daten verschiedener, vergleichbarer Querschnitte innerhalb/außerhalb einer SBA).

Trotz des zunehmenden Technologieeinsatzes in Fahrzeugen zur Unterstützung der Verkehrssicherheit, der Modernisierung der Straßeninfrastruktur mit damit verbundenen Sicherheitsverbesserungen und des zunehmenden Einsatzes von Verkehrsüberwachungsmaßnahmen wurden die Ansätze zur Bewertung der Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsmaßnahmen im Hinblick auf die Verkehrssicherheit noch nicht überprüft und aktualisiert. Für die Bewertung der Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsmaßnahmen auf die Verkehrsqualität stehen zwar standardisierte Verfahren zur Verfügung, allerdings ist die Datenbeschaffung aus Zeiträumen vor der Inbetriebnahme schwierig. Bei der Modernisierung von Anlagen müssen zudem neue Ansätze zum Nachweis der Wirksamkeit gefunden werden, da die standardisierten Verfahren nach den „Hinweisen zur Wirksamkeitsschätzung und Wirksamkeitsberechnung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen“ (FGSV, 2007) und BUSCH et al. (2009) ausschließlich Vergleiche mit unbeeinflussten Zeiträumen anstellen. Zudem basieren die verfügbaren Verfahren zur Bewertung der Wirksamkeit auf sehr grob aggregierten Daten, was nicht nur an der Reduzierung des Aufwands für die Durchführung der Analyse liegt, sondern auch an der Verfügbarkeit vergleichbarer Daten aus dem Vorher-Zeitraum. In den Forschungsarbeiten von KAPPICH et al. (2010) und HILGERS et al. (2021) wurden zwar neue Analysemethoden auf Basis mikroskopischer Kenngrößen vorgestellt bzw. angewendet, allerdings besteht noch wenig Erfahrung insbesondere bei der Auswertung empirischer mikroskopischer Daten. Zudem wurde bislang nicht analysiert, welcher Einflussfaktor (z. B. Anlagenkonfiguration, Parametrierung, Steuerungsmodell) welchen Wirkungsanteil an der erkannten Wirkung erzielt; d. h. die bestehenden kausalen Verknüpfungen aus Anlagenkonzeption und -beschaffenheit, Befolgung und Wirkung sind derzeit nicht bekannt.

2.3 Befolgung von dynamischen Wechselverkehrszeichen-Inhalten und Harmonisierungswirkung

Den „Hinweisen zur Wirksamkeitsschätzung und Wirksamkeitsberechnung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen“ (FGSV, 2007) zufolge kann die Wirksamkeit einer SBA in Form einer effektiven Erhöhung der Verkehrssicherheit und -qualität nur dann erreicht werden kann, wenn die Anlage entsprechende Akzeptanz bei den Verkehrsteilnehmenden erfährt (vgl. Abbildung 2-1). Die RWVA (1997) beschreiben die Akzeptanz einer Verkehrsbeeinflussungsanlage als Voraussetzung für einen dauerhaft erfolgreichen Betrieb. Dazu ist eine hohe Aktualität des Anzeigezustands essenziell.

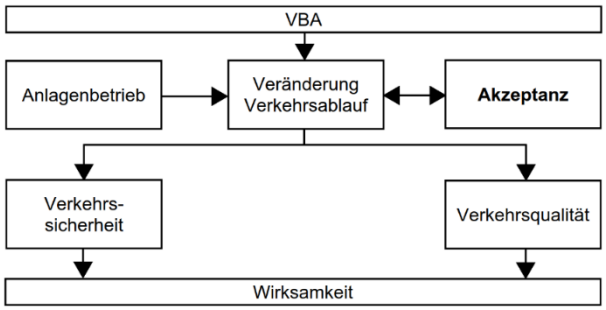


Abbildung 2-1: Wirksamkeit von VBA nach FGSV (2007)

Bei bestehenden SBA kann durch die Analysen der Daten des beeinflussten Verkehrs das Verkehrsverhalten der Verkehrsteilnehmenden abgeleitet werden. Eine Kenngröße ist dabei die Befolgung einer Maßnahme, welche ein Indikator für die Akzeptanz der Maßnahme durch die Verkehrsteilnehmenden sein kann. In der Literatur werden die Begriffe „Akzeptanz“ und „Befolgung“ häufig synonym verwendet, allerdings sind ihre Bedeutungen klar voneinander zu unterscheiden. „Akzeptanz“ impliziert eine wohlwollende Zustimmung jeder einzelnen am Verkehr teilnehmenden Person. Die Akzeptanz ist damit nicht automatisiert messbar und kann nur durch Befragungen erhoben werden. „Befolgung“ hingegen setzt keine Zustimmung der oder des Verkehrsteilnehmenden voraus, sondern kann auch beispielsweise durch Geschwindigkeitskontrollen erreicht werden. Auch die aktuell vorherrschenden Verkehrsverhältnisse können die individuelle Geschwindigkeitswahl direkt beeinflussen. Die Befolgung kann anhand von Verkehrsdaten und Schaltbildinformationen untersucht und bestimmt werden. Die Befolgung kann durch Maßnahmen wie Geschwindigkeitskontrollen wie auch durch die Erhöhung der Akzeptanz z. B. durch Informationen über die Funktionsweise der Verkehrsbeeinflussungsanlagen positiv beeinflusst werden (STEINHOFF et al., 2002; SCHWIETERING et al., 2019). In verschiedenen Projekten zur Optimierung von SBA wurde eine Methodik zur Bestimmung der Wirksamkeit entwickelt und angewendet, welche auf (semi-) automatisch und manuell auswertbaren Vergleichspunkten beruht (SCHWIETERING und LÖBBERING, 2018; SCHWIETERING et al., 2020). Hierbei werden je Querschnitt die Schaltwechsel, die Befolgung der Schaltungen, die Geschwindigkeitsdifferenzen, die Harmonisierungswirkung und die Leistungsfähigkeit betrachtet. Die Schaltwechsel sollen sowohl qualitativ (z. B. Angemessenheit der Schaltzeitpunkte) als auch quantitativ (z. B. nicht zu viele Schaltwechsel innerhalb kurzer Zeit) bewertet werden. Hierfür werden die Mess- und Schaltdaten parallel betrachtet und basierend auf einer zuvor abgestimmten Schaltstrategie (z. B. proaktives Einschalten und reaktives Ausschalten einer Schaltstufe) analysiert. Die Befolgung wird vereinfachend über einen Vergleich der gefahrenen zu den angezeigten Geschwindigkeiten bestimmt. Ist die gefahrene Geschwindigkeit deutlich größer als die angezeigte, so liegt eine mangelnde Befolgung vor. Prämisse ist hierbei, dass die Schaltung bereits qualitativ für gut befunden wurde. Die Befolgung allein ist dabei kein Indikator für die Wirksamkeit einer SBA, da eine bessere

Befolgung nicht zwangsläufig eine bessere Wirksamkeit der SBA bedeutet. Ist hingegen die gefahrene Geschwindigkeit geringer als die angezeigte Geschwindigkeit, ist zu vermuten, dass ein fehlerhafter Steueralgorithmus vorliegt. Ein Indikator für die Wirksamkeit einer SBA ist die Harmonisierungswirkung. Diese wurde jedoch noch nicht allgemein definiert. SCHWIETERING et al. (2020) haben die Harmonisierungswirkung als kollektive Betrachtung der möglichen Wirkungskenngrößen Befolgung, laterale und longitudinale Geschwindigkeitsdifferenzen bzw. Standardabweichung der Geschwindigkeiten sowie auch Reduzierung insbesondere von kurzen, kleinräumigen Stausituationen beschrieben. Dazu wurden diese Kenngrößen teilautomatisiert ausgewertet sowie über in Ganglinien, Punkt- und Weg-Zeit-Diagrammen visualisierte Verkehrs- und Schaltdaten anhand von zuvor definierten Zielkriterien manuell bewertet.

STEINHOFF et al. (2002) differenzierten zwischen der absoluten und relativen Akzeptanz (gemeint ist hier nach obiger Definition eigentlich die Befolgung). Die absolute Akzeptanz ergibt sich aus der Differenz der mittleren gefahrenen Geschwindigkeiten und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Die relative Akzeptanz hingegen wird unter gegebenen Bedingungen durch den Anteil der mittleren Änderung des Geschwindigkeitsniveaus der Pkw berechnet. Im Rahmen des europäischen Projektes TROPIC (BALZ und ERMER, 1998) wurde festgestellt, dass die angezeigten Geschwindigkeiten von den Verkehrsteilnehmenden auf der untersuchten Anlage A 6 Schwabach akzeptiert wurden. Die Ergänzung von Zusatzinformationen führte dabei zu noch mehr Akzeptanz. Reine Gefahrenwarnungen wurden von den Verkehrsteilnehmenden weniger akzeptiert als Schaltbilder mit Geschwindigkeitsanzeigen und Zusatzinformationen (BALZ und ERMER, 1998). Laut STEINHOFF et al. (2002) benötigen die meisten Autofahrenden 1 bis 2,5 Sekunden zur Interpretation der Schaltbilder. Es konnte festgestellt werden, dass sich die Standardabweichung der Einzelgeschwindigkeiten bei präventiver Geschwindigkeitsanzeige von 90–120 km/h innerhalb eines 30-Sekunden-Intervalls um ein Drittel verringert.

In Schweden hat die Anzeige der zulässigen Höchstgeschwindigkeit in Verbindung mit Gefahrenzeichen zu einer Abnahme der durchschnittlich gefahrenen Geschwindigkeiten um 10 % sowie einer Zunahme der Weglücken um 20 % geführt (KARLBERG, 2002).

Eine zusammenfassende Aussage bezüglich der nach bisherigem Kenntnisstand ermittelten Befolgung von SBA stellt sich als komplex dar. Ursache dafür ist hauptsächlich die Frage nach der zugrundeliegenden Begriffsdefinition, den festgelegten Schwellenwerten für den Grad einer Geschwindigkeitsüberschreitung und der Parametergewichtung in den verschiedenen Untersuchungen:

- Nach der klassischen soziologischen Definition ermittelten FÄRBER und FÄRBER (2002) im Rahmen einer Befragung von Fahrzeugführenden ein widersprüchliches Ergebnis: 78 % der Befragten sahen eine positive Wirkung in SBA-Schaltungen, aber nur etwa ein Drittel verhielt sich an den Anzeigequerschnitten entsprechend der Verkehrszeichen. Verständnisschwierigkeiten wurden dabei als Grund ausgeschlossen.
- MANGOLD et al. (1996) legten unterschiedliche Geschwindigkeitsüberschreitungsklassen fest und berechneten einen Bewertungsindex anhand unterschiedlicher Überschreitungsanteile und einer Gewichtung nach dem Schulnotensystem (Note 1 bis 6). Für MANGOLD et al. ist auch erzwungene Befolgung eine auswertbare Form von Befolgung. So werden teils gute Bewertungsindizes für Situationen festgestellt, in denen Verkehrsteilnehmende keine Möglichkeit haben, die zulässige Höchstgeschwindigkeit zu überschreiten. Die Befolgung von Geschwindigkeitsbeschränkungen an SBA wird allgemein als gut bis befriedigend (Note 2 bis 3) bewertet.

- STEINHOFF et al. (2002) berücksichtigten den Verkehr im Zusammenhang mit den Umfeldbedingungen und bewerteten die Befolgung von Geschwindigkeitsbeschränkungen an SBA als gering. Begründet wurde das Fazit mit der häufigen Missachtung von Geschwindigkeitsbeschränkungen, unabhängig vom Erfolg der SBA.
- Für ein Analyseverfahren legte STEINHOFF (2003) die höchste Klasse der Bewertungsskala mit dem Toleranzbereich einer maximalen Überschreitung der Geschwindigkeit von 20 km/h fest, da ab 21 km/h ein Punkt im Flensburger Verkehrszentralregister droht. Sie wies dabei auf den von STEINAUER (1999) verwendeten Toleranzbereich in Höhe von 15 km/h hin, welcher die Grenze zum Tatbestand nach dem Straßenverkehrsrecht darstellt.
- KAPPICH et al. (2010) sahen eine Geschwindigkeitsbeschränkung in einem Toleranzbereich von ± 10 km/h als von den Fahrenden befolgt an. Eine weitere Abstufung erfolgt nicht. Ähnlich wie bei MANGOLD et al. (1996) wurde der verkehrliche Kontext nicht berücksichtigt, wodurch auch eine erzwungene Befolgung zu einer guten Bewertung führt.

Eine verbreitete Ansicht ist, dass insbesondere die Übereinstimmung aus SBA-Schaltung und realer verkehrlicher oder witterungsbedingter Situation eine Grundvoraussetzung für die Befolgung der Verkehrsteilnehmenden ist. MARNACH (2018) untersuchte die Befolgung von Geschwindigkeitsbeschränkungen an drei SBA-Strecken in NRW und konstatierte eine erkennbar unterschiedliche Befolgung von SBA-Anzeigen je nach Untersuchungsstrecke. Beschränkungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 120 km/h wurden tendenziell am besten befolgt, Beschränkungen auf 80 km/h am schlechtesten. Wurden Zusatzzeichen in Kombination mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung geschaltet, hatte dies im Großteil der Fälle eine leicht geschwindigkeitsreduzierende Wirkung im Vergleich zur alleinigen Schaltung der Geschwindigkeitsbeschränkung. MARNACH ordnete im Kontext der Untersuchung die Verwendung des Begriffs der Befolgung ein und hielt fest, dass zur Quantifizierung von Befolgungen bislang einheitliche Schwellenwerte fehlen. Die in vergangenen Studien subjektiv und teils mit großen Unterschieden festgelegten Schwellenwerte führten zu mitunter deutlich abweichenden Bewertungen. Im Hinblick auf zukünftige Geschwindigkeitsuntersuchungen wurde ein einheitlich definiertes Bewertungsverfahren für die Befolgung der gängigen Geschwindigkeitsbeschränkungen angeregt.

2.4 Optimierung der Steuerung für unterschiedliche AQ- und MQ-Abstände in SBA

HEGEWALD (2021) hat die Einflüsse der Entfernung zwischen Anzeigequerschnitten auf Basis der agentenbasierten Simulation (Fahrzeug-Folge-Modell „Intelligent Driver Modell“) untersucht. Es wurde ein Befolgungsmodell abgebildet, das das Zusammenspiel von SBA und Befolgungsverhalten darstellt. Das verwendete Befolgungsmodell sah sowohl eine grundsätzliche Missachtung von Geschwindigkeitsbeschränkungen vor als auch eine zunehmende Missachtung in Abhängigkeit vom Abstand zum letzten AQ. Dieses wurde auf je eine Modellstrecke ohne und mit SBA für zwei unterschiedliche AQ-Abstände (1.500 und 750 m) angewendet. Für die Szenarien wurden Dichtewellen aufbereitet und ausgewertet. Im Fall mit SBA zeigte sich beim größeren der beiden Abstände für eine Stausituation eine Auflösung nach 9 Minuten, wohingegen bei einem halbierten Abstand die Stauauflösung erst 3 Minuten später erfolgte. Größere Abstände führten zu räumlich-zeitlich früheren Reaktionen, was vor einer Verkehrsstörung ein stärker proaktives, also präventiveres Eingreifen bedeutet. Die SBA mit AQ-Abständen von 750 m zeigte hingegen eine bessere räumlich-zeitliche Reaktion auf das Ende

der Verkehrsstörung. Verkehrliche Randbedingungen (Zusammensetzung des Kollektivs, Ausmaß der Störung, Verkehrsnachfrage) in Verbindung mit der SBA-Konfiguration haben einen wesentlichen Einfluss auf die Wirkung der Maßnahmen.

Zur Bewertung der MQ-Abstände haben RIEGELHUTH und GLATZ (2015) eine Häufigkeitsverteilung von Staulängen genutzt. Sie fanden heraus, dass die meisten Staus (ca. 75 %) auf den betrachteten Strecken eine Länge von weniger als 2 km hatten. Für den zuvor bereits genannten Regelfall der MQ-Abstände nach RWVA (1997) würde dies bedeuten, dass ein Großteil der Staus für kurze Zeit zwischen den MQ liegt und ggf. nicht vollständig detektiert wird. RIEGELHUTH und GLATZ (2015) haben die Geschwindigkeitsdaten der SBA im Abschnitt Gambacher Kreuz – Bad Homburger Kreuz auf der A 5 für den Zeitraum von vier Monaten untersucht und festgestellt, dass die Abgrenzung von sich in und gegen die Fahrtrichtung bewegenden Verkehrsstörungen bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 90 – 95 km/h liegt. So werden in Hessen beispielsweise zur Harmonisierung von Pulks zulässige Höchstgeschwindigkeiten von 120 km/h auf bis zu 2 km stromabwärts liegenden AQ angezeigt. Hingegen werden Geschwindigkeitsbeschränkungen von 80 km/h oder weniger am AQ stromaufwärts des auslösenden MQ angezeigt.

Angelehnt an diese Erkenntnisse haben SCHWIETERING et al. (2020) die Bewegungsrichtung von Verkehrssituationen an einer Strecke mit SBA in Baden-Württemberg untersucht. Darauf aufbauend wurde ein Konzept erstellt, um die Bewegungsrichtung bei der Anzeige von SBA-Maßnahmen, insbesondere Geschwindigkeitsanzeigen, sinnvoll berücksichtigen zu können. Hierbei wurden Maßnahmen zur Harmonisierung der Geschwindigkeiten von mindestens 100 km/h bzw. äquivalenten Verkehrssituationen um einen Querschnitt stromabwärts erweitert. Bei Anzeigen von zulässigen Höchstgeschwindigkeiten unter 100 km/h bzw. äquivalenten Verkehrssituationen wurde die Geschwindigkeitsanzeige stromaufwärts erweitert. Die Trichterungsschritte wurden auch abhängig vom AQ-Abstand geändert, indem bei Abständen von mehr als 1,5 km ein Trichterungsschritt von 40 km/h und bei Abständen von weniger als 1,5 km ein Trichterungsschritt von 20 km/h verwendet wurde. In einem Testbetrieb (closed loop) zeigte sich, dass die Stauereignisse im Vergleich zum Vorher-Zeitraum ein höheres Geschwindigkeitsniveau und eine geringere zeitliche und räumliche Ausbreitung aufwiesen. Insbesondere für Störungssituationen mit geringer räumlich-zeitlicher Ausdehnung besteht das Potenzial, diese durch eine gezielte Harmonisierung der Geschwindigkeiten vollständig zu vermeiden. Die Anzahl von solchen kleinen Störungssituationen gibt zudem Aufschluss über die Harmonisierungswirkung (vgl. Kapitel 2.3). Zudem muss die Kapazität des Streckenabschnitts überprüft werden, da eine optimale Harmonisierungswirkung nur dann vorliegt, wenn auch eine hohe Auslastung der Verkehrsanlage gehalten werden kann. Eine hohe Auslastung liegt dann vor, wenn die maximale Verkehrsstärke möglichst nahe der (rechnerischen) Kapazität des Streckenabschnitts liegt. Mit dieser Methodik ist es möglich, Daten alleinstehend oder aber über Vergleichszeiträume bezüglich der Wirksamkeit der Steuerung zu bewerten. Diese Methodik hat sich in verschiedenen Projekten (z. B. SCHWIETERING und LÖBBERING, 2018, SCHWIETERING et al., 2020) bewährt und deckte sich in den Ergebnissen auch mit den Eindrücken von Verkehrsteilnehmenden, die den Verkehrszentralenbetreibern eine Rückmeldung zur aktualisierten Steuerung gegeben haben. Die zum Teil großen Abstände zwischen MQ bzw. AQ bieten nur eingeschränkte Detektions- und Anzeigemöglichkeiten, die eine Verzögerung und somit eine Verringerung der Aktualität der Maßnahme bezogen auf den Verkehrszustand bedeuten. Die zumeist verwendete diskrete Abstufung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit in 20 km/h-Schritten ist dabei gegenüber 40 km/h-Schritten der Ansatz, der die Verkehrssicherheit priorisiert, wodurch die Aktualität etwas zurückgestellt ist. Hinzu kommt, dass die in der Regel in einem Abstand von 1,5 bis 2 km liegenden MQ keine genaue Aussage über

den Zustand des Verkehrsflusses dazwischen zulassen, insbesondere aufgrund der stochastischen Eigenschaften der Verkehrskenngrößen bzw. des Verkehrsablaufs. Das kann beispielsweise dazu führen, dass bei Verkehrsstörungen, die eine räumliche Ausbreitung von weniger als 2 km haben, die Positionen des Störungsanfangs und -endes oft nicht erkannt werden können. ABARGHOOIE (2020) hat dazu empirisch festgestellt, dass umso mehr Verkehrsstörungen identifiziert werden können, je kürzer der Abstand zwischen den MQ ist. Vor allem bei sich in Fahrtrichtung bewegenden Dichtewellen zeigte sich, dass die meisten Verkehrsstörungen bei einem MQ-Abstand von weniger als 1 km zuverlässig erkannt werden können.

SBA verwenden für die Eingangsgrößen der Situationserkennungsverfahren in der Regel geglättete Verkehrsdaten. Die Glättungsverfahren nach dem MARZ (2018) werden zur Vermeidung kurzfristig auftretender, zufälliger Schwankungen eingesetzt, was einen wesentlichen Einfluss insbesondere auf die Konstanz/Stabilität einer angezeigten Maßnahme und somit auf die Harmonisierungswirkung hat. Das Standardverfahren für die Messwertglättung im MARZ (2018) ist der „gleitende Mittelwert mit überlagertem gleitendem Trend“. Da sich dieses Prognosemodell ausschließlich auf die Extrapolation aus den Messwerten der vorausgegangenen Intervalle sowie aus den intervallweisen Änderungen der Messwert-Differenzen bezieht, kann je nach Gewichtung und Parametrierung der Verfahrensparameter α (Faktor für die Messwert-Glättung) und β (Faktor für den Messwert-Trend) ein plötzlicher Geschwindigkeitseinbruch erst deutlich verzögert identifiziert werden, ohne dabei zu viele Fehlalarme in Kauf zu nehmen (vgl. SCHICK, 2003; MARZ, 2018). Nach SCHWIETERING und LÖBBERING (2018) ist bei 1-Minuten-Intervallen mit einer natürlichen Latenz von 1,5 Minuten von der Datenerfassung bis zur Umsetzung der Schaltung zu rechnen. Bei kürzeren Aggregationsintervallen wie 15 Sekunden verkürzt sich diese Latenz auf bis zu 45 Sekunden, sodass auf eine Situation doppelt so schnell reagiert werden kann. SCHICK (2003) hat dargestellt, wie ein schneller und starker Geschwindigkeitseinbruch durch die geglätteten und trendextrapolierten Werte eine Verzögerung um etwa ein 1-Minuten-Intervall aufweisen kann (vgl. Abbildung 2-2).

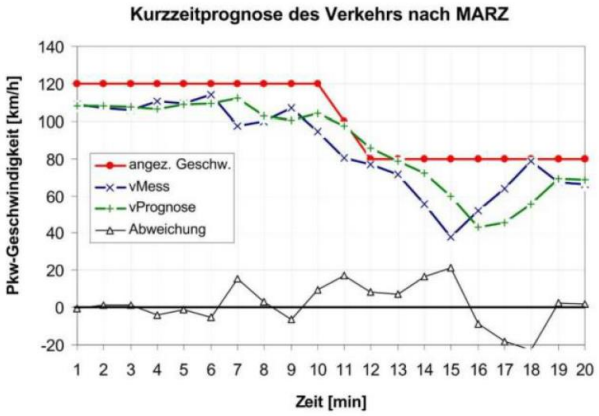


Abbildung 2-2: Untersuchung zur Qualität der Kurzzeitprognose nach MARZ (1999) und Vergleich mit Messdaten am MQ (SCHICK, 2003)

SCHWIETERING et al. (2019) haben einen regelungstechnischen Ansatz in der Verkehrsbeeinflussung untersucht. Sie stellten einen Gesamtregelkreis für SBA mit den Kenngrößen Geschwindigkeit und Verkehrsdichte als Regelgrößen auf. Die Regelung basiert auf Daten des MQ stromaufwärts der zu beeinflussenden AQ zur Erkennung der Situation; die Bewertung der gesetzten Maßnahme erfolgt am MQ stromabwärts des AQ. Folgende Erkenntnisse wurden in der Studie anhand simulierter Daten gewonnen:

- Strecke stromabwärts des AQ: Die Hauptwirkung der Änderung der Verkehrsdichte aufgrund der Reaktion auf die angezeigte Schaltung tritt in einem Bereich von etwa 1 km stromabwärts des AQ auf. Die wesentliche Wirkung wurde auf einem etwa doppelt so langen Abschnitt (2 km) festgestellt. Das bedeutet, dass die Anzeige eines AQ keine wesentliche stationäre Auswirkung auf Anzeigeinhalte des nächsten stromabwärts liegenden AQ hat, wenn dieser weiter als 2 km vom auslösenden AQ entfernt ist und die einzelnen Regler entkoppelt sind, was die Reglerstruktur vereinfacht.
- Strecke stromaufwärts des AQ: Um die eine Situation auslösenden Fahrzeugpulks dynamisch zu beeinflussen, sollte das Verhältnis zwischen Geschwindigkeit, Abstand der Querschnitte und zeitlicher Auflösung der Eingriffe in den Verkehrsablauf ausgewogen sein. Bei einer angenommenen maximalen mittleren Pulkgeschwindigkeit von 120 km/h sowie einer Situationsanalyse der SBA und damit einem möglichen Maßnahmenaufruf alle Δt Minuten sollte eine Strecke von $2\Delta t$ km stromaufwärts betrachtet werden (2 km werden pro Minute vom Fahrzeugpulk zurückgelegt). Daraus ergibt sich ein Orientierungswert von $\Delta x/\Delta t \leq 2$ zwischen der Aufruffrequenz und dem Abstand der AQ. Das bedeutet, dass der Abstand der MQ/AQ aus regelungstechnischer Sicht im Einklang zur Aufruffrequenz der SBA sein muss. Dies ist bei einer Aufruffrequenz von einer Minute mit den Abständen kleiner 2 km für eine Pulkgeschwindigkeit bis 120 km/h gegeben.

SCHWIETERING et al. (2017) betrachteten verschiedene Situationserkennungsverfahren zur Harmonisierung des Verkehrsablaufs mit auf unterschiedlichen Intervalllängen basierender Aggregation. Die untersuchten Verfahren unterscheiden sich in den Ein- bzw. Ausschaltkriterien, den Aggregationsintervallen sowie den gesetzten Parametern. Aus dieser Untersuchung wird der Einfluss von kürzeren Intervalllängen deutlich. Kürzere Intervalllängen reduzieren zwar die Latenz, bewirken aber bei den zumeist schwellenwertbasierten Verfahren eine erhöhte Anzahl an Schaltwechseln. In der Praxis ist daher ein geeignetes Gleichgewicht zwischen Erfassungsintervall, Aggregation und Glättung der Verkehrsdaten zu wählen.

STEINHOFF et al. (2002) untersuchten Verkehrsdaten einer SBA auf der A 3 im Bereich des Autobahnkreuzes Köln-Ost bezüglich der Akzeptanz der Geschwindigkeitsanzeigen mit einer räumlichen Betrachtung der Entwicklung der Befolgung. Es zeigt sich, dass die größte Befolgung der Maßnahme etwa 500 m hinter dem AQ erreicht wird. Im weiteren Verlauf nimmt die Befolgung der Maßnahme durch die Verkehrsteilnehmenden teils wieder stark ab. Es tritt also eine Art „Vergessenheitswirkung“ ein. In Abbildung 2-3 ist eine Strecke mit einer Grundgeschwindigkeit von 100 km/h dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass die stärkste Verringerung der vPkw bei einem Abstand von 500 Metern stromabwärts des AQ erreicht wird. Diese Geschwindigkeitsreduktion bei vPkw ist am größten, wenn gleichzeitig ein WVZ-B-Zeichen aktiviert ist (in Abbildung 2-3 steht "L" für Lkw-Überholverbot und "0" für die Schaltung ohne WVZ-B-Zeichen).

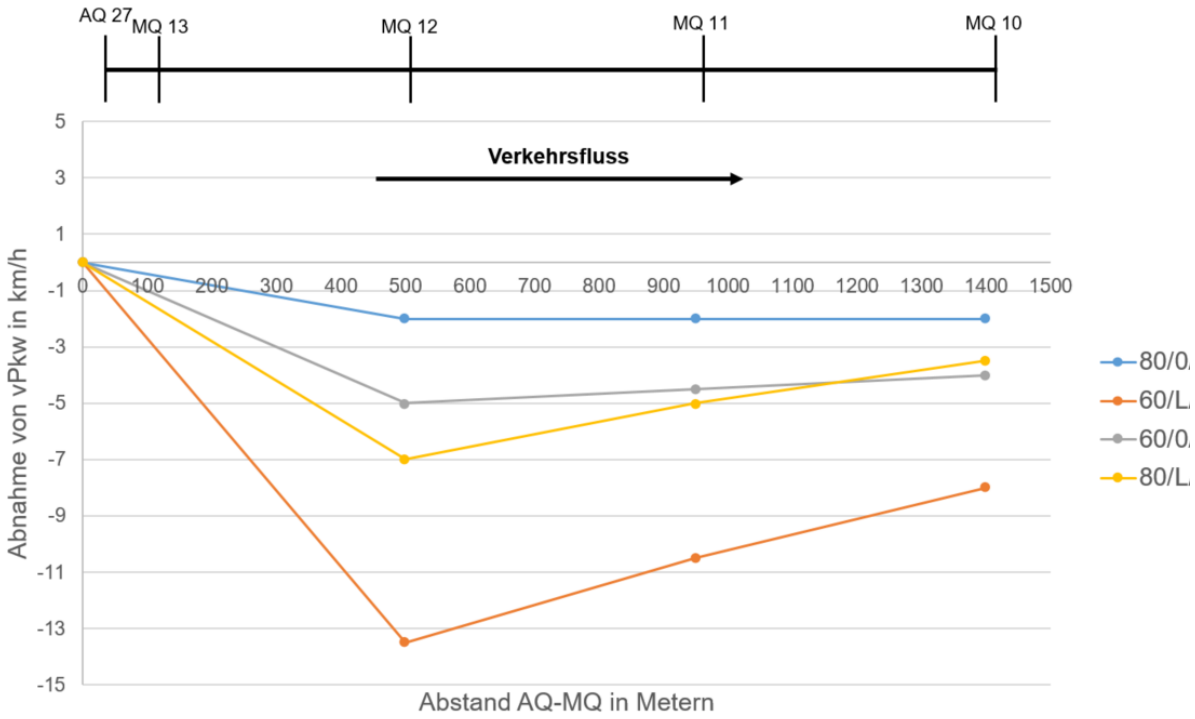


Abbildung 2-3: Räumliche Entwicklung der relativen Akzeptanz auf der SBA A 3 (STEINHOFF et al., 2002)

2.5 Räumlich-zeitliche Dynamik von Verkehrszuständen

Die Ausbreitung kleinerer Veränderungen des Verkehrszustands über Weg und Zeit wird als „Dichtewelle“ bezeichnet. Wenn sich der Verkehr staut, entstehen in der Regel „Schockwellen“, die sich entgegen der Fahrtrichtung ausbreiten (LIGHTHILL und WHITHAM, 1955; RICHARDS, 1956). Die Ausprägungen der Schockwellen führen zu verschiedenen Stauarten.

Für die Differenzierung von Verkehrszuständen im Stau sind verschiedene Ansätze vorgeschlagen worden. BOGENBERGER et al. (2020) haben z. B. folgende Stauarten definiert:

- Stauwelle: Eine Stauwelle liegt vor, wenn nur für eine kurze Zeit eine niedrige durchschnittliche Geschwindigkeit vorliegt. Sie ist ein einzelnes Ereignis, was sich dadurch zeigt, dass nach dem Ereignis für längere Zeit eine Staugrenzgeschwindigkeit (hier 40 km/h) nicht unterschritten wird. Stauwellen bewegen sich räumlich-zeitlich und dabei in der Regel entgegen der Fahrtrichtung.
- Stop-and-Go-Wave (SGW): Von „Stop-and-Go“ wird gesprochen, wenn mehrere stauwellenartige Ereignisse kurz aufeinander folgend auftreten. Die durchschnittliche Periode einer Stauwelle beträgt dabei zwischen 4 und 20 Minuten. Ein Fahrzeug durchfährt bei einer SGW im Regelfall mehrere Stauwellen, wodurch ein wiederholtes starkes Beschleunigen und Bremsen erfolgt.
- Breiter Stau: Bei einem breiten Stau sind die Stauwellen so verdichtet, dass räumlich-zeitlich ein breiter Bereich entsteht, in dem die Verkehrsteilnehmenden konstant nur niedrige Geschwindigkeiten fahren können. Die dadurch vorliegende höhere Anzahl an Stauwellen-Phasen unterscheidet den breiten Stau ebenfalls von SGW.

- Megastau: Sind für ein sehr großes Gebiet in einer Stausituation kaum noch einzelne Stauwellen zu erkennen und erstreckt sich diese Stausituation über eine längere Zeit (hier 30 Minuten), so handelt es sich um einen Megastau.

Die zeitliche und insbesondere die räumliche Ausbreitung von Stausituationen hat einen wesentlichen Einfluss auf die Detektion und Erkennung der Situation an den MQ sowie weitergehend auf die Auswahl und die Wirkung der entsprechenden Beeinflussungsmaßnahmen (vgl. RIEGELHUTH und GLATZ, 2015; LÖBBERING, 2018). Bei der zeitlichen Komponente zeigt sich dies beispielhaft bei einer einzelnen kurzen Stauwelle, die die Schaltung einer Stauwarnung auslöst, aber schon fast wieder zu Ende ist, wenn die entsprechende Anzeige geschaltet wird. Eine am Verkehr teilnehmende Person könnte somit eine Fehlschaltung interpretieren und das Vertrauen in die Maßnahmen der Verkehrsbeeinflussung verlieren.

Wie sich mit der Kontinuumstheorie (LIGHTHILL und WHITHAM, 1955; RICHARDS, 1956), aber auch mit neueren Modellansätzen (z. B. KERNER, 2017) zeigen lässt, bewegen sich Dichtewellen bei freiem Verkehr mit einer Geschwindigkeit knapp unterhalb der mittleren Geschwindigkeit der Fahrzeuge des Verkehrsstroms stromabwärts. Innerhalb dieser Dichtewellen fahren langsame Fahrzeuge und die Verkehrsstärke ist innerhalb dieser Dichtewellen hoch. Verkehrszusammenbrüche treten in der Regel in der Nähe von Engstellen wie z. B. an Ein- und Ausfahrten oder Fahrstreifenreduktionen auf. Diese Orte bezeichnete KERNER (2017) als „Empirisch permanente lokale Geschwindigkeitsstörung bei freiem Verkehrsfluss an Autobahn-Engstellen“. Die Geschwindigkeiten bei freiem Verkehr an diesen Orten werden reduziert, falls die beschriebenen Dichtewellen diese Orte erreichen. In diesem Fall spricht KERNER von „Nukleation“ (Bildung der Verkehrszusammenbrüche) oder „Metastabilität“ des Verkehrszustands bei freiem Verkehr, wodurch der Übergang von freiem Verkehr zu synchronisiertem Verkehr geschieht. KERNER unterstützte seine These zur Nukleation von Verkehrszusammenbrüchen (Übergang von freiem zu synchronisiertem Verkehr) in Engstellen mit entsprechenden empirischen Daten.

Laut TREIBER und KESTING (2010b) sind drei Bedingungen für einen Verkehrszusammenbruch entscheidend: Engstellen, hohes Verkehrsaufkommen oder Störungen im Verkehrsfluss. Im Rahmen einer ausführlichen empirischen Analyse für die Autobahnen A 5, A 8 und A 9 in Deutschland mit mehr als 400 Verkehrsstaus stellten TREIBER und KESTING fest, dass in fast allen Fällen diese drei Faktoren beteiligt waren, die nachfolgend erläutert werden:

- Engstellen sind Streckeninhomogenitäten und führen lokal zur Reduzierung der Kapazität. Die häufigsten Engstellen auf Autobahnen sind Ein- und Ausfahrten, Fahrstreifenänderungen im Bereich von Baustellen, Kurvenstrecken, Steigungs- und Gefällestrecken, unfallbedingte Behinderungen und Staus oder Unfälle auf der Gegenfahrbahn (TREIBER und KESTING, 2010a). Laut DAGANZO (1967) und MAY (1967) gibt es zwei Arten von Engstellen: Statische Engstellen wie eine Fahrstreifenreduktion oder ein Verflechtungsbereich sowie dynamische Engstellen wie eine Unfallstelle. Zudem gibt es auch einen sogenannten verdeckten Engpass. Er entsteht, wenn der Stau eines stromabwärts liegenden aktiven Engpasses zurückwandert und einen anderen Engpass stromaufwärts überstaut. Wenn der Verkehr an einer Engstelle zusammenbricht, wird die Engstelle aktiviert und die dynamische Kapazität der Strecke hängt nun vom sog. Capacity Drop ab. Der Capacity Drop bezeichnet die Differenz zwischen der Kapazität bei freiem und gestautem Verkehr (HALL und AGYEMANG-DUAH, 1991). Die Engstelle wird deaktiviert, wenn die Verkehrsstärke stromaufwärts der Engstelle reduziert wird und sich der Stau auflöst (BOGENBERGER et al., 2009; TREIBER und KESTING, 2010a).

- Hohes Verkehrsaufkommen: Eine zeitliche Bedingung für die Auslösung eines Staus ist das hohe Verkehrsaufkommen in bestimmten Zeiten. Während der Spitzenzeiten wie der Morgen- oder Abendspitze sowie ggf. während der Urlaubsmonate kann es zu hohem Verkehrsaufkommen kommen.
- Störungen im Verkehrsfluss: Beide zuvor genannten Bedingungen werden durch lokale Störungen im Verkehrsfluss verschärft, die vom Verhalten der Fahrenden abhängen und einen Verkehrszusammenbruch auslösen können. Dazu zählen beispielsweise abrupte Bremsmanöver aufgrund von Unachtsamkeit, hektische Fahrstreifenwechsel, mangelnder Sicherheitsabstand, unangepasste Geschwindigkeit oder überholende Lkw insbesondere bei hohem Verkehrsaufkommen. Solche Störungen können nicht einfach anhand von aggregierten Detektordaten erkannt werden. Aufgrund der stochastischen Natur bei der Entstehung von Störungen ist eine exakte Vorhersage eines Verkehrszusammenbruchs nicht möglich (TREIBER und KESTING, 2010a).

Im Rahmen des Projektes iRoute2 (KESSLER und BOGENBERGER, 2021) in Bayern an der Autobahn A 9 wurden verschiedene Sensoren zur Detektion unterschiedlicher Stautypen untersucht. Es wurden vier unterschiedliche Datenquellen entlang der A 9 zwischen München und Nürnberg untersucht:

- Überkopf-Sensoren mit durchschnittlichen Abständen zwischen 0,8 und 1,9 km auf einer Länge von ca. 155 km
- Seitenradar auf einer Länge von ca. 35 km
- FCD für die gesamte Strecke verfügbar in 1 min Intervallen und 100 m Genauigkeit
- BT-Detektoren mit einem durchschnittlichen Abstand von 4,6 km

Folgende vier verschiedene Fusionierungsverfahren wurden für diese Datenquellen angewendet:

- Section-Average (SEC-AVG): Durchschnittliche Geschwindigkeitswerte aller Datenquellen pro Streckensegment
- Adaptive-Smoothing-Method (ASM): Kombination von zwei Glättungskernen, einen in stromabwärtiger Richtung, der Geschwindigkeitswerte in Fahrtrichtung mit der parametrierbaren Freiflussgeschwindigkeit propagiert, und einen in stromaufwärtiger Richtung, der Geschwindigkeitswerte gegen die Fahrtrichtung (in Richtung der Stauausbreitung) propagiert.
- Phase-Based-Method (PSM): Propagation der Geschwindigkeiten anhand der 3-Phasen-Theorie von KERNER, (2017) mit der die Phasen freier Verkehr, synchronisierter Verkehr und breiter, sich bewegender Stau identifiziert werden.
- Phase-Based-Method mit Gewichtungsfaktoren (PSM-W): PSM unter Berücksichtigung von Gewichten der Bluetooth-Reisezeiten

Es wurde zwischen Verkehrsinformation (basierend auf Reisezeit) und Verkehrssteuerung (basierend auf Geschwindigkeiten) unterschieden und festgestellt, dass die beste Rekonstruktion der Verkehrslage in beiden Fällen durch die Fusion der Überkopf-Sensoren und FCD erzielt werden kann. Basierend auf diesen Daten wurden Ausstattungsempfehlungen sowohl für die Verkehrsinformation (Abbildung 2-4) als auch für die Verkehrssteuerung (Abbildung 2-5) gegeben. Es zeigt sich, dass zur Erkennung des Stop&Go-Verkehrszustands, der häufiger als andere Stautypen auftritt, eine Überkopf-Sensoren-Länge von 2 km ausreichen würde. Für

andere Stautypen sind Abstände von 3-5 km ausreichend (KESSLER und BOGENBERGER, 2021).

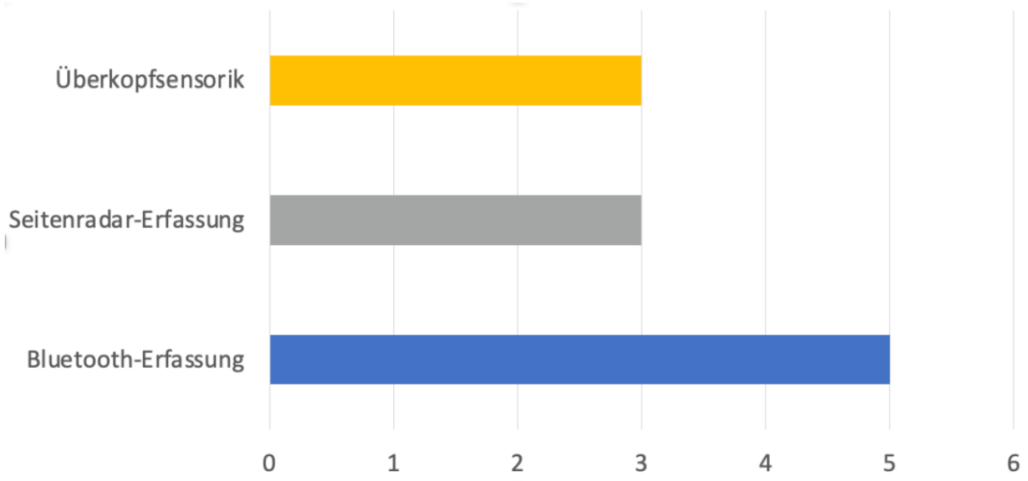


Abbildung 2-4 Ausstattungsempfehlung für Verkehrsinformation je Detektorabstand (km), Quelle: KESSLER und BOGENBERGER, 2021

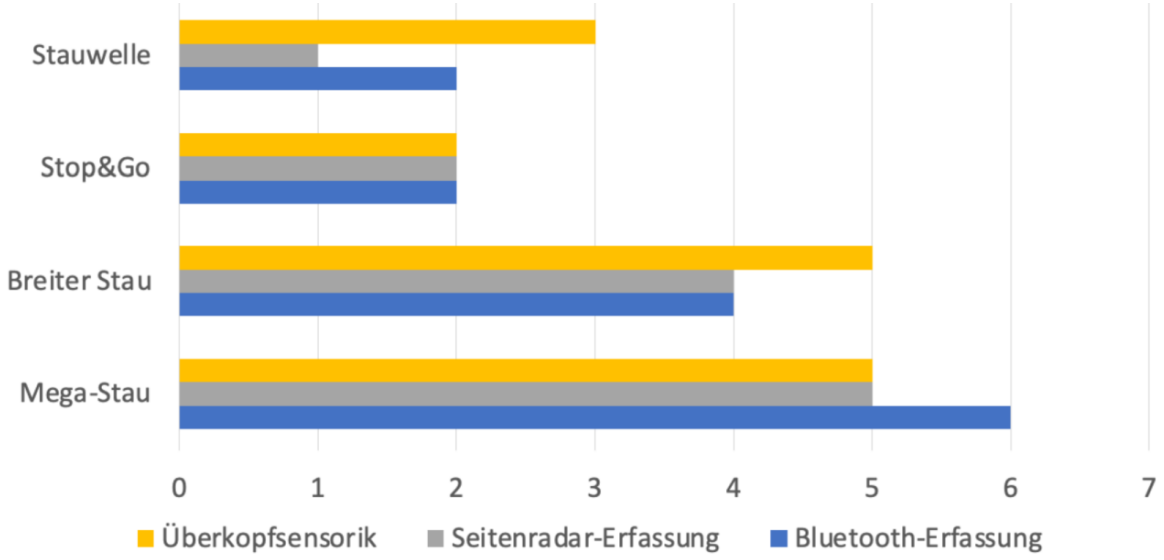


Abbildung 2-5 Ausstattungsempfehlung für Verkehrssteuerung je Detektorabstand (km), Quelle: KESSLER und BOGENBERGER, 2021

2.6 Wirtschaftlichkeit von SBA

Die Bundeshaushaltsordnung (BHO) gibt für den Bund betreffende finanzwirksame Maßnahmen die Grundsätze der Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit vor (§ 7 BHO). Diese sehen eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Risikozuordnungen vor. Als zwei wesentliche Prinzipien der Wirtschaftlichkeit beschreibt das Bundesministerium der Finanzen in der „Arbeitsanleitung Einführung in Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen“ (BMF, 2011) das Sparsamkeitsprinzip (Minimalprinzip) und das Ergiebigkeitsprinzip (Maximalprinzip). Beim Sparsamkeitsprinzip soll mit möglichst geringem Mitteleinsatz ein bestimmtes Ergebnis erreicht werden. Das Ergiebigkeitsprinzip hat das bestmögliche Ergebnis bei einem bestimmten Mitteleinsatz zum Ziel.

Die Arbeitsanleitung des BMF (2011) sieht als ersten Schritt einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bzw. -untersuchung die Definition von Zielen vor, welche unabhängig von der wirtschaftlichen Betrachtung sind. Anschließend können die definierten Ziele mittels einzel- oder gesamtwirtschaftlicher Verfahren hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit untersucht werden. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung von Investitionsmaßnahmen z. B. im Bereich der Verkehrsbeeinflussung sind gesamtwirtschaftliche Betrachtungsverfahren wie eine Kosten-Nutzen-Analyse (bei monetärer Bewertung) oder eine Nutzwertanalyse im Rahmen der Kosten-Nutzen-Analyse (bei nicht-monetärer Bewertung) vorgesehen.

In der Verkehrsplanung und bei der Umsetzung verkehrspolitischer Ziele kommt dem Einsatz von intelligenten Verkehrssystemen (IVS) eine immer größer werdende Bedeutung zu. In klassischen, aber auch in funktionalen Ausschreibungen ist die Ermittlung der Wirkungen von IVS ein wesentlicher Bestandteil, um die Zweckmäßigkeit der jeweiligen Anlage bewerten zu können. Anhand von Wirtschaftlichkeitsberechnungen wird ermittelt, ob der Verkehrsablauf durch eine IVS-Anwendung effizienter abgewickelt werden kann und in welchem Verhältnis der Nutzen zu den Kosten des zur Anwendung kommenden Systems steht.

Die RWVA (1997) sehen bei Einrichtung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen bezüglich der Wirtschaftlichkeit vor, dass nur die Bereiche berücksichtigt werden sollen, bei denen qualitativ und quantitativ ausreichende Wirkungen und ein vertretbares Nutzen/Kosten-Verhältnis zu erwarten sind. Bei SBA ohne Richtungswechselbetrieb ist die wesentliche Nutzenkomponente die Veränderung der Verkehrssicherheit, die sich aus einer Abschätzung der vermeidbaren Unfälle während der Beeinflussungszeiten ergibt. Hierzu werden Daten über das Unfallgeschehen, die Stauhäufigkeit und ergänzend die Reisezeit benötigt.

Bisherige Wirtschaftlichkeitsberechnungen für IVS-Anwendungen orientieren sich an existierenden Verfahren im Bereich des Infrastrukturausbaus, z. B. den „Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen (EWS)“ (FGSV, 1997) oder den Methoden für die Aufstellung des Bundesverkehrswegeplans (BVWP). Daneben kommen aber auch individuelle Lösungsansätze zum Einsatz. Die unterschiedlichen Ansätze haben zur Folge, dass die Berechnungsergebnisse nur bedingt vergleichbar sind. Darüber hinaus werden zukünftig bei weiteren IVS-Anwendungen wie bspw. kooperativen Systemen zusätzliche Fragen zu beantworten sein, welche durch die existierenden Verfahren nicht oder nur unzureichend abgedeckt sind. Zur Nutzenermittlung von kollektiven Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA), zu denen auch SBA gehören, werden in der Praxis meist die in den zuvor bereits erwähnten Untersuchungen zur Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen (FGSV, 2007; BUSCH et al., 2009) vorgestellten Methoden angewandt. Kostenansätze für verkehrstelematische Anlagen finden sich in der „Anweisung zur Kostenermittlung und zur Veranschlagung von Straßenbaumaßnahmen (AKVS)“ (BMVI, 2014). In den FGSV-Hinweisen zum Qualitätsmanagement in der Verkehrsbeeinflussung (FGSV, 2019b) wurden ebenfalls Vorschläge zur Ermittlung der Jahreskosten von VBA-Komponenten veröffentlicht. Im „Muster-AKS-Tool zur Abschätzung von Kosten und Wirtschaftlichkeit von VBA gemäß den „Anweisungen zur Kostenberechnung für Straßenbauvorhaben (AKS)“ (BMVI, 2010) wird die Vorgehensweise zur Ermittlung der Kosten (Gesamt- und Jahreskosten) von VBA nach Vorgaben des BMVI beschrieben.

Eine zusammenfassende Darstellung zur Wirtschaftlichkeitsberechnung der unterschiedlichen Arten von IVS fehlt in Deutschland bislang. Im FGSV-Arbeitskreis 1.4.5 „Wirtschaftliche Bewertung von IVS“ wird derzeit ein Wissensdokument erarbeitet, welches einerseits die Vielfalt der Verfahren übersichtlich darstellen und andererseits auch die Forschungsergebnisse bezüglich der Verfahrensunsicherheiten und -lücken dokumentieren sowie Empfehlungen zum Einsatz der Verfahrensansätze liefern soll.

BALMBERGER et al. (2014) erhoben Kosten für den Bau und Betrieb von neun SBA aus sechs verschiedenen Bundesländern, davon sechs SBA ohne und drei SBA mit temporärer Seitenstreifenfreigabe. Während einige Kostenpositionen kilometerabhängig ermittelt wurden, sind andere Kostenpositionen von der in der SBA verbauten Stückzahl abhängig. Mit einem Preis von 40.000–140.000 € (Angaben für Anlagen mit einem Baujahr von mitunter vor dem Jahr 2000) waren die AQ die teuersten Stückkomponenten einer SBA. Die Kosten für die AQ machten mit einem Anteil von ca. 45 % den größten Anteil an den Gesamtinvestitionskosten der SBA aus. Gleichzeitig hielten die AQ-Kosten mit 26 % den zweitgrößten Anteil an den gesamten Lebenszykluskosten der SBA. BALMBERGER et al. stellten vernachlässigbare negative Nutzen durch Verkehrsstörungen während der Bauzeit der Anlagen fest. Die Erwartungsdauer für die Betriebsphase einer SBA liegt BALMBERGER et al. zufolge bei 18 Jahren.

2.7 Zwischenfazit

Die Darstellung des aktuellen Stands der Grundlagen aus Wissenschaft und Praxis zeigt den Forschungsbedarf hinsichtlich der Untersuchung der Abstände zwischen MQ/AQ auf. Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse aus Kapitel 2 zusammengefasst und die Ziele bzw. die zu untersuchenden Themen beschrieben.

- Die Regelwerke definieren bestimmte Regelabstände zwischen MQ/AQ. Laut den RWVA (1997) sollen die AQ-Abstände im Regelfall zwischen 1,5 und 2,5 km liegen. Die RWVA (1997) definieren ebenfalls Sonderfälle, die kürzere AQ-Abstände von 800 m bis 1,5 km in Ballungsräumen oder auf Autobahnen mit temporärer Seitenstreifenfreigabe ermöglichen. Die Abstände zwischen MQ sollten laut den RWVA (1997) im Bereich von 1,5 bis 3 km liegen. Andere europäische Länder haben unterschiedliche Regelabstände für MQ/AQ von 500 m bis zu fast 4 km vorgesehen, die abhängig von der Streckencharakteristik festgelegt werden.
- Lokale MQ-Daten werden zeitlich aggregiert (üblich sind 1 min und 15 s Intervalle) und aufbereitet. Diese MQ-Daten können aber nur punktuell die Verkehrszustände darstellen. Durch Fusionierung mehrerer Datenquellen oder Anwendung eines geeigneten Verkehrsmodells ist es möglich, ein räumlich-zeitlich umfassendes Bild über das Verkehrsgeschehen zu generieren.
- Es wird zwischen Wirkung und Wirksamkeit unterschieden. Die Wirkung bestimmter Maßnahmen kann durch Kenngrößen beschrieben werden (Wirkungskenngrößen). Die Wirkung einer Maßnahme kann negative oder positive Effekte haben. Die Wirksamkeit hingegen bewertet die Erfüllung erwünschter Effekte (Wirkziele) einer Maßnahme und kann beispielsweise die Erhöhung der Verkehrssicherheit oder die Verbesserung des Verkehrsflusses sein. Die Wirksamkeit wird durch die positiven Wirkungskenngrößen quantifizierbar und kann so die Wirkziele bewerten. Bei der Evaluierung der Wirkziele der unterschiedlichen MQ/AQ-Abstandsszenarien sollen die Einflussfaktoren möglichst konstant bleiben.
- Die verkehrliche Wirksamkeit wird nur erreicht, wenn eine ausreichende Akzeptanz bzw. Befolgung der Verkehrsteilnehmenden gegeben ist. Die Akzeptanz ist nicht messbar und wird beispielsweise durch Befragungen erhoben. Es fehlt aktuell ein einheitliches Bewertungssystem zur Beurteilung der Akzeptanz. Die Befolgung kann hingegen anhand der gefahrenen Geschwindigkeit gemessen und evaluiert werden. Es ist an dieser Stelle wichtig zu erwähnen, dass eine erhöhte Befolgung der verkehrlichen Maßnahmen nicht unbedingt die Erhöhung der Wirksamkeit der Maßnahme zur Folge hat.

Die Form der Darstellung der Maßnahmen durch unterschiedliche Schaltbilder (nur Geschwindigkeitsanzeigen oder eine Kombination mit Zusatzinformationen) kann die Akzeptanz und damit die Befolgung beeinflussen.

- Randbedingungen, wie die Verkehrszusammensetzung oder die Anlagenkonfiguration, beeinflussen die Wirkung der Maßnahmen. Untersuchungen an einer hessischen Autobahn haben gezeigt, dass der überwiegende Anteil der aufgetretenen Störungen eine Ausdehnung unter 2 km besitzen, was bei großen MQ-Abständen dazu führen kann, dass solche Störungen nicht zuverlässig erkannt werden können. Eine weitere modellbasierte Studie zeigt auf, dass die Abstände von MQ und AQ sowie die Abtastrate (Erfassungsintervalldauer) aus regelungstechnischer Sicht sinnvoll aufeinander abgestimmt sein sollten.

3 Untersuchungskonzept

3.1 Einführung

In diesem Kapitel werden die projektrelevanten Themen mithilfe von Forschungsthemen (s. Kapitel 3.2) eingeführt sowie das Untersuchungs- und Messkonzept zur Evaluierung dieser Forschungsthemen beschrieben (s. Kapitel 3.4). Die Forschungsthemen werden grundsätzlich erst einmal einzeln und bei möglichen Überschneidungen und Zusammen- bzw. Wechselwirkungen gemeinsam betrachtet. Das Untersuchungskonzept umfasst zudem eine Bestandsaufnahme von SBA in Deutschland basierend auf verfügbaren Datenbeständen (s. Kapitel 3.3) sowie darauf aufbauend eine Auswahl der Erhebungsstrecken (s. Kapitel 3.5), ausgelegt auf die Bearbeitung der Forschungsfragen.

Als Einführung in die vorliegende Problemstellung wird nachfolgend eine beispielhafte Situation beschrieben sowie schematisch in Abbildung 3-1 dargestellt. Zu sehen ist eine Trajektorie des Fahrzeugs einer vorausschauend fahrenden Person innerhalb einer SBA. Die Person nähert sich (aus einem bereits beeinflussten Streckenabschnitt) einem AQ, der die Geschwindigkeitsbeschränkung 80 km/h anzeigt. Bei Erkennen des Schaltbilds reagiert die Person darauf (Wahrnehmungsdistanz d_{w1} stromaufwärts des AQ1) und reduziert die Geschwindigkeit des Fahrzeugs bis zum Erreichen der selbstgewählten Zielgeschwindigkeit (v_{HARMO1}) für die Schaltung unter Berücksichtigung des selbst wahrgenommenen Verkehrszustands. Das Geschwindigkeitsverhalten ist zudem von anderen Verkehrsteilnehmenden abhängig. Die Geschwindigkeitsdifferenz $v_{B,diff1}$ ist demnach die Abweichung der Zielgeschwindigkeit der fahrenden Person zur zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Im weiteren Fahrtverlauf wird sich ggf. der (wahrgenommene) Verkehrszustand ändern, z. B. wenn das Fahrzeug der fahrenden Person aus dem verdichteten Fahrzeugpulk herausfährt, oder die fahrende Person wird durch sie umgebende Fahrzeuge so beeinflusst, dass sich die Zielgeschwindigkeit verändert. Somit könnte sich eine neue Zielgeschwindigkeit (v_{HARMO2}) ergeben, die um die Differenz $v_{B,diff2}$ von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit abweicht. Bei Wahrnehmung des Schaltzustands des nächsten stromabwärts gelegenen AQ (AQ2, hier mit Anzeige 100 km/h) wird die fahrende Person wiederum das Fahrverhalten analog zu dem zuvor beschriebenen Vorgehen anpassen.

Sofern sich bei der Analyse der Messdaten herausstellt, dass solch eine nachweisbare Anpassung des Fahrverhaltens zwischen zwei AQ existiert, kann dies ein möglicher Hinweis dafür sein, dass eine Verdichtung der Detektion (falls die vorherrschenden Verkehrszustände durch die lokale Verkehrsdatenerfassung zeitlich-räumlich nicht ausreichend genau erfasst werden können, um die Verkehrsteilnehmenden zielgerichtet zur Entschärfung der vorherrschenden Situation zu beeinflussen) und/oder der Anzeigen (zur räumlichen Anpassung der Schaltung an die vorherrschende Situation) aus verkehrlicher Sicht sinnvoll ist. In diesem Fall ist zu prüfen, ob der Nutzen dadurch erhöht werden kann.

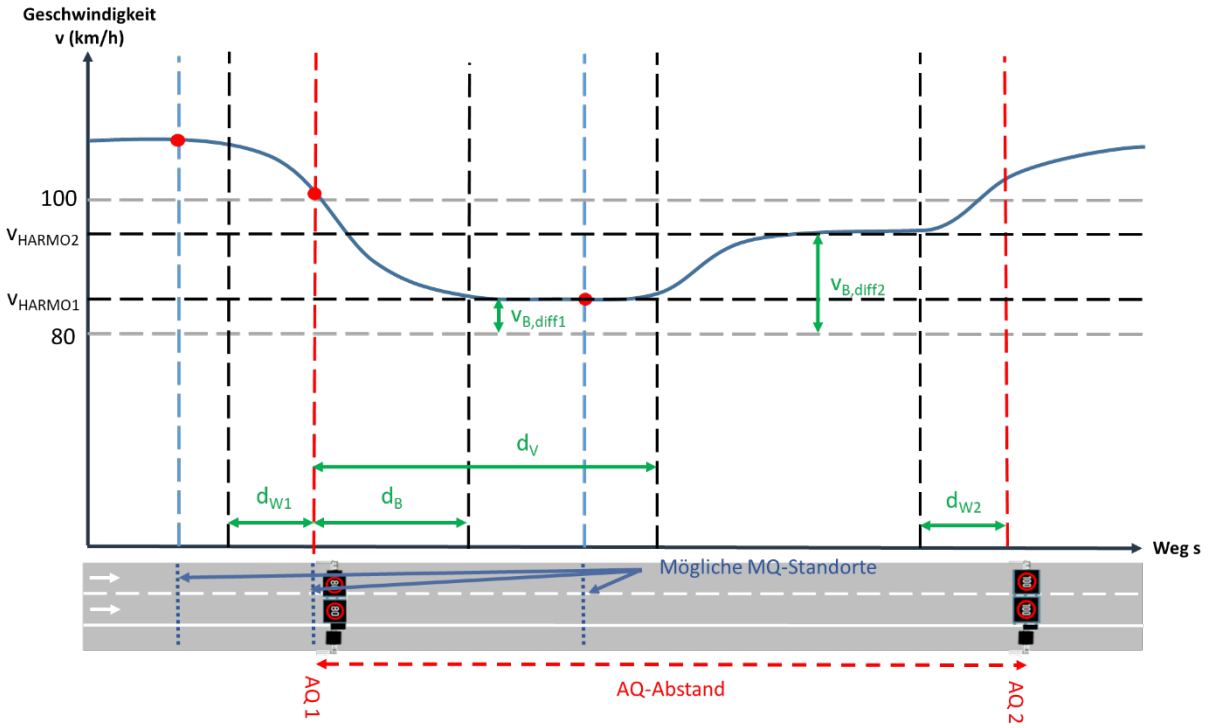


Abbildung 3-1: Trajektorienanalyse zur Untersuchung der Wirkungen sowie der Befolgung in Abhängigkeit vom AQ-Abstand

3.2 Forschungsthemen

Gegenstand des Forschungsprojekts sind verschiedene Forschungsthemen, die sich in die folgenden Bereiche gliedern lassen:

- AQ-Abstände
- MQ-Abstände
- Zuordnung von MQ zu AQ
- Berücksichtigung der Dynamik der Verkehrszustände
- Dependenzen von Steuerungsintervallen und MQ-AQ-Abständen

Die jeweiligen Forschungsthemen werden nachfolgend definiert und erläutert. Darauf aufbauend werden entsprechende Untersuchungsansätze formuliert.

3.2.1 AQ-Abstände

Ein wesentlicher Untersuchungsgegenstand ist der mögliche Einfluss der Abstände zwischen aufeinanderfolgenden AQ einer SBA auf die Befolgung der WVZ-Anzeigen durch die Verkehrsteilnehmenden sowie die Wirksamkeit der Verkehrssteuerungsmaßnahmen. Folgende Fragestellungen sind hierbei relevant:

- Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem AQ-Abstand und der Geschwindigkeitswahl und der Befolgung von angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkungen? Inwieweit unterscheidet sich dieser Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Steuerungsprogrammen (Stauwarnung, Harmonisierung etc.)?
- Welche verkehrsrechtlichen, verkehrlichen und topographischen Rahmenbedingungen sind bei der Auswahl der AQ-Standorte zu berücksichtigen?

Anhand von Verkehrsdaten ausgewählter SBA-Strecken werden empirisch erhobene verkehrstechnische Parameter für unterschiedliche AQ-Abstände gegenübergestellt und bewertet. Unter Berücksichtigung der Schaltdaten der SBA werden die verkehrstechnischen Parameter – insbesondere die Verteilungen der Geschwindigkeitsprofile der Einzelfahrzeuge – in Anhängigkeit vom Abstand der Verkehrsteilnehmenden zum zuletzt passierten AQ analysiert und eingeordnet.

3.2.2 MQ-Abstände

Während die AQ-Abstände die Übermittlung der WVZ-Anzeigen an die Verkehrsteilnehmenden betreffen, bestimmen die Abstände zwischen aufeinanderfolgenden MQ die Erkennung der jeweiligen Verkehrssituationen. Dazu werden folgende Fragestellungen untersucht:

- Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem MQ-Abstand und den Latenzzeiten bei der Erfassung der Verkehrszustände bzw. -situationen?
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen der orts- und zeitpräzisen Erfassung der Verkehrszustände bzw. -situationen in Abhängigkeit vom MQ-Abstand?

Aufgrund der meist identischen Lage der MQ zu den AQ innerhalb der empirisch untersuchten Strecken besteht ein enger Zusammenhang zwischen den Forschungsthemen zu den MQ- und AQ-Abständen. Die Auswirkungen der MQ-Abstände werden im Rahmen der Wirkfeldanalyse von Stauwarnungen auch unabhängig von den AQ-Abständen untersucht.

3.2.3 Abstand von MQ zu AQ

Hinsichtlich des Abstandes eines MQ zu dem für eine bestimmte Verkehrssituation in der Steuerung zugeordneten AQ (stromaufwärts, gleiche Lage, stromabwärts) werden die folgenden Fragestellungen behandelt:

- Wie müssen MQ und AQ zueinander angeordnet sein (stromaufwärts/ stromabwärts/ am selben Ort), damit die SBA die größte Wirkung erreicht?
- Wie wirken sich unterschiedliche Schaltprogramme auf die optimale Zuordnung aus?

Bedingt durch die fehlenden Unterschiede in der Zuordnung von MQ zu AQ innerhalb der empirisch untersuchten Strecken werden diese Fragestellungen im Rahmen der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation untersucht.

3.2.4 Berücksichtigung der Dynamik der Verkehrszustände

Im Fokus der Untersuchung stehen die zwei am häufigsten verwendeten Schaltprogramme in SBA-Steuerungsverfahren: die Harmonisierungsschaltung und die Stauwarnung oder Stautrichterung. Dabei werden folgende Fragestellungen bearbeitet:

- Wie wirken sich die verschiedenen Verkehrszustände und die durch die unterschiedlichen Schaltprogramme ausgelösten Schaltbilder auf das Fahr- und Befolgungsverhalten der Verkehrsteilnehmenden aus?
- Welche Möglichkeiten existieren, um die Wirksamkeit der Schaltprogramme individuell über das Geschwindigkeitsverhalten und/oder die Befolgung hinaus zu bewerten?

Die beiden Schaltprogramme werden über die gesamten Forschungsfragen hinweg differenziert betrachtet, um empirische und theoretische Unterschiede in den Ergebnissen auf das

Schaltprogramm zurückführen zu können. Im Rahmen einer Wirkfeldanalyse wird ein Modell entwickelt, mit dem die Wirksamkeit von Stautrichterungen über die Befolgung der Geschwindigkeitsbeschränkung hinaus verkehrstheoretisch bewertet werden kann.

3.2.5 Dependenzen von Steuerungsintervallen und MQ-AQ-Abständen

Zu den möglichen Abhängigkeiten der Verkehrssteuerung von den verwendeten Steuerungsintervallen werden folgende Fragestellungen analysiert:

- Sind bestehende Steuerungsalgorithmen nach dem MARZ (2018) auch bei kürzeren Steuerungsintervallen anwendbar?
- In welcher Ausprägung können kürzere Steuerungsintervalle die Detektion von und die Warnung vor Stauereignissen beschleunigen?

Im Rahmen der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation werden dazu unterschiedliche Steuerungsintervalle (z. B. 15 s, 30 s, 1 min) unter Anwendung von Basis-Steuerungsalgorithmen aus dem MARZ (2018) untersucht. In einem Modellentwurf zur Wirkfeldanalyse von Stauwarnungen wird geprüft, wie Verkehrsteilnehmende durch eine verkürzte Mess- und Verarbeitungszeit von SBA-Daten effektiver vor einem Stauereignis gewarnt werden können.

3.3 Bestandsaufnahme von SBA in Deutschland

Als Grundlage für die Erarbeitung des Messkonzepts und die Auswahl der Untersuchungsstrecken wird ein Überblick über die bestehenden SBA an Bundesautobahnen in Deutschland gegeben. Als Quellen für die Bestandsaufnahme dienten das Bundesinformationssystem Straße (BISStra 2022) der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) sowie die Informationen der Autobahn GmbH des Bundes (Verkehrszentrale Deutschland sowie regionale Niederlassungen). Für das BISStra werden der Bestand an Bundesfernstraßen, Brücken und Tunneln mit seinen wesentlichen Kenngrößen erfasst sowie Zählstellendaten der Bundesfernstraßen gespeichert. Es ist ein geographisches Informationssystem, in dem die Bestandsdaten visualisiert und auch abgerufen werden können. Der hier beschriebenen Bestandsaufnahme von SBA in Deutschland liegt ein Auszug aus dem BISStra zugrunde, der einen aktuellen Stand aller SBA-Abschnitte bundesweit (i. d. R. Abschnitte zwischen zwei aufeinanderfolgenden Anschlussstellen) mit folgenden Informationen bietet:

- Lage und Ausdehnung (Bundesland, BAB, von Anschlussstelle, bis Anschlussstelle, Länge der SBA, Betriebskilometer des Abschnittsbeginns),
- Bezeichnung und Art der Anlage (VBA-Kennung, VBA-Typ, Anlagenbezeichnung, Anlagenkennung, Verkehrsfreigabe der Anlage,
- Betriebsformen (Betriebsrichtung bezogen auf die Stationierungsrichtung, Besonderheiten wie getrennt verlaufende Fahrbahnen),
- Zuständigkeiten (zuständige Niederlassung der Autobahn GmbH, Unter- und Verkehrszentrale),
- Informationen zu den Anzeigequerschnitten (Anzahl AQ, mittlerer AQ-Abstand),
- Informationen zu den MQ (Anzahl der Verkehrsdatenerfassungen je Detektionsart, Anzahl der Umfelddatenerfassungen je UFD-Kenngröße),
- Anzahl der Streckenstationen (SSt),
- sonstige (interne) Kennungen (Sektoren, Stationen, Nullpunkte, …).

Der zugrundeliegende BISStra-Auszug stellt den Stand von März 2022 dar und wird von der Bundesanstalt für Straßenwesen stetig weitergeführt und aktualisiert. Nachfolgend wird ein Überblick über den Bestand von SBA in Deutschland anhand des vorliegenden BISStra-Auszugs gegeben. Der Auszug enthält 887 SBA-Abschnitte von 170 SBA (gemessen an den Anlagenbezeichnungen, insgesamt 190 VBA-Kennungen) aller 10 Niederlassungen der Autobahn GmbH des Bundes. Für jeden der SBA-Abschnitte, die mehrere AQ und MQ umfassen können, liegen die oben genannten Informationen (teilweise unvollständig) vor. Von „SBA“ wird an dieser Stelle mit Bezug zur Bezeichnung im BISStra-Auszug gesprochen. Ggf. können SBA mit unterschiedlichen Anlagenbezeichnungen und VBA-Kennungen in der Realität als eine SBA betrieben werden.

Abbildung 3-2 zeigt eine Verteilung der Verhältnisse der Anzahl der MQ und AQ innerhalb einer SBA. Entsprechend der Differenz der Häufigkeitssummen gibt es bei ca. 40 % der 170 SBA ähnlich viele MQ wie AQ (Verhältnis MQ/AQ zwischen 0,75 und 1,25). Etwa 16 % der 170 SBA weisen mehr als doppelt so viele MQ wie AQ auf. Lediglich 4 % der 170 SBA verfügen über eine deutlich geringere Anzahl an MQ als AQ, die jedoch stets über der Hälfte der Anzahl der entsprechenden AQ liegt.

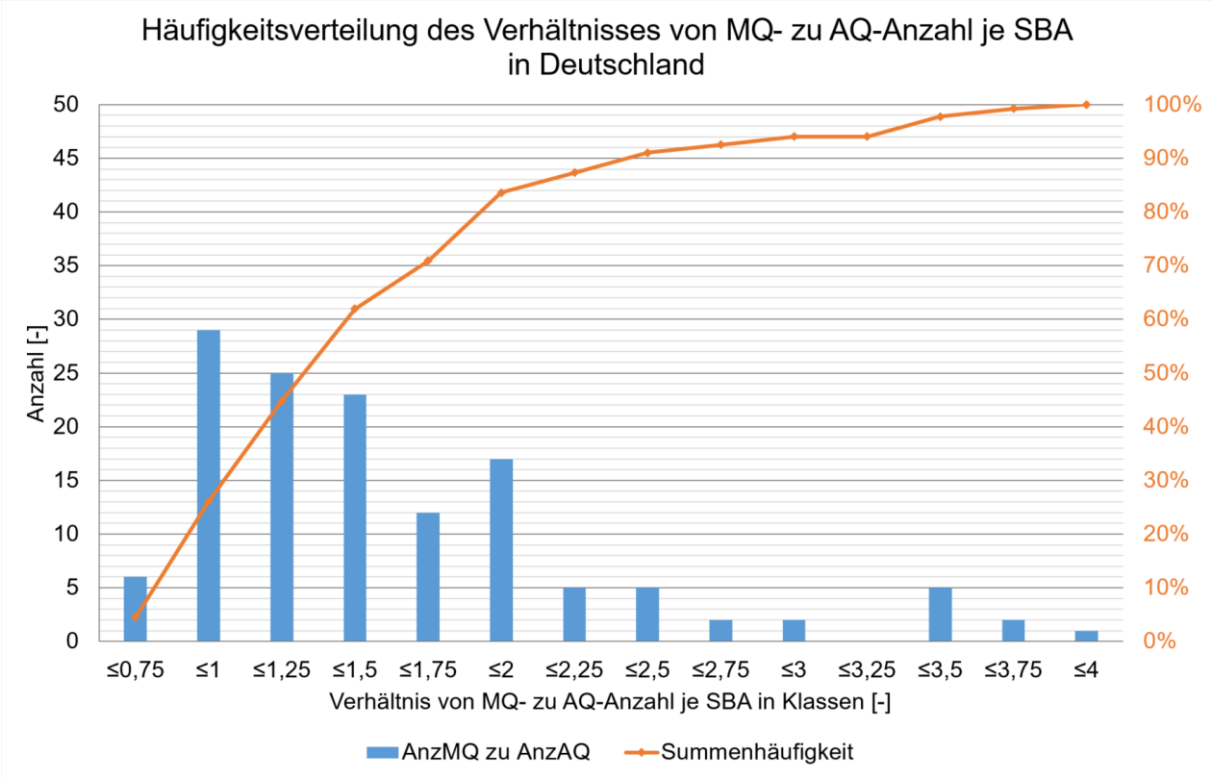


Abbildung 3-2: Häufigkeitsverteilung und prozentualen Summenhäufigkeit des Verhältnisses von MQ- zu AQ-Anzahl je SBA in Deutschland nach BISStra (Stand März 2022)

Bei den AQ- und MQ-Abständen ist zu beachten, dass es sich hierbei um mittlere Abstände innerhalb der 887 Abschnitte handelt, also keine Aussagen über die tatsächlichen AQ- und MQ-Abstände getroffen werden können. Fehlende Werte bei den mittleren AQ-Abständen wurden nachträglich über die Abschnittslänge und die AQ-Anzahl berechnet. Der mittlere MQ-Abstand wurde ebenfalls nachträglich mithilfe der Anzahl der Verkehrsdatenerfassungen berechnet. Im Mittel sind die AQ in Deutschland etwa 1.450 m und die MQ 1.100 m voneinander entfernt (BISStra 2022), was in etwa der unteren Grenze des Regelabstands nach den RWVA

(1997) entspricht. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass in dieser Statistik auch alle Anlagen berücksichtigt werden, die aufgrund bestimmter Randbedingungen wie z. B. einer höheren Anschlussstellendichte oder starker Kurvigkeit die Regelabstände unterschreiten.

Aus der vorliegenden Liste der SBA-Abschnitte wurden geeignete Untersuchungsstrecken sowohl für die Analyse der FCD als auch für die Analyse der Drohnendaten ausgewählt (s. Kapitel 3.5). Die Auswahl erfolgte in Absprache und mit Informationen der die Anlagen betreibenden Verkehrszentralen sowie mit den Kenntnissen der Forschungsnehmer und des Betreuerkreises über die Anlagen und Strecken.

Abbildung 3-3 zeigt eine Gegenüberstellung des AQ-Abstands und des mittleren DTV je Fahrstreifen für 812 AQ-Abschnitte in Deutschland. Die Abstände wurden durch die Lokalisierung von AQ-Standorten mithilfe von Luftbildaufnahmen ermittelt. Der verwendete mittlere DTV entspricht der Angabe aus der Straßenverkehrszählung 2021 (SVZ 21) der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST 2023) und wurde für die Darstellung gleichmäßig auf alle Fahrstreifen des entsprechenden Richtungsquerschnittes verteilt. Der Darstellung ist zu entnehmen, dass bislang nur ein geringfügiger Zusammenhang (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0{,}255$) zwischen der Verkehrsbelastung eines Streckenabschnittes mit SBA und dem vorliegenden AQ-Abstand existiert.

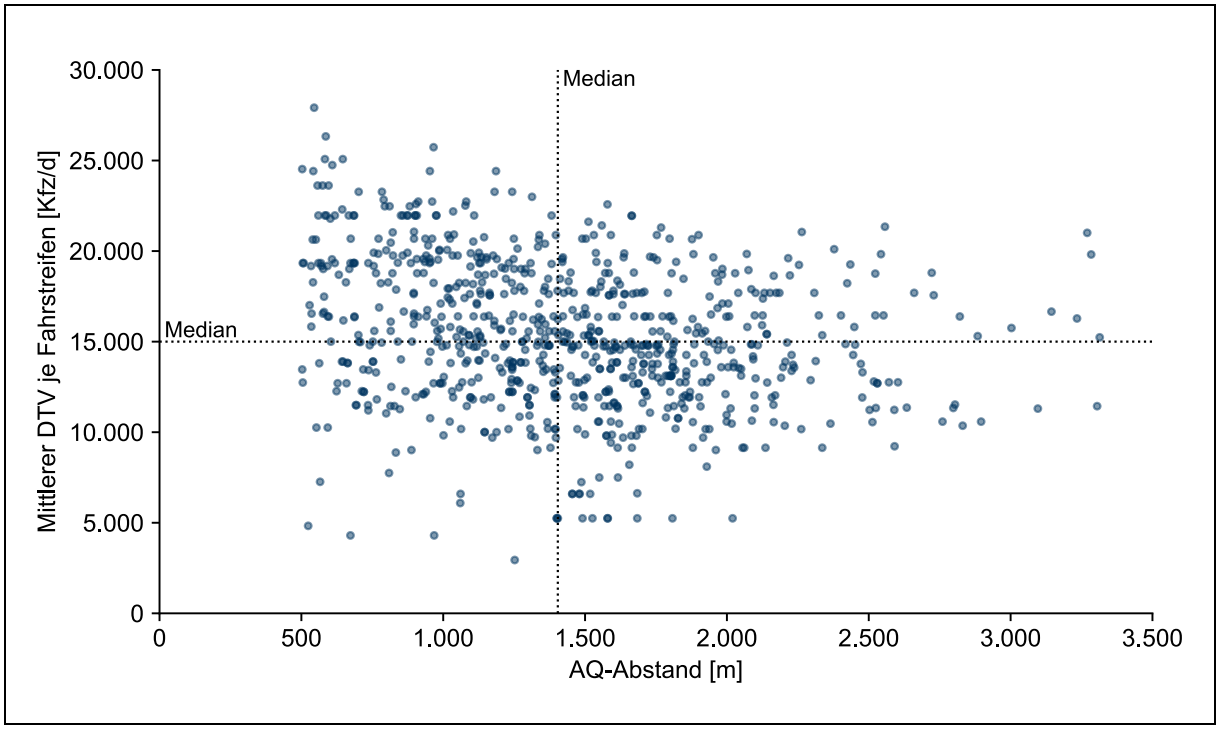


Abbildung 3-3: Gegenüberstellung des AQ-Abstands und des mittleren DTV je Fahrstreifen für 812 AQ-Abschnitte in den Bundesländern BW, RP, SL, HE, NW, NI, HH, HB, SH und BE.

3.4 Messkonzept

3.4.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Die Grundlage für die Untersuchung der Forschungsthemen bildet eine umfangreiche Datenbasis aus infrastruktur- und fahrzeugseitig sowie drohnenbasiert erhobenen Daten. Die mit Drohnen erhobenen Luftbilddaten sowie die FCD von Teilkollektiven des Verkehrs bieten die

Möglichkeit, die räumlich-zeitliche Dynamik von Verkehrszuständen und -situationen kontinuierlich betrachten zu können. Der gezielte Einsatz und die Kombination der verschiedenen Datenquellen werden in einem Messkonzept vorbereitet. Das Messkonzept umfasst die Erhebung sowohl makroskopischer als auch mikroskopischer Verkehrsdaten. Eine Übersicht der Verfügbarkeit und der Nutzung der verschiedenen Datenquellen für die einzelnen Forschungsthemen ist in Abbildung 3-4 schematisch dargestellt und wird in den folgenden Unterkapiteln weitergehend beschrieben.

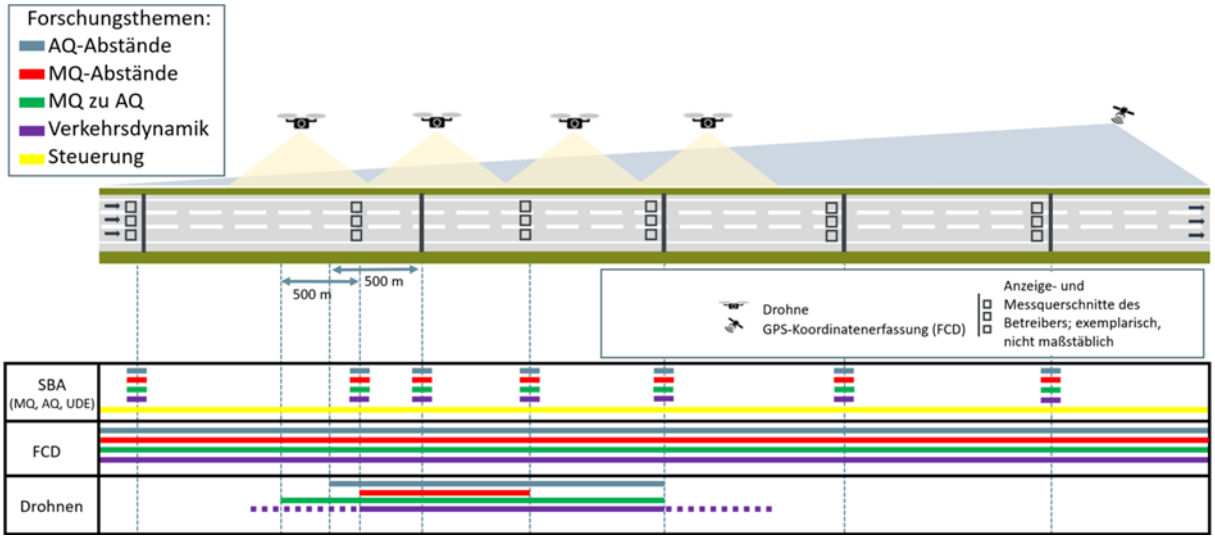


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung des Messkonzepts

Die Dichte von AQ/MQ orientiert sich in der Regel an der Streckensituation. An kritischen Streckenabschnitten werden AQ/MQ in dichterer Abfolge gebaut. SBA mit immer gleichen MQ/AQ-Abständen kommen daher in der Praxis selten vor, da Einflussfaktoren wie z. B. die Sichtbarkeit der AQ und die Lage von Anschlussstellen und Parkplätzen im Verlauf der SBA-Strecke variieren.

Bei der Erstellung des Messkonzepts ist zu beachten, dass verschiedene Wechselwirkungen existieren. Beispielsweise beeinflussen die Abstände der AQ zueinander sowie die Abstände der MQ zueinander die Wirkungen, die wiederum auch abhängig von der Zuordnung der MQ zu einem AQ sind. Im Hinblick auf die Analyse realer SBA und die Anwendung der Projektergebnisse ist zudem zu beachten, dass die Festlegung der Standorte von AQ in der Praxis auch in Abhängigkeit von den Sichtverhältnissen auf der Strecke und unter Vermeidung von Sichtverdeckungen, z. B. durch Überführungsbauwerke und Überkopfbeschilderungen, erfolgen muss. Darüber hinaus ist die Wirkung von SBA von zahlreichen weiteren Faktoren abhängig, die ggf. im gewählten Messkonzept nicht oder nur bedingt einbezogen werden können. Abbildung 3-5 enthält eine Übersicht möglicher Faktoren, die Einfluss auf die Wirkung von SBA haben können und zwischen denen vielfach Abhängigkeiten und kausale Zusammenhänge bestehen. Beispielsweise werden vielfach aus betrieblichen Gründen MQ direkt am AQ montiert, was zur Folge hat, dass die MQ-Dichte an die AQ-Dichte gekoppelt ist. Auch die Zuordnung von MQ zu AQ steht im Zusammenhang mit den Schaltbildern (z. B. Geschwindigkeitstrichter). Weitere Komplexitäten ergeben sich daraus, dass die Steuerungsphilosophie (überwiegend reagierend oder proaktiv eingreifend) im kausalen Zusammenhang mit der Parametrierung und der eingesetzten Algorithmik stehen, aber auch mit dem verwendeten Erfassungsintervall.

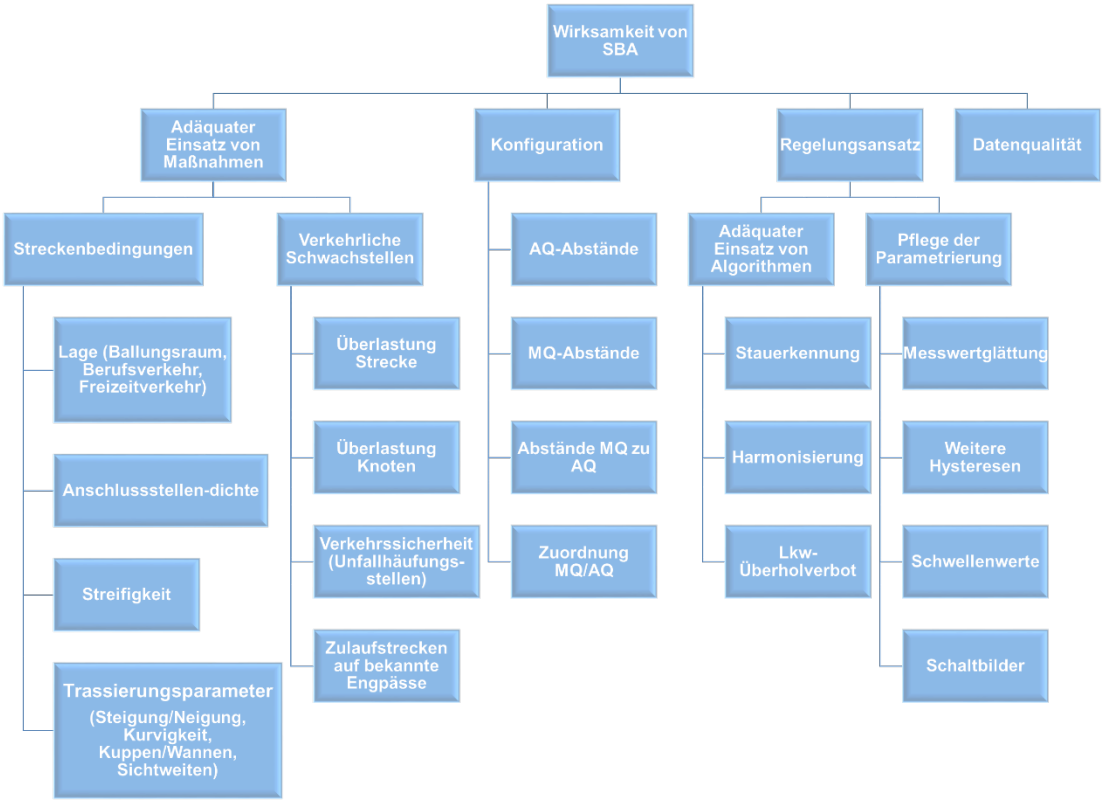


Abbildung 3-5: Beeinflussungsfaktoren für die Wirksamkeit von SBA

3.4.2 Messkonzept für Analyse von Floating Car Data (FCD)

Für die Analyse der FCD werden Langzeitdaten mit einem Zeitumfang von einem Jahr (2019) zugrunde gelegt. Für eine statistisch genügende Anzahl an Daten aus der Praxis werden insgesamt 93 AQ in 87 AQ-Abschnitten auf drei verschiedenen Autobahnen über eine Gesamtlänge von 129,3 km untersucht. Die Auswahl der Abschnitte deckt unterschiedliche Streckeneigenschaften und Anlagenkonfigurationen (MQ-Abstände, Zuordnung von MQ zu AQ etc.; vgl. auch Abbildung 3-5) ab.

Grundlage für die Analyse der FCD sind räumlich-zeitlich fein aufgelöste Meldepunkte, deren Auswertung mit den Verkehrs-, Umfeld- und Schaltdaten der SBA verknüpft wird. Die FCD liefern Einzelfahrzeugdaten, welche zur Auswertung über 100 m-Segmente aggregiert werden. Die SBA-Daten werden vergleichend für diesen Zeitraum ausgewertet. Folgende Daten der SBA werden verwendet:

- Lokale Verkehrsdaten – FG 1 (mittlere Fahrzeug-Geschwindigkeiten, Verkehrsstärken)
- Umfelddaten – FG 3 (Niederschlagsmenge, Niederschlagsart)
- Schaltdaten – FG 4 (Anzeigeinhalte der WVZ A, B und C)

Bereits mithilfe dieser Daten lassen sich detaillierte Aussagen zu den Forschungsthemen treffen. Beispielsweise lassen sich über die FCD Geschwindigkeitsprofile erstellen, die zusammen mit den lokalen Verkehrsdaten qualitätsgesichert und mithilfe der Schaltdaten hinsichtlich der Befolgung der Anzeigen auch räumlich ausgewertet werden können. Die Verknüpfung dieser zwei Datenarten ermöglicht eine Verifizierung der Befolgung der WVZ-Anzeigen.

Jedes der zuvor beschriebenen Forschungsthemen (vgl. Kapitel 3.3) hat andere Anforderungen für die Analyse der FCD. Die themenbezogenen Teilkonzepte werden nachfolgend beschrieben. Die schematische Darstellung des Messkonzepts in Abbildung 3-4 bietet hierzu eine Illustration der Einsatzbereiche der FCD und der SBA-Daten.

Für das Forschungsthema 1 „AQ-Abstände“ werden aggregierte FCD für die ganze Strecke einer SBA ausgewertet. Somit lassen sich mehrere AQ und eine Vielzahl an Schaltungen untersuchen, wofür SBA-Daten für lokale Querschnitte verwendet werden. Für das Forschungsthema 2 „MQ-Abstände“ werden aggregierte FCD für die ganze Strecke einer SBA analysiert, womit sich mehrere MQ sowie eine Vielzahl an Verkehrszuständen und -situationen untersuchen lassen. Für das Forschungsthema 3 „Zuordnung von MQ zu AQ“ werden aggregierte FCD für die ganze Strecke einer SBA ausgewertet. Dadurch können mehrere Zuordnungen von MQ zu AQ untersucht werden, wobei auch die lokalen, querschnittsbezogenen SBA-Schaltungen mit einbezogen werden. Für das Forschungsthema 4 „Berücksichtigung der Dynamik der Verkehrszustände“ werden aggregierte FCD für die gesamte Strecke einer SBA ausgewertet, um mehrere AQ und MQ sowie eine Vielzahl an Verkehrszuständen und -situationen zu untersuchen. Dazu werden auch die betriebenen SBA-Steuerungsverfahren in die Analyse mit einbezogen.

Für das Forschungsthema 5 „Dependenzen von Steuerungsintervallen und MQ-AQ-Abständen“ werden Daten über einen langen Zeitraum benötigt. Die wesentliche Grundlage bilden die SBA-Daten. Die Streckenauswahl soll hierfür verschiedene Steuerungsintervalle (z. B. 15 s und 1 min) abdecken.

3.4.3 Messkonzept für die Analyse von Videodaten aus Drohnenerhebungen

Um die Datengrundlage der FCD-Analyse zu erweitern und weitere Verifikations- und Auswertemöglichkeiten zur Verfügung zu haben, werden zusätzlich Messungen mit Drohnen durchgeführt. Zudem können bestimmte Aspekte des Verkehrsablaufs sowie der Verkehrsdynamik nur durch ein vollständiges räumlich-zeitliches Abbild des Verkehrs analysiert werden. Die lokalen Verkehrsdatenerfassungen der SBA bieten in der Regel nur zeitlich kontinuierliche Daten an lokalen Orten für das gesamte Fahrzeugkollektiv, die FCD hingegen bieten räumlich kontinuierliche Daten nur für ein Teilkollektiv. In der Analyse der Videoaufnahmen aus Drohnenerhebungen soll daher eine vollständige räumlich-zeitliche Erfassung der Verkehrslage zugrunde liegen. Hierfür eignet sich besonders die Erfassung und Analyse von Fahrzeugtrajektorien. Allerdings können Erhebungen mit Drohnen nur für einen sehr kurzen Zeitraum je Erhebung durchgeführt werden. Gegenüber den FCD haben sie den Vorteil, dass das gesamte Fahrzeugkollektiv erfasst wird, allerdings für einen kurzen räumlich-zeitlichen Bereich. Mit Hilfe der drohnenbasiert erhobenen Daten ist es möglich, die Aussagekraft der FCD in Verbindung mit den lokalen Verkehrsdaten hinsichtlich des Verkehrsverhaltens des Gesamtkollektivs zu verifizieren und räumlich-zeitlich präzisere Daten über die Dynamik von Dichtewellen zu erhalten. Durch die räumlich deutlich feinere Auflösung der Trajektorien aus drohnenbasiert erhobenen Daten kann beispielsweise präzise identifiziert werden, an welchem Ort die Verkehrsteilnehmenden auf wahrgenommene SBA-Schaltungen reagieren und wo im weiteren Fahrtverlauf wieder beschleunigt wird, bevor die Anzeige des nächsten AQ erreicht ist (siehe auch Abbildung 3-1). So kann beispielsweise erfasst werden, an welchem Ort stromauf- oder stromabwärts des geschalteten AQ eine Verhaltensänderung einsetzt und wie stark in Abhängigkeit

vom angezeigten Schaltbild und der vorherrschenden Verkehrssituation beschleunigt oder verzögert wird. So können auch detaillierte Erkenntnisse über das „Vergessen“ von Schaltungen oder „Mitzieheffekte“ (andere Fahrzeugführende orientieren sich an der Geschwindigkeit der benachbarten Fahrzeuge) analysiert werden. Zudem können aus der vollständigen Erfassung des Fahrzeugkollektivs weitere Untersuchungen zu Effekten wie freiwilliger und „erzwungener“ Befolgung (wenn der vorherrschende Verkehrszustand keine andere Geschwindigkeitswahl zulässt) präziser untersucht werden als mit aggregierten Daten. Auch verkehrssicherheitsrelevante Faktoren wie die Häufigkeit kritischer Fahrzeugabstände oder Fahrstreifenwechsel können aus Trajektoriendaten abgeleitet werden.

Für die Untersuchung wurden an fünf Strecken Erhebungen mit Drohnen durchgeführt. Der Betrachtungszeitraum je Erhebung betrug mindestens 2 Stunden und wurde auf Zeitpunkte gelegt, an denen ein hohes Verkehrsaufkommen mit Harmonisierungsbedarf vorlag. Die Erhebungen fanden im Sommerhalbjahr 2022 statt. Die Betrachtungszeiträume wurden mithilfe von historischen Daten in einer Voruntersuchung so festgelegt, dass repräsentative Wochentage betrachtet werden konnten. Die Flughöhe über Grund betrug dabei 300 bis 500 m. Der einzuhaltende Abstand zu Autobahnen von 100 m hat bei dieser Höhe kaum Einfluss, sodass der Verkehr nahezu senkrecht von oben aufgenommen werden konnte und keine Verdeckungen auftraten. Bei 500 m Flughöhe konnte eine räumliche Abdeckung je Drohnenstandort von bis zu 650 m erreicht werden. Um große AQ-/MQ-Abstände vollständig abdecken zu können, war der Einsatz von bis zu fünf Drohnen gleichzeitig notwendig. Um den Streckenabschnitt lückenlos aufnehmen zu können, wurde ein Überlappungsbereich von nebenliegenden Drohnenaufnahmen von mindestens 50 m vorgesehen. Insgesamt war somit eine räumliche Abdeckung von maximal 3 km möglich. Je Drohnenstandort wurden zwei Drohnen eingesetzt, die im Wechselbetrieb arbeiteten. Damit auch im zeitlichen Verlauf keine Lücke entstand, blieb die abzulösende Drohne so lange in der Luft, bis die ablösende Drohne ihre Position in der Luft eingenommen und das Video gestartet hatte. Hierfür war ein Versatz in Lage und Höhe zwischen den Luftpositionen der Drohnen von mindestens 10 m vorzusehen. Dies hatte keinen Einfluss auf eine durchgehende Auswertung der Aufnahmen des Drohnenstandorts. Die Drohnen haben stets beide Fahrtrichtungen der Autobahn erfasst, weshalb die Möglichkeit bestand, beide Fahrtrichtungen auswerten zu können, falls auch in der Gegenrichtung eine SBA vorhanden war und die Querschnitte entsprechend dem Untersuchungskonzept auch von den Kameras abgedeckt werden konnten. Als Voraussetzung für den Einsatz waren zudem günstige Witterungsbedingungen (kein Niederschlag, kein oder nur geringer Wind mit Windgeschwindigkeiten < 10 km/h) sowie gute Sichtbedingungen erforderlich. Die Entscheidung über das Ausrücken zur Messung erfolgte immer tagesaktuell und unter Berücksichtigung der prognostizierten Witterungsbedingungen. Die Flughöhe wurde dabei basierend auf den gesetzlichen Vorgaben und der Länge der aufzunehmenden Strecke festgelegt. Je höher die Flughöhe wird, desto größer wird der Sichtwinkel der Drohnen und desto geringer werden die erfassten Fahrzeug-Pixel für das KI-Tool. Die Praxis hat gezeigt, dass bei bis zu 500 m Flughöhe mit einer akzeptablen Genauigkeit zu rechnen ist. Aus diesem Grund wurde bei den Drohnenerhebungen möglichst eine Flughöhe von 500 m gewählt. Jede Drohne ist in der Lage, mit der Akkulaufzeit i.d.R. 20 Minuten in Einsatz zu sein und ca. 15 Minuten Video aufzunehmen. Damit die mikroskopischen Verkehrsdaten bei der Datenauswertung kontinuierlich erhoben werden, werden pro Standort zwei Drohnen eingesetzt. Die Drohnen werden zyklisch gewechselt, sobald die Akkus leer sind. Das bedeutet, dass pro Stunde Aufnahme mindestens vier

Mal die Drohnen gewechselt werden. In diesem Fall entstehen keine Lücken in der geplanten Aufnahmedauer. In Tabelle 3-1 wird dargestellt, unter welchen Umständen jede einzelne Messung durchgeführt wurde und welchen Umfang die Trajektoriendaten haben.

Messung	Ort	Datum	Anfang Trajektorien	Dauer Trajektorien	Drohnenstandorte	Länge Erfassungsbereich	Flughöhe
1	A 44, Werl	18.05.2022	14:16:18	3 h 2 min 34 s	3	1754 m	500 m
2	A 81, Pleidelsheim	31.05.2022	13:25:44	3 h 53 min 42 s	4	2125 m	500 m
3	A 5, Ober-Mörlen	08.06.2022	06:40:41	3 h 13 min 33 s	4	1958 m	450 m
4	A 5, Gemünden	30.06.2022	12:54:24	3 h 25 min 24 s	4	2369 m	450 m
5	A 2, Bad Nenndorf	12.08.2022	14:14:01	3 h 22 min 26 s	5	1931 m	300 m

Tabelle 3-1 Umfang Luftbildanalyse und Trajektoriendaten

3.5 Untersuchungsstrecken

3.5.1 Auswahlkriterien

Nachfolgend werden die Kriterien für die Streckenauswahl und die Einordung in das Messkonzept (s. Kapitel 3.4) beschrieben. Aufbauend auf vorliegenden Informationen über SBA aus dem Bundesinformationssystem Straße (BISStra 2022) der Bundesanstalt für Straßenwesen sowie den Forschungsnehmern bekannten SBA wurde zunächst eine Voranalyse von für das Projektvorhaben relevanten Strecken getroffen.

Um die Streckenauswahl für die Ziele der Untersuchung einzugrenzen, wurden diverse Kriterien festgelegt. Im BISStra-Auszug Stand März 2022 sind 170 SBA-Bezeichnungen von zehn Niederlassungen verzeichnet, die zwischen zwei Anschlussstellen liegen. Anhand des BISStra-Auszugs können folgende Informationen pro Anlagenbezeichnung für die Auswahl der Untersuchungsstrecken angewendet werden:

- Länge der beeinflussten Strecke,
- Betriebskilometer,
- Fahrtrichtung,
- Jahr der Verkehrsfreigabe,
- AQ-Abstand und -Anzahl,
- MQ-Anzahl (je Art für Verkehrs- und Umfelddaten).

Jede SBA-Anlagenbezeichnung kann mehrere SBA-Abschnitte umfassen. Da die Angaben der AQ-Abstände im BISStra-Auszug zum Teil fehlten, wurde soweit möglich anhand der Anzahl der AQ und der Länge des Abschnitts ein mittlerer Abstand berechnet.

Nachfolgend werden die durchgeführten Schritte zur Streckenauswahl beschrieben. Zunächst wurde im Schritt 0 mit einer groben Filterung geprüft, ob aufgrund der vorliegenden Daten aus dem BISStra eine weitere Analyse sinnvoll war (s. Tabelle 3-2).

Schritt	Kriterium	SBA-Bezeichnung	SBA-Abschnitte
0	**Ausgangssituation**	**170**	**887**
	Angaben gegeben	90	491
	Angaben berechnet	42	249
	AQ-Anzahl < 2	3	11
	Keine Angabe	35	136
	Ergebnis	**132**	**740**

Tabelle 3-2: Schritt 0 der Untersuchungsstreckenauswahl

Aus den gesamten 170 SBA-Anlagenbezeichnungen blieben so 132 Anlagen für die weitere Analyse übrig, da die übrigen 38 Anlagen entweder keine ausreichenden Angaben enthielten oder aufgrund der geringen AQ-Anzahl ausgeschlossen wurden.

In Schritt 1 wurden die kurze Beeinflussungsstrecken (Annahme: < 8 km) ausgeschlossen, da diese im Sinne des Forschungsprojekts Sonderfälle darstellen. In Schritt 2 wurde aus Gründen des Datenerhebungsaufwands zunächst eine Beschränkung auf sechs Bundesländer vorgenommen, in denen eine ausreichende Bandbreite der maßgebenden Randbedingungen von SBA und insbesondere Strecken mit einem ausreichend hohen Verkehrsaufkommen und überregionaler Verkehrsbedeutung vorhanden sind. Bei der Auswahl der SBA-Abschnitte wurden in Schritt 3 mithilfe der AQ-Betriebskilometer die Randbereiche der jeweiligen SBA ausgeschlossen, da im Rahmen der Drohnenerhebungen nur voll beeinflusste Abschnitte und nicht der Übergang vom oder zum unbeeinflussten Verkehr untersucht werden sollte. In Schritt 4 wurde überprüft, ob SBA auf beiden Richtungsfahrbahnen der Autobahn vorhanden sind, damit bei der Messung möglichst zwei Fahrtrichtungen erfasst und so die empirische Datengrundlage erweitert werden konnte. Abschließend wurden die verbliebenen SBA hinsichtlich ihres mittleren AQ-Abstands kategorisiert. Die Schritte 1 bis 5 sind in Tabelle 3-3 zusammengefasst.

Schritt	Kriterium	SBA-Anlagenbezeichnung	SBA-Abschnitte
1	**SBA-Länge ≥ 8 km**	102	651
2	**NRW, HS, BW, RP, HH, NS**	65	402
3	**Lage in SBA (15 - 85 %)**	55	196
4	**SBA beidseitig**	51	185
5	**Mittlerer AQ-Abstand**		
	"gering" ≤ 1 km	10	47
	"mittel" 1 – 2 km	33	100
	"groß" ≥ 2 km	8	38

Tabelle 3-3: Schritte 1 bis 5 der Auswahl der Untersuchungsabschnitte

Aufbauend auf diesen systematischen Auswahlschritten wurde anhand mehrerer Kartengrundlagen untersucht, ob die verbliebenen Untersuchungsstrecken innerhalb von Flugverbotszonen, Naturschutzgebieten oder weiteren Bereichen mit Drohnenflugbeschränkungen liegen. Dabei zeigte sich, dass Autobahnabschnitte mit SBA, hohem Verkehrsaufkommen und überregionaler Verkehrsbedeutung häufig im Bereich von Ballungsräumen und damit auch in

Flughafennähe liegen und somit nicht für drohnengestützte Verkehrserhebungen geeignet sind.

Die so verbliebenen SBA-Abschnitte aus dem gefilterten BISStra-Auszug unter Berücksichtigung der Flugverbotszonen wurden für eine detailliertere Analyse in eine GIS-Grundlage (mittels der Software QGIS) für die endgültige Streckenauswahl überführt, die nachfolgend beschrieben wird. Die GIS-Grundlage verfügt über mehrere Grundkarten, die zur Orientierung sowie zur Auswahl der genauen Standorte der AQ verwendet werden kann. Die Auswahl der Untersuchungsstrecken im GIS erfolgte folgendermaßen:

1. AQ wurden anhand von Satellitenbildern bzw. vorliegenden Informationen der Verkehrszentralen identifiziert und manuell im GIS eingetragen.
2. Brücken, Rastanlagen oder andere Hindernisse für Drohnenflüge wie Stromtrassen, Windkraftanlagen und sonstige Einschränkungen wurden ins GIS importiert.
3. Die Erreichbarkeit der Standorte für Drohnenbefliegungen wurde geprüft. Felder und Feldwege sind z. B. gut erreichbare Standorte für Drohnenflüge, Wohn- oder Industriegebiete hingegen eher schlechte Standorte.

Durch diese Analyse konnten folgende SBA identifiziert werden:

- Nordrhein-Westfalen:
  - SBA A 1 AD Erfttal – AK Bliesheim mit SBA A 61 AK Meckenheim – AK Bliesheim
  - SBA A 4 AK Aachen – AK Köln-West
  - SBA A 46 Wuppertal-Barmen – Wuppertal-Sonnborn
  - SBA A 44 Werl-Unna
- Rheinland-Pfalz:
  - SBA A 6/A 63 Kaiserslautern (Bereich 1)
  - SBA A 61 Meckenheim – Mendig
- Hessen:
  - SBA A 5 Zeppelinheim – Gambacher Kreuz
  - SBA A 45/66 Hanauer Kreuz – Langenselbold
- Baden-Württemberg:
  - SBA A 81 Leonberg – Mundelsheim
- Niedersachsen:
  - SBA A 2 AS Wunstorf-Luthe – Landesgrenze NRW

Für diese Auswahl wurden weitere Eigenschaften der Strecken überprüft, die in Tabelle 3-4 zusammengefasst sind.

Um aus der Liste in Tabelle 3-4 die endgültigen Auswahlstrecken für die Erhebung der Drohnendaten zu finden, wurden die verkehrlichen Charakteristika der Strecken untersucht. Dazu wurde ein Fragebogen mit folgenden Inhalten erstellt und an die betroffenen Verkehrszentralen geschickt:

1. Liegt in dem Abschnitt eine besonders hohe Längsneigung vor, die einen spürbaren Einfluss auf den Verkehr hat?
2. Gibt es ein allgemeines Zuordnungsschema von MQ zu AQ?

3. Gibt es eine Baustelle in diesem Abschnitt oder in der Nähe bzw. ist eine Baustelle in den Monaten April bis Oktober 2022 geplant?
4. Gibt es in diesem Abschnitt eine oder mehrere regelmäßige Spitzenstunden (werktags)?
5. Gibt es in diesem Abschnitt häufige und/oder regelmäßige Anforderungen von Harmonisierungsschaltungen?
6. Gibt es in diesem Abschnitt häufige und/oder regelmäßige Stausituationen?
7. Falls die Fragen Nr. 5 und 6 mit „nein“ beantwortet wurden: Gibt es im Bereich der gesamten SBA verkehrlich interessante Bereiche?
8. Gibt es in diesem Abschnitt eine Grundversorgung der Anzeigequerschnitte (keine Dunkelschaltung)?
9. Wird die SBA vollständig MARZ-konform gesteuert oder gibt es Besonderheiten bei der Anlagensteuerung?
10. Ist eine Temporäre Seitenstreifenfreigabe (TSF) in diesem Abschnitt in Betrieb?
11. Gibt es regelmäßige Witterungszustände, die Einfluss auf den Verkehr haben (z. B. Nebel)?
12. Gibt es weitere Besonderheiten und/oder Informationen, die Sie uns zu dieser SBA bzw. dem genannten Streckenbereich geben können?

Zusätzlich zu den Informationen aus dem Fragebogen wurden Verkehrsdaten angefragt und analysiert. Für NRW lag eine Auswertung der Verkehrszustände und die Anzahl von Zusammenbrüchen im Jahr 2019 bereits vor. Diese wurde ebenfalls in die GIS-Grundlage importiert und damit evaluiert, ob die vorausgewählten Strecken für die Messungen interessant sind.

Nummer	BAB	Bundesland	Länge SBA [km]	Von AS	Bis AS	FS-Anzahl FR1	FS-Anzahl FR2	Länge zwischen AS [km]	Anzahl AQ - FR1	Anzahl AQ - FR2	mittlerer AQ-Abstand (Abschätzung nach BISStra)	SBA in diesem Bereich beidseitig	Erreichbarkeit Drohnen-standorte
1	5	HE	57	Gambacher Kreuz	Butzbach	3	3	5,1	3	1	0,9 - 1,0	ja	gut
2	5	HE	57	Bad Nauheim	Ober-Mörlen	3	3	2,8	2	2	1,2	ja	gut
3	5	HE	57	Ober-Mörlen	Raststätte Wetterau	3	3	2,7	3	4	0,7	ja	gut
4	5	HE	57	Nordwestkreuz Frankfurt	Raststätte Taunusblick	3	4	1,8	3	3	0,4 – 0,9	ja	schlecht
5	5	HE	57	Raststätte Schä-ferborn	Friedberg	3	3	3,2	4	5	0,5 – 1,1	ja	gut
6	4	NW	50	Merzenich	Elsdorf	3	3	10,5	6	6	1,5 - 1,8	ja	gut
7	4	NW	50	Weisweiler	Langerwehe	3	3	4,0	2	0	2,4	nein	gut
8	44	NW	31	Werl	Raststätte am Haarstrang Nord	2	2	1,4	2	0	0,9	nein	gut
9	81	BW	27	Mundelsheim	Pleidelsheim	3	3	5,3	4	3	1,0 - 2,0	ja	gut
10	81	BW	27	Zuffenhausen	Feuerbach	3	3	4,7	3	3	1,4 - 1,9	ja	gut
11	1/61	NW	8	Erfttal	Bliesheim	3	3	4,1	2	2	1,8 - 2,5	ja	gut
12	61	NW	25	Rheinbach	Miel	2	2	8,1	2	1	2,0	ja	gut
13	61	RP	33	Wehr	Rastanlage Brohltal	2	3	3,9	2	2	0,8 - 1,4	ja	gut
14	6	RP	34	Kaiserslautern-Ost	Enkenbach	3	2	6,6	2	2	1,5	ja	schlecht
15	3	HE		Obertshausen	Hanau	3	3	3,6	4	4	1 – 1,2	ja	gut
16	45/66	HE	14	Hanauer Kreuz	Langenselbol-der Dreieck	4	4	4,1	3	1	0,3 - 0,5	ja	gut
17	46	NW	8	Wuppertal-Varres-beck	Wuppertal-Ka-ternberg	3	2	2,2	2	0	1,2	ja	schlecht
18	2	NI	47	Wunstorf-Kolen-feld	Wunstorf/Lu-the	3	3	2,9	3	3	1,5	ja	gut

Tabelle 3-4: Vorauswahl der Untersuchungsstrecken nach der GIS-Auswertung

3.5.2 Übersicht über die Untersuchungsstrecken

Da die Messungen bedingt durch Witterung und Tageslichtverhältnisse zu den Spitzenstunden möglichst im Zeitraum von Mai bis Juli 2022 (je nach Ferienkalender des betroffenen Bundeslands) stattfinden sollten, wurden auch aktuelle Verkehrsdaten für die vorausgewählten Strecken für einen Monat (März 2022) untersucht. Anhand der lokalen Verkehrsdaten konnte geprüft werden, ob und an welchen Wochentagen sowie Zeitbereichen die vorausgewählten Strecken für die Messung verkehrlich interessant waren. Es wurden Gangliniendiagramme für den ganzen Monat März 2022 erstellt und nach regelmäßigen Verkehrsereignissen gesucht. Die sieben in 3.5.1 genannten Strecken wurden so für die Untersuchung ausgewählt (s. Tabelle 3-5). Für zwei weitere für die Untersuchung vorgesehene Strecken mit einer Gesamtanzahl von 33 AQ stellte sich im Verlauf der Datenaufbereitung heraus, dass die FG 1-, FG 3- und FG 4-Daten in einer Form geliefert wurden, dass sie für den vorgesehenen Untersuchungszweck nicht brauchbar waren. Die Gesamtanzahl der untersuchten AQ reduzierte sich durch den Ausschluss der Strecken von 126 auf 93 AQ, bzw. von 124 AQ-Abschnitten auf 87 AQ-Abschnitte.

ID	BAB	Bundesland	Knoten von	Knoten bis	FS	Länge Aufnahmebereich [km]	Anzahl AQ im Aufnahmebereich	AQ-Abstand [km]	Beginn Aufnahme	Ende Aufnahme
D1	A 44	NW	AK Werl	RS Am Haarstrang	2	1,8	2	0,9	18.05.2022 14:15 Uhr	18.05.2022 17:20 Uhr
D2	A 2	NI	AS Lauenau	AS Bad Nenndorf	3	1,9	2	1,7	12.08.2022 14:15 Uhr	12.08.2022 17:40 Uhr
D3	A 2	NI	AS Bad Nenndorf	AS Lauenau	3	1,9	2	1,7	12.08.2022 14:15 Uhr	12.08.2022 17:40 Uhr
D4	A 81	BW	AS Pleidelsheim	AS Mundelsheim	3	2,1	2	1,7	31.05.2022 13:25 Uhr	31.05.2022 17:20 Uhr
D5	A 5	HE	AS Obermörlen	RS Wetterau	3	1,9	3	0,7; 0,6	08.06.2022 06:40 Uhr	08.06.2022 09:55 Uhr
D6	A 5	HE	RS Wetterau	AS Obermörlen	3	2,0	3	0,8; 0,8	08.06.2022 06:40 Uhr	08.06.2022 09:55 Uhr
D7	A 5	HE	AS Homberg (Ohm)	L 3146 (bei Gemünden)	2	2,1	2	1,1	30.06.2022 12:55 Uhr	30.06.2022 16:20 Uhr

Tabelle 3-5: Übersicht der Strecken für die Analyse der Daten aus Drohnenerhebungen

Für die Analyse der FCD wurden alle 93 AQ auf den zugehörigen 87 AQ-Abschnitten innerhalb von sechs unterschiedlichen Strecken untersucht. Um eine Validierung der Ergebnisse aus der FCD-basierten Analyse mithilfe der Drohnendaten zu ermöglichen, wurden die Untersuchungsstrecken im Wesentlichen basierend auf den für die Drohnenerhebung verwendeten

Abschnitte ausgewählt. Die Drohnen-Untersuchungsabschnitte mit betrachteten Längen zwischen 1,8 und 2,1 km wurden dabei über ein oder beide Enden der jeweiligen Strecke auf Gesamtlängen zwischen 16,7 und 31,3 km ausgeweitet. Da für die SBA auf der A 81 keine Verkehrs-, Schalt- und Umfelddaten vorlagen, wurde ergänzend die SBA-gesteuerte Strecke der A 57 zwischen dem Kreuz Meerbusch und dem Kreuz Moers in beiden Fahrtrichtungen betrachtet. Als eine der wichtigsten Nord-Süd-Verbindungen im Niederrheingebiet ist die A 57 im Bereich des untersuchten vierstreifigen Abschnittes regelmäßig hoch belastet.

Das Kollektiv der Untersuchungsstrecken ist mit Blick auf die AQ-Abstandsverteilung nah an der Verteilung der mittleren AQ-Abstände der bundesweit vorhandenen Anlagen (ohne Berlin, Bremen, NRW, Sachsen-Anhalt, vgl. Abbildung 3-6) und somit repräsentativ für den bundesweiten SBA-Bestand. Der kürzeste AQ-Abschnitt des Kollektivs beträgt 467 m, der längste AQ-Abschnitt 2.544 m.

Eine Übersicht der Strecken und der erhobenen Daten findet sich in Tabelle 3-6. Die Charakteristika der Strecken werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

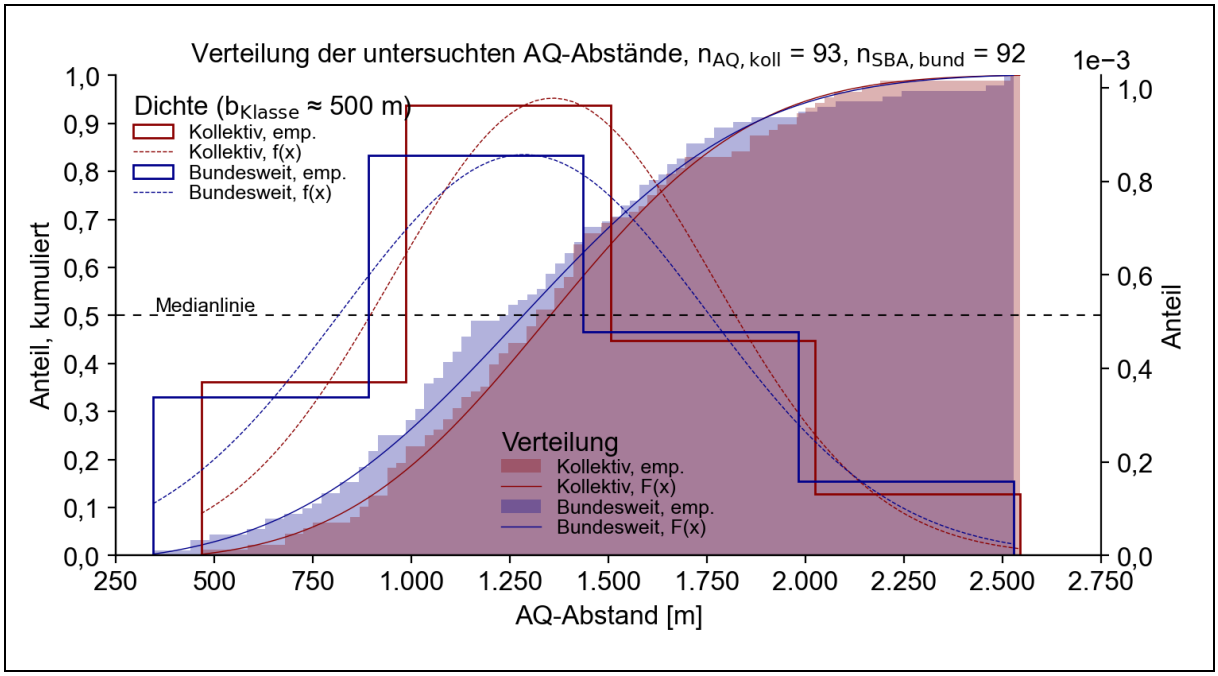


Abbildung 3-6: Vergleich der Verteilung der AQ-Abstände des Untersuchungskollektivs mit mittleren AQ-Abständen der bundesweiten SBA (ohne Berlin, Bremen, NRW, Sachsen-Anhalt)

ID	BAB	Bun-des-land	Knoten von	Knoten bis	FS	Länge [km]	An-zahl AQ	Anzahl FCD-Melde-punkte	Ver-kehrs-daten (FG 1)	Um-feld-daten (FG 3)	Schalt daten (FG 4)
F1	A 44	NW	AS Soest	AK Dortmund-Unna	2	30,75	21	9,1 Mio.	x	x	x
F2	A 57	NW	AK Meer-busch	AK Moers	2	16,68	11	4,1 Mio.	x	(x)	x
F3	A 57	NW	AK Moers	AK Meer-busch	2	16,68	9	4,0 Mio.	x	(x)	x
F4	A 5	HE	AK Gam-bach	AS Friedberg	3	22,32	18	11 Mio.	x	- 2)	x
F5	A 5	HE	AS Fried-berg	AK Gambach	3	22,32	17	9,8 Mio.	x	- 2)	x
F6	A 5	HE	AS Reiskir-chen	L 3146 (bei Gemünden)	3/2 1)	19,62	17	5,9 Mio.	x	- 2)	x

1) Auf einen ca. 15,4 km langen dreistreifigen Abschnitt folgt ein ca. 4,2 km langer zweistreifiger Abschnitt.

2) FG 3-Daten wurden in Hessen zum Erhebungszeitpunkt nur einen Monat lang vorgehalten.

Tabelle 3-6: Übersicht der Strecken und ausgewerteten Daten für die Analyse der FCD

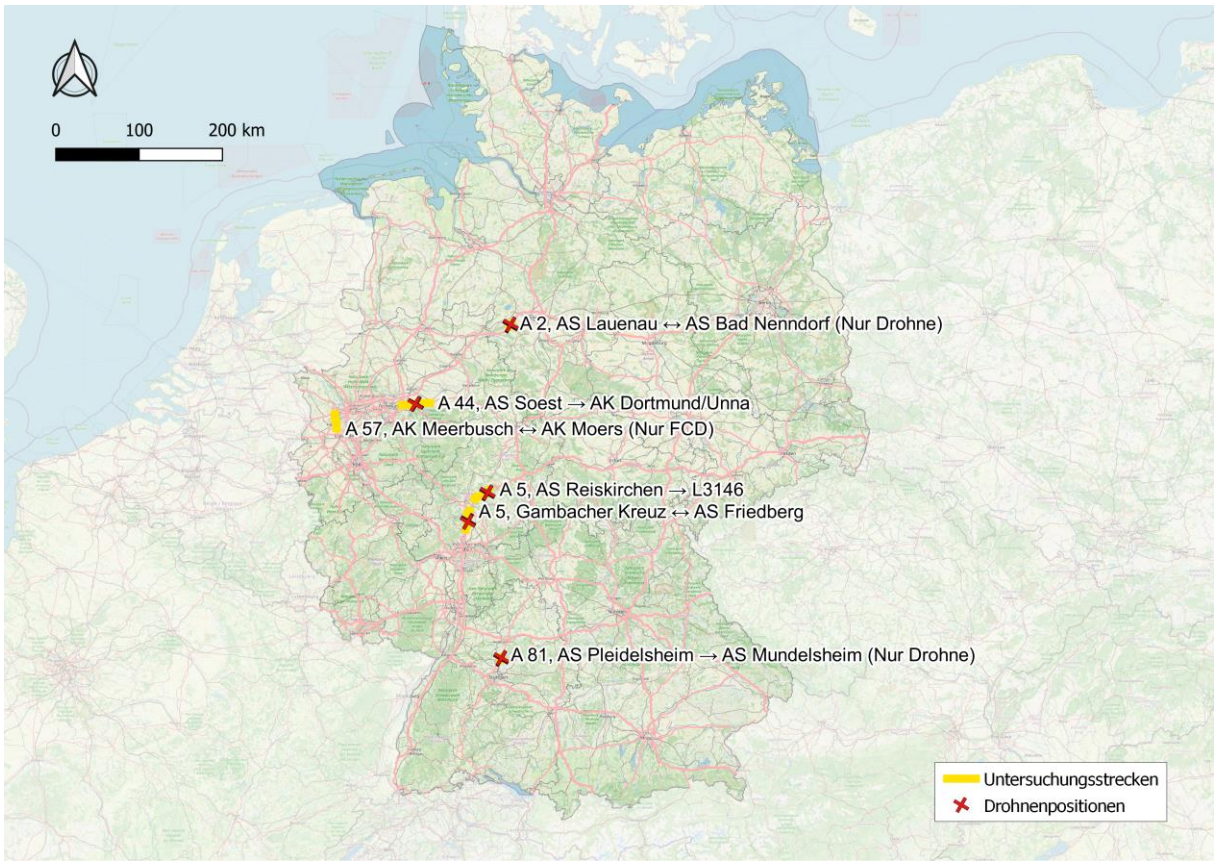


Abbildung 3-7: Lage der Untersuchungsstrecken (Erstellt mit Kartenmaterial von OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

3.5.3 A 44 von der AS Soest bis zum AK Dortmund/Unna

Die A 44 verläuft mit mehreren Unterbrechungen von der belgischen Grenze bei Aachen durch Nordrhein-Westfalen bis nach Nordhessen. Der untersuchte zweistreifige Richtungsabschnitt der A 44 zwischen dem Autobahnkreuz Werl und der Anschlussstelle Unna-Ost hat eine Länge von 1,0 km. Entlang des Abschnittes sind zwei Anzeigequerschnitte mit einem Abstand von 0,9 km installiert.

Auf der Strecke zwischen dem AK Werl und der AS Unna-Ost gibt es in Fahrtrichtung West insgesamt zehn AQ. Zur Abdeckung des Wirkbereichs des ersten AQ westlich des AK Werl bis zum nächsten AQ inklusive eines räumlichen Vorlaufs von mindestens 200 m stromaufwärts des ersten AQ wurden drei Drohnenstandorte benötigt.

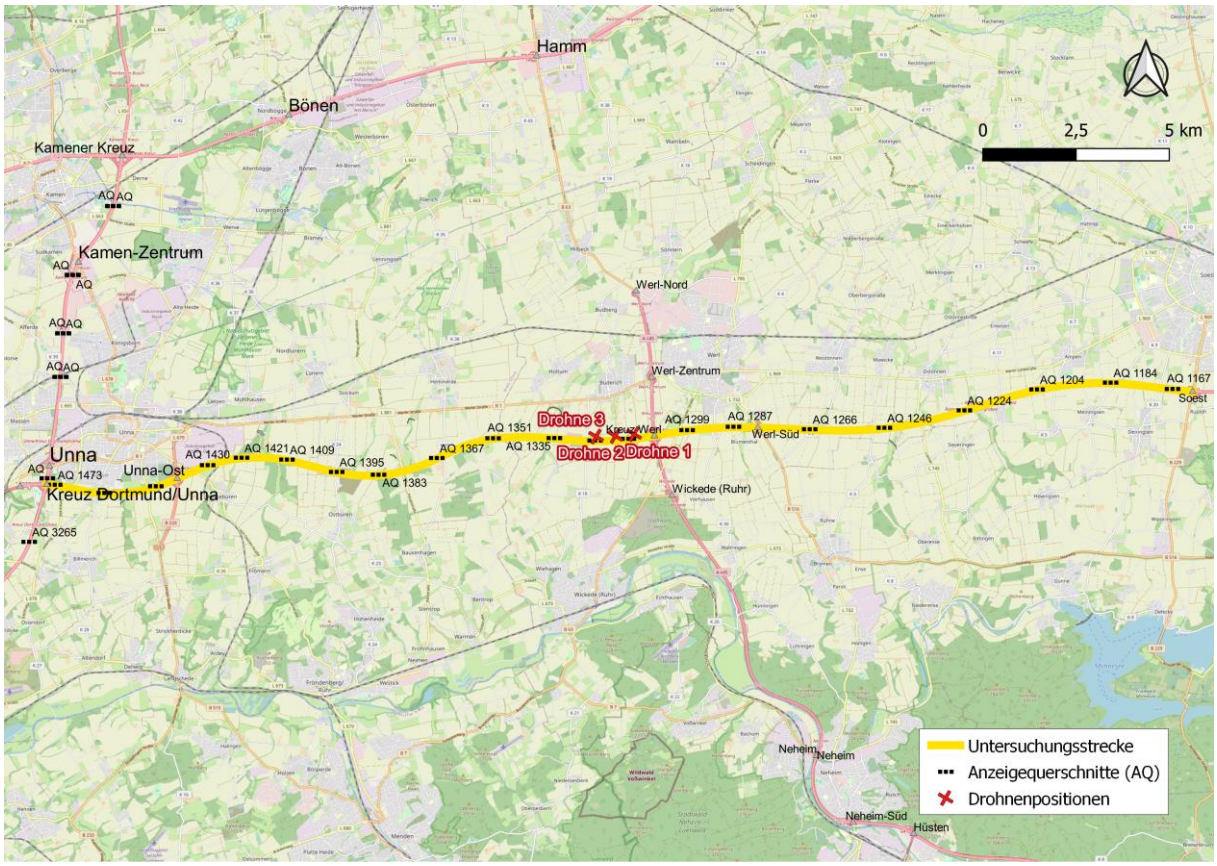


Abbildung 3-8: Lage der Untersuchungsstrecke der A 44, von der AS Soest bis zum AK Dortmund/Unna (Erstellt mit Kartenmaterial von OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

3.5.4 A 57 zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch (nur FCD)

Die Autobahn A 57 verläuft von der niederländischen Grenze parallel zum Rhein in Nord-Süd-Ausrichtung bis nach Köln. Der untersuchte, in Abbildung 3-9 dargestellte, zweistreifige Streckenabschnitt liegt zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch und ist 16,7 km lang. Eine Besonderheit der entlang des Streckenabschnittes installierten SBA ist die Zuordnung von mehreren MQ zu einem einzelnen AQ. In Fahrtrichtung Nord (AK Moers) umfasst die SBA 11 AQ, denen 18 MQ zugeordnet sind. In Fahrrichtung Süd (AK Meerbusch) sind 9 AQ installiert, denen ebenfalls 18 MQ zugeordnet sind.

Abbildung 3-9: Lage der beiden Untersuchungsstrecken der A 57, zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch (Erstellt mit Kartenmaterial von OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

3.5.5 A 5 zwischen dem Gambacher Kreuz und der AS Friedberg

Die A 5 verläuft südlich entlang der Landesgrenze zwischen Baden-Württemberg und Hessen. Es gibt drei Abschnitte auf der A 5, die dicht mit SBA bebaut sind: erstens südlich von Darmstadt, zweitens von Frankfurt bis südlich von Gießen und drittens östlich von Gießen. Der ausgewählte Abschnitt erstreckt sich von Ober-Mörlen bis zur Raststätte Wetterau und befindet sich in der Mitte einer langen SBA-Strecke, die kurze AQ-Abstände (durchschnittlich 0,7 km) aufweist. Um interessante Bereiche im Hinblick auf Verkehrszusammenbrüche zu finden, wurden die Verkehrsdaten von 2019 untersucht. Die Auswahl wurde für den mittleren Bereich getroffen, nicht nur aufgrund der hohen Anzahl von Verkehrszustand 3, sondern auch aufgrund der passenden Erreichbarkeit für Drohnenflüge.

Abbildung 3-10 zeigt den ausgewählten Bereich zwischen Ober-Mörlen und der Raststätte Wetterau im Detail. In diesem Abschnitt gibt es auf beiden Fahrtrichtungen SBA mit einem durchschnittlichen AQ-Abstand von 0,8 km. Mit vier Drohnenstandorten war es möglich, in Fahrtrichtung Nord zwei AQ-Abschnitte mit Abständen von 750 m und 850 m aufzunehmen. In Fahrtrichtung Süd wurden erfolgreich zwei AQ-Abschnitte mit Abständen von 600 m und 700 m gleichzeitig erfasst.

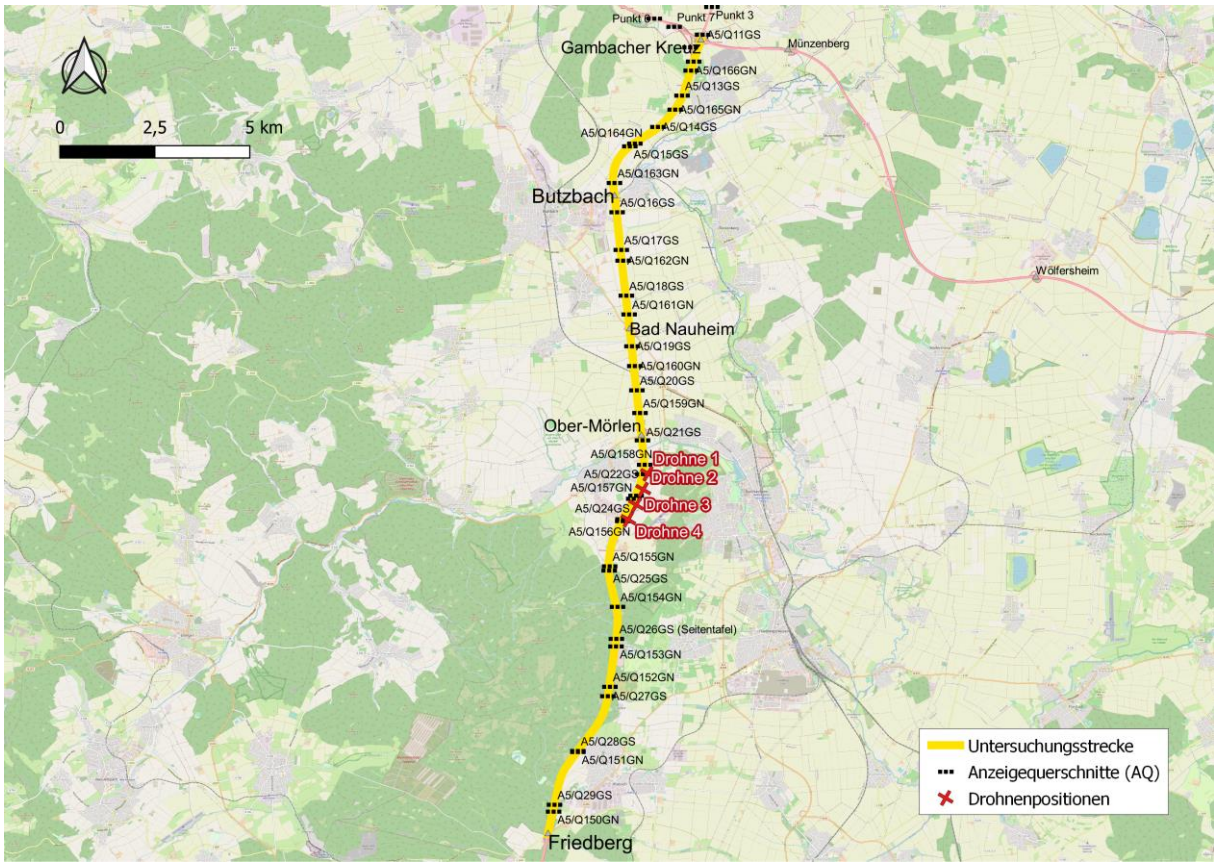


Abbildung 3-10: Lage der beiden Untersuchungsstrecke der A 5, zwischen dem Gambacher Kreuz und der AS Friedberg (Erstellt mit Kartenmaterial von OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

3.5.6 A 5 von der AS Reiskirchen bis zur L3146

Diese SBA-Strecke wurde am Ende eines ca. 19 km langen Abschnitts auf der A 5 ausgewählt, der einen durchschnittlichen Abstand von 1,1 km zwischen den AQ aufweist (siehe Abbildung 3-11).

Laut Informationen der VRZ gab es in diesem Abschnitt aufgrund einer Baustelle regelmäßigen Rückstau. Die Drohnenerreichbarkeit wurde überprüft, und die Messung wurde wie beschrieben durchgeführt. Aufgrund der Hindernisse wie Strommasten wurde die Messung auf beiden Seiten der Autobahn durchgeführt. Mit vier Drohnenstandorten konnte der Bereich zwischen zwei AQ mit einem Abstand von 1,1 km in einer Fahrtrichtung abgedeckt werden, und zwar bei einer Flughöhe von 450 m.

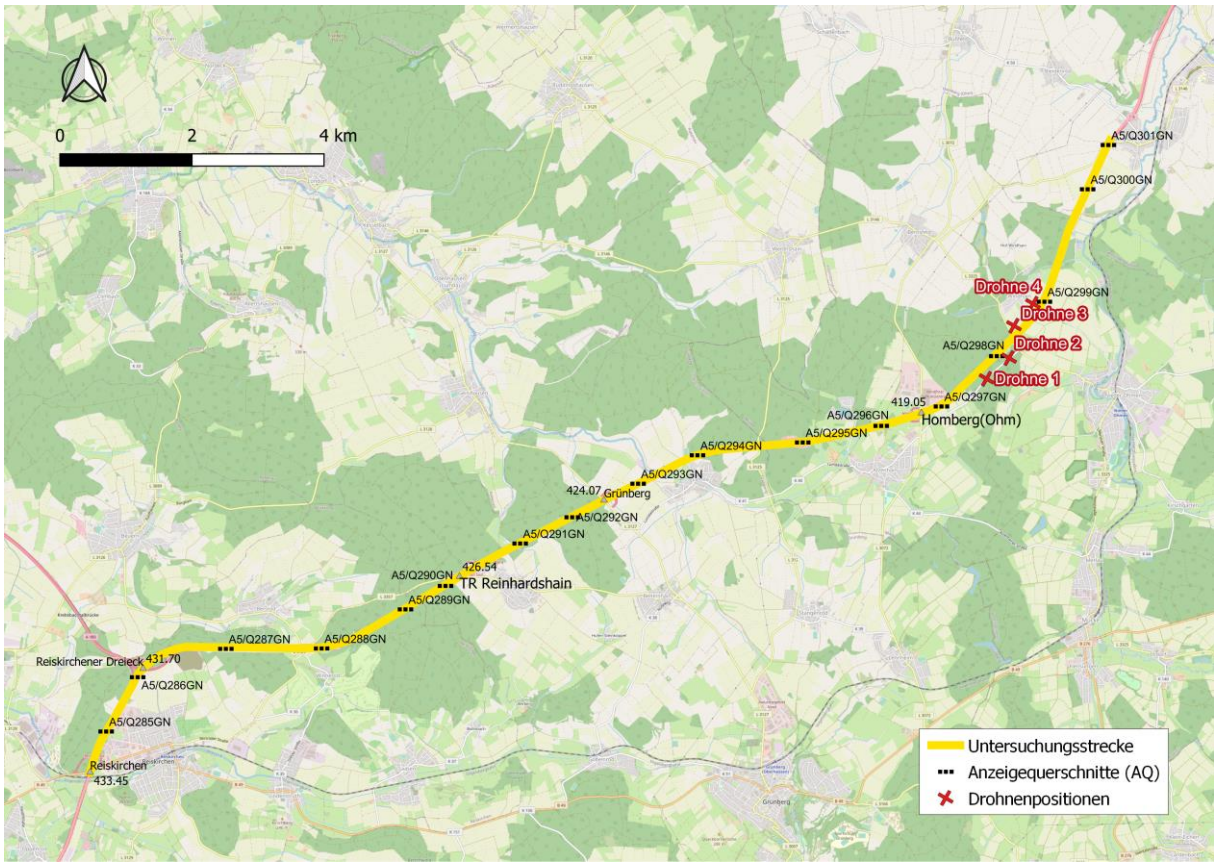


Abbildung 3-11: Lage der Untersuchungsstrecke der A 5, von der AS Reiskirchen bis zur Landesstraße L3146 (Erstellt mit Kartenmaterial von OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

3.5.7 A 2 zwischen der AS Lauenau und der AS Bad Nenndorf

Die A 2 verläuft vom Kreuz Oberhausen in Nordrhein-Westfalen bis zum Kreuz Werder in Brandenburg. Im Land Niedersachsen ist die A 2 durchgehend mit einer SBA ausgestattet. Um Bereiche mit vielen Verkehrszusammenbrüchen zu identifizieren, wurden die Verkehrsdaten des Jahres 2017 ausgewertet, um Bereiche mit erhöhten Verkehrszusammenbrüche zu finden. Ein Großteil der verkehrlich interessanten Bereiche befindet sich in bebauten Gebieten oder in Flughafenumgebung, und kann daher nicht mit Drohnen beflogen werden. Deshalb wurde der Bereich zwischen den Anschlussstellen Lauenau und Bad Nenndorf ausgewählt, der für Drohnenflüge zugänglich ist und große AQ-Abstände aufweist. In diesem Bereich konnte entweder südlich von Bad Nenndorf oder der Abschnitt nördlich von Lauenau ausgewählt werden. Aufgrund der Erreichbarkeit für Drohnenpiloten und der Sichtbarkeit wurde der untere Bereich gewählt. Von fünf Drohnenstandorten wurde der Verkehrsablauf in beiden Fahrtrichtungen über eine Länge von ca. 1,9 km aufgenommen. Der gesamte Abschnitt zwischen der AS Lauenau und der AS Bad Nenndorf ist in Abbildung 3-12 dargestellt.

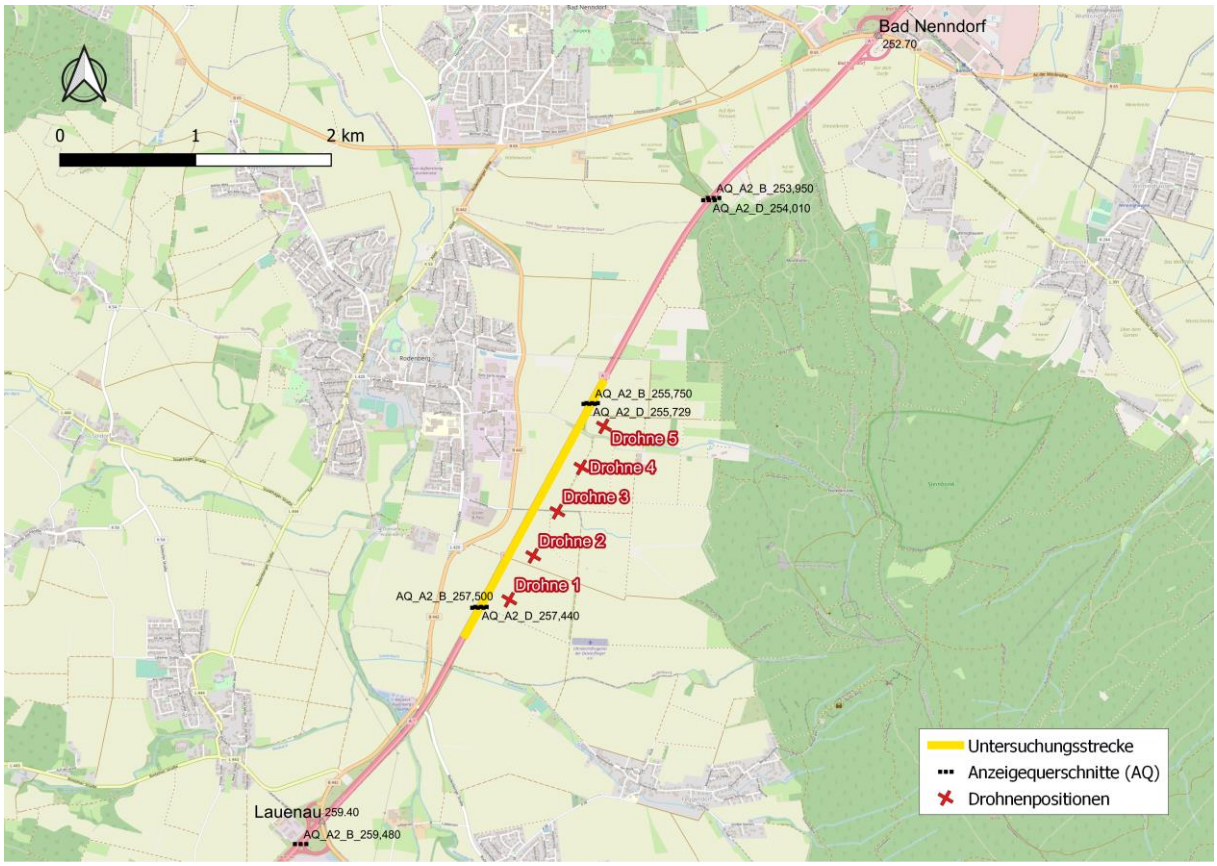


Abbildung 3-12: Lage der Untersuchungsstrecke der A 2, zwischen der AS Lauenau und der AS Bad Nenndorf (Erstellt mit Kartenmaterial von OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

3.5.8 A 81 von der AS Pleidelsheim bis zur AS Mundelsheim (Nur Drohne)

Die A 81 verläuft in Baden-Württemberg von der Landesgrenze Bayern im Norden bis an die Bundesgrenze zur Schweiz. Der untersuchte Abschnitt ist dreistreifig, ca. 4,5 km lang und befindet sich zwischen den Anschlussstellen Pleidelsheim und Mundelsheim. Entlang der Strecke sind je nach Fahrtrichtung 4 bzw. 3 AQ mit einem mittleren Abstand von 1,7 km installiert.

Die Verkehrsdaten aus dem Jahr 2019 zeigen, dass die Geschwindigkeitsganglinien in Fahrtrichtung Nord zwischen Pleidelsheim und Mundelsheim nachmittags regelmäßige Verkehrszusammenbrüche aufweisen.

Die MQ-Daten aus März 2022 zeigen ebenfalls an manchen Wochentagen nachmittags kurze Verkehrszusammenbrüche in Fahrtrichtung Nord. Basierend auf diesen Ereignissen wurde der Bereich nördlich von AS Pleidelsheim für die Drohnenmessung ausgewählt.

Für die Messung zwischen zwei AQ der Fahrtrichtung Nord wurden aufgrund des längeren AQ-Abstands vier Drohnenstandorte benötigt. Wegen des räumlichen Versatzes der AQ in der Fahrtrichtung Süd war es weder durch Optimierung der Drohnenstandorte noch durch den Einsatz eines fünften Drohnenstandorts möglich, auch die Fahrtrichtung Süd in der erforderlichen Konfiguration mit Vorlauf am ersten AQ zu erfassen, sodass sich die Analyse dieses Streckenabschnitts auf die Fahrtrichtung Nord beschränkt. Zudem liegen in diesem Bereich

versetzte Spitzenstunden vor (vormittags: Fahrtrichtung Süd / Stuttgart, nachmittags Fahrtrichtung Nord), sodass während der Erhebungsdauer der Verkehrsablauf nur in einer Fahrtrichtung für die Untersuchung relevante Erkenntnisse lieferte.

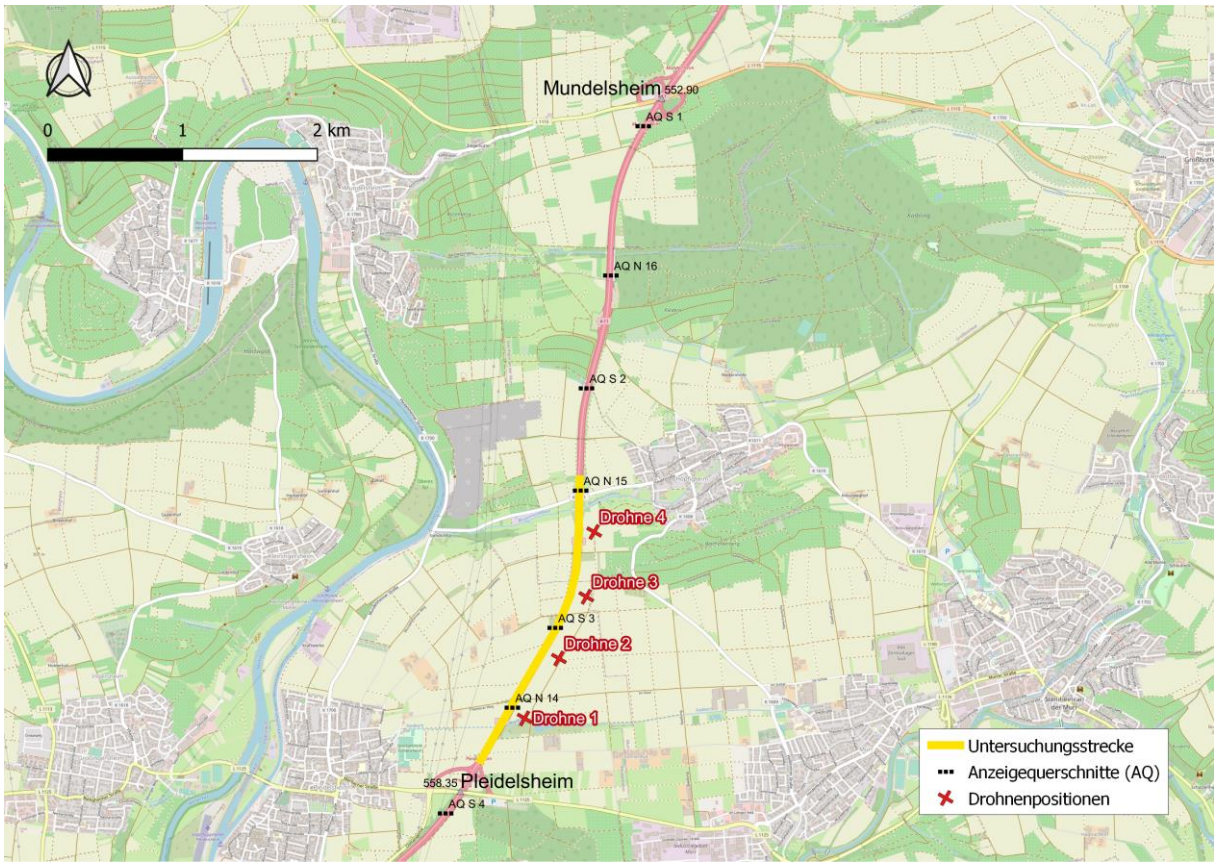


Abbildung 3-13: Lage der Untersuchungsstrecke der A 81, hinter der AS Pleidelsheim in Richtung AS Mundelsheim (Erstellt mit Kartenmaterial von OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

4 Empirische Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens

4.1 Datengrundlage und -aufbereitung

4.1.1 Räumlicher Bezug

Die Betriebskilometrierung der Autobahnen bildete die räumliche Referenzgröße für die Analyse der FCD sowie der Daten aus den Drohnenerhebungen. Die Informationen für die Betriebskilometer der Knotenpunkte wurden dem Autobahnverzeichnis (BAST, 2016) entnommen. Die Geoinformationen über die Lage der Mess- und Anzeigequerschnitte lagen im WGS-84-Format vor, der entsprechende Betriebskilometer konnte in der Regel den Herstellerplänen entnommen werden. Mithilfe einer Neuerfassung der geografischen Lage der AQ durch eine manuell-visuelle Lokalisierung der AQ anhand von Satellitenbildern und Befahrungsaufnahmen des Dienstleisters Mapillary wurde die Verortung der Geokoordinaten sowie die Richtigkeit der Angabe über den Betriebskilometer geprüft und, wenn nötig, angepasst. Die Genauigkeit der Zuordnung der AQ zum Betriebskilometer der jeweiligen Autobahn und zum jeweiligen Datenpunkt aus den FCD lag nach Abschluss der Prüfarbeiten bei etwa 5 m.

4.1.2 FCD

Als „Floating Car Data“ (FCD) werden Daten bezeichnet, die fahrzeugseitig generiert werden und den genauen Fahrtverlauf anhand von Meldepunkten beschreiben. Als minimale Information enthalten die Daten für jeden Meldepunkt die Ortskoordinate, den Zeitstempel und eine anonymisierte Fahrzeugkennung. Mithilfe von FCD können Geschwindigkeitsverteilungen für definierte Zeitintervalle und Netzabschnitte erstellt werden.

Im Rahmen der Untersuchung wurden FCD des ADAC des Jahres 2019 ausgewertet. Die Daten wurden zum Zweck der Verkehrslagedarstellung erhoben und enthalten Informationen von unterschiedlichen Providern. Die FCD wurden vom Lehr- und Forschungsgebiet Güterverkehrsplanung und Transportlogistik der Bergischen Universität Wuppertal in einer Form zur Verfügung gestellt, in der die Daten bereits den Untersuchungsstrecken zugeordnet und die Fahrzeugkennungen aus Gründen des Datenschutzes entfernt waren. Neben der Ortsangabe und dem Zeitstempel waren für jeden Meldepunkt die Parameter Momentangeschwindigkeit und Fahrtrichtung im Datensatz enthalten.

Die Verortung der Meldepunkte der Fahrzeuge lag neben der Koordinate auch in metrischer Form als Abstand des Meldepunktes zum Beginn der FCD-Strecke vor. Über einen Abgleich mit dem Betriebskilometer des ersten an der Untersuchungsstrecke gelegenen Knotenpunktes nach dem Autobahnverzeichnis (BASt, 2016) mit der entsprechenden Meterangabe der FCD erfolgte eine Konvertierung der metrischen Distanzangabe der FCD in eine betriebskilometrische Lage der Meldepunkte. Zur Vermeidung einer Fehlerfortpflanzung, über die bis zu 30 km langen Untersuchungsstrecken, wurde die Übereinstimmung der Verortung zwischen den Angaben aus dem Autobahnverzeichnis und den bereits übersetzten FCD-Meldepunkten (Koordinaten) entlang der gesamten Untersuchungsstrecken für jeden Knotenpunkt und jeden AQ geprüft und die korrekte betriebskilometrische Lokalisierung der Meldepunkte damit validiert.

Da die Genauigkeit der Verortung der FCD-Meldepunkte keine fahrstreifenfeine Zuordnung erlaubt, erfolgte die Zuordnung und spätere Auswertung der FCD grundsätzlich querschnittsbezogen.

Die aufbereiteten FCD umfassten 61,2 Millionen Fahrzeugmeldepunkte entlang von acht Untersuchungsstrecken mit 126 AQ über eine Gesamtlänge von 193,5 km. Im weiteren Verlauf der Datenaufbereitung stellte sich heraus, dass die FG 1-, FG 3- und FG 4-Daten für zwei der acht Untersuchungsstrecken in einer Form geliefert wurden, dass sie für den vorgesehenen Untersuchungszweck nicht brauchbar waren. Daher wurden die entsprechenden Strecken nachträglich aus dem Untersuchungskollektiv entfernt. Insgesamt wurden 43,8 Millionen Fahrzeugmeldepunkte entlang von sechs Untersuchungsstrecken mit 93 AQ auf einer Gesamtlänge von 129,2 km ausgewertet. Jeder Fahrzeugmeldepunkt enthält die in Tabelle 4-1 dargestellten Informationen.

Zur Aufbereitung der FCD wurden alle Zeitstempel auf ganze Minuten abgerundet. Auf diese Weise konnten die FCD durch die Kombination aus dem Meldezeitpunkt in Minuten eines Jahres und der räumlichen Position der Meldung neu indexiert werden, um im späteren Verlauf eine Datenfusion mit den auf die gleiche Weise indexierten Schalt-, Umfeld- und MQ-Daten zu ermöglichen.

Nr.	Kürzel	Bezeichnung	Datentyp	Beschreibung	Beispiel-inhalt
01	index	Index	integer	Numerisch fortlaufender Index	1
02	rel_id	Relation ID	integer	Enthält die numerische Information über die Untersuchungsstrecke, auf der ein Fahrzeug gemeldet hat.	8
03	time-stamp_ger	Zeitstempel	string bzw. datetime [YYYY-MM-DD hh:mm:ss]	Zeitpunkt der Meldung eines Fahrzeuges	2019-07-03 14:26:39
04	fcd_meter	Meter	float	Ort des Fahrzeuges als Abstand vom Beginn der Untersuchungsstrecke in [m]	2189,326
05	fztyp	Fahrzeugtyp	string	Fahrzeugtyp differenziert nach Pkw und Lkw	Pkw
06	velocity	Geschwindigkeit	integer	Ganzzahlige Geschwindigkeit des Fahrzeuges zum Meldezeitpunkt in [km/h]	107

Tabelle 4-1: Informationen aus den FCD-Fahrzeugmeldungen

4.1.3 Definition von AQ-Abschnitten und Knotenpunktbereichen

Ein AQ-Abschnitt wird hier definiert als die Strecke zwischen einem Eintritts-AQ und einem Austritts-AQ, welcher wiederum den Eintritts-AQ des folgenden AQ-Abschnitts darstellt. Der Verkehr auf einem AQ-Abschnitt wird größtenteils durch das Schaltbild des Eintritts-AQ am

Beginn des AQ-Abschnitts beeinflusst. Für die Fusion der FCD mit den Schaltdaten wurde dem Beginn und dem Ende der Kilometrierung jedes AQ-Abschnitts die Bezeichnung und der Betriebskilometer (Bkm) des Eintritts-AQ und des Austritts-AQ zugeordnet. Außerdem wurde jedem Eintritts-AQ der zugehörige MQ sowie dessen Kilometrierung und die metrische Distanz zwischen AQ und MQ zugeordnet. Im selben Arbeitsschritt erfolgte auch die Übersetzung der Metrierungsangaben aus FCD ausgehend vom Beginn der Untersuchungsstrecke in die Betriebskilometrierung der Autobahnen. Ein Beispiel des aufbereiteten Ergebnisdatensatzes ist in Tabelle 4-2 enthalten.

rel _id	AQ	Bkm_ von	Bkm_ bis	Auf _ Ab	AQ_ nachf	MQ	MQ_ Bkm	dist_ AQ_MQ [m]
1	A44_1224	122,4	124,6	1	A44_1246	MQ_1224	122,4	9
1	A44_1246	124,6	126,6	1	A44_1266	MQ_1246	124,6	6
1	A44_1266	126,6	128,6	1	A44_1287	MQ_1266	126,6	8
1	A44_1287	128,6	129,9	1	A44_1299	MQ_1287	128,7	15
1	A44_1299	129,9	131,5	1	A44_1315	MQ_1299	129,9	9
1	A44_1315	131,5	132,4	1	A44_1324	MQ_1315	131,5	15

Tabelle 4-2: Beispieldatensatz für die Zuordnung von Bkm-Abschnitten zu den beeinflussenden AQ

Der Datensatz der AQ-Abschnitte wurde weiterhin ergänzt um die Bezeichnung, den Typ und die Lage (Mittelpunkt) von Knotenpunkten, welche sich im AQ-Abschnitt befinden, sowie um den Einflussbereich der Knotenpunkte im AQ-Abschnitt. Dieser (Mindest-)Einflussbereich wird dabei definiert als die Strecke zwischen dem Beginn des Ausfädelungsstreifens der Ausfahrt und dem Ende des Einfädelungsstreifens der Einfahrt. Somit ist es auch möglich, dass sich der Einflussbereich eines Knotenpunktes innerhalb eines AQ-Abschnittes befindet, obwohl der Mittelpunkt des Knotenpunktes außerhalb des AQ-Abschnittes liegt.

Ein Beispiel der Zuordnung von Knotenpunktbereichen enthält Tabelle 4-3.

rel_ id	AQ	NK	NK_ Typ	NKB1_ von [km]	NK1_ mitte [km]	NKB1_ bis [km]	dist_AQ_ NKBvon [m]	dist_AQ_ NKBbis [m]
1	A44_1224							
1	A44_1246							
1	A44_1266	Werl-Süd	AS	127,55	128,00	128,24	958	1648
1	A44_1287							
1	A44_1299	Kreuz Werl	AK	130,03	130,76	131,42	149	1539
1	A44_1315							

Tabelle 4-3: Beispieldatensatz für die Zuordnung von Knotenpunktbereichen zu den beeinflussenden AQ (NKB = Netzknotenbereich)

4.1.4 MQ-Daten

Die makroskopische Analyse des Verkehrsablaufs erfolgte anhand von lokalen Verkehrsdaten von SBA-MQ. Diese Daten der FG 1 nach den TLS (2012) – nachfolgend als „MQ-Daten“ be-

zeichnet – lagen in 1-Minuten-Intervallen vor und unterscheiden sich je nach Bundesland hinsichtlich des Formats und der Bezeichnung der Daten, setzen sich jedoch im Wesentlichen aus den in Tabelle 4-4 dargestellten Informationen zusammen.

Nr.	Kürzel	Bezeichnung	Datentyp	Beschreibung	Beispielinhalt
01	DE	Daten-Endgeräte-Kanal	string	Kennung des Daten-Endgeräte-Kanals zur Zuordnung der einzelnen Fahrstreifen	DE 34
02	Tag	Zeitstempel (Tag)	string [D.M.YYYY]	Tag der Datenerfassung	3.7.2019
03	Zeit	Zeitstempel (Uhrzeit)	string [hh:mm]	Uhrzeit der Datenerfassung	14:26
04	qPkw1,…,n	Anzahl Pkw	integer	Anzahl der in der Minute erfassten Pkw für jeden Fahrstreifen	7
05	qLkw1,…,n	Anzahl Lkw	integer	Anzahl der in der Minute erfassten Lkw für jeden Fahrstreifen	2
06	qKfz1,…,n	Anzahl Kfz	integer	Anzahl der in der Minute erfassten Kfz für jeden Fahrstreifen	9
07	vPkw1,…,n	Pkw-Geschwindigkeit	double	Mittlere Pkw-Geschwindigkeit des 1-Minuten-Intervalls in [km/h] für jeden Fahrstreifen	113,48
08	vLkw1,…,n	Lkw-Geschwindigkeit	double	Mittlere Lkw-Geschwindigkeit des 1-Minuten-Intervalls in [km/h] für jeden Fahrstreifen	91,77

Tabelle 4-4: Informationen aus den MQ-Daten

Im Rahmen der Aufbereitung der MQ-Daten wurde die Verkehrsstärke für jedes 1-Minuten-Intervall von [Fz/min] in [Fz/h] umgerechnet. Zudem wurde mithilfe der Pkw- und Lkw-Verkehrsstärken sowie der mittleren Pkw- und Lkw-Geschwindigkeiten die mittlere Kfz-Geschwindigkeit für jedes 1-Minuten-Intervall berechnet und im Datensatz ergänzt.

Die Auswertung erfolgte je nach Untersuchungszweck anhand von aggregierten Daten in 1-Minuten- oder 5-Minuten-Intervallen.

4.1.5 Schaltdaten

Mithilfe der „Funktionsgruppe WVZ/Wechselzeichengeber“ (FG 4) nach den TLS (2012) werden im SBA-Betrieb die angezeigten WVZ und -texte gesteuert und aufgezeichnet. Die Daten der FG 4 – nachfolgend als „Schaltdaten“ bezeichnet – enthalten entsprechend Informationen über die Schaltvorgänge an einer SBA und wurden für jede Strecke und jeden Anzeigequerschnitt separat erhoben. Anhand der Schaltdaten kann bestimmt werden, zu welchem Zeitpunkt an dem zum MQ zugehörigen AQ ein bestimmtes WVZ (A, B oder C) dargestellt wurde.

Die Schaltdaten enthalten in der Regel die in Tabelle 4-5 dargestellten Informationen. Die exakten Kodierungen und Bezeichnungen unterscheiden sich je nach Bundesland und sind in

Tabelle 4-5 bereits vereinheitlicht. Abbildung 4-1 bis Abbildung 4-3 zeigen schematisch die den Kürzeln zugehörigen Positionen der WVZ für drei verschiedene AQ-Typen.

Nr.	Kürzel	Bezeich-nung	Datentyp	Beschreibung	Beispiel-inhalt
01	AQ	AQ-Name	string	Name/Kennung des AQ, auf dem das Schaltbild angezeigt wurde.	A44/1184
02	Datum	Zeitstempel	string [DD.MM.YYYY hh:mm:ss]	Zeitpunkt eines Schaltvorganges	03.07.2019 14:26:03
03	A1,..,n	A-Zeichen	string	Zeicheninhalt A-Zeichen (z. B. Geschwindigkeitsbeschränkung), überkopf	120
04	A_li	A-Zeichen, links	string	Zeicheninhalt A-Zeichen auf Anzeigetafel links neben der Richtungsfahrbahn	120
05	A_re	A-Zeichen, rechts	string	Zeicheninhalt A-Zeichen auf Anzeigetafel rechts neben der Richtungsfahrbahn	120
06	B1,..,n–1	B-Zeichen	string	Zeicheninhalt B-Zeichen, überkopf	Z277
07	B_li	B-Zeichen, links	string	Zeicheninhalt B-Zeichen auf Anzeigetafel links neben der Richtungsfahrbahn	Z277
08	B_re	B-Zeichen, rechts	string	Zeicheninhalt B-Zeichen auf Anzeigetafel rechts neben der Richtungsfahrbahn	Z277
09	C1,..,n–1	C-Zeichen	string	Zeicheninhalt C-Zeichen	Stau
10	C_li	C-Zeichen, links	string	Zeicheninhalt C-Zeichen auf Anzeigetafel links neben der Richtungsfahrbahn	Stau
11	C_re	C-Zeichen, rechts	string	Zeicheninhalt C-Zeichen auf Anzeigetafel rechts neben der Richtungsfahrbahn	Stau
12	D1,..,n–1	D-Zeile	string	Inhalt Textzeile D	-

Tabelle 4-5: Informationen aus den Schaltdaten

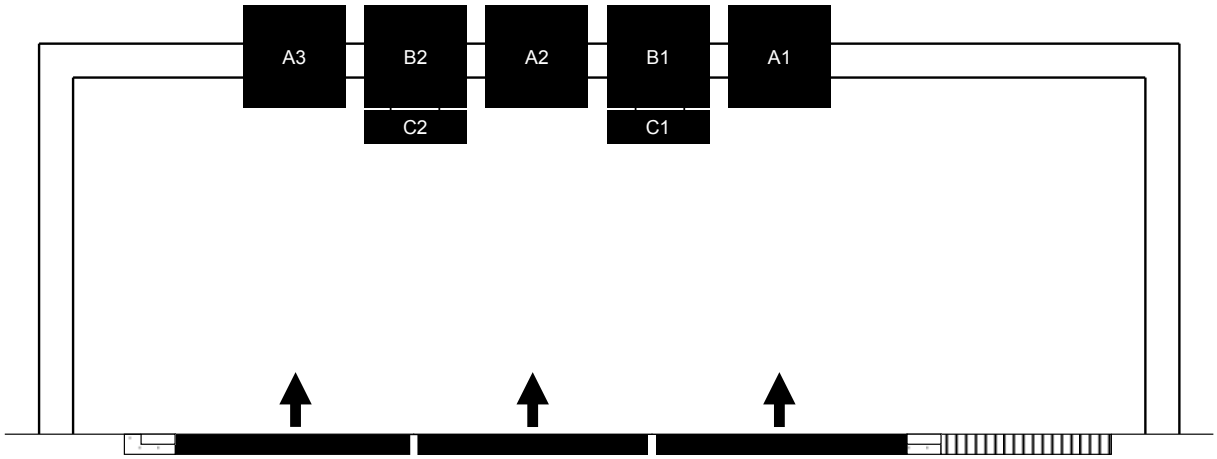


Abbildung 4-1: Schemadarstellung AQ-Variante 1: A-, B- und C-Zeichen überkopf

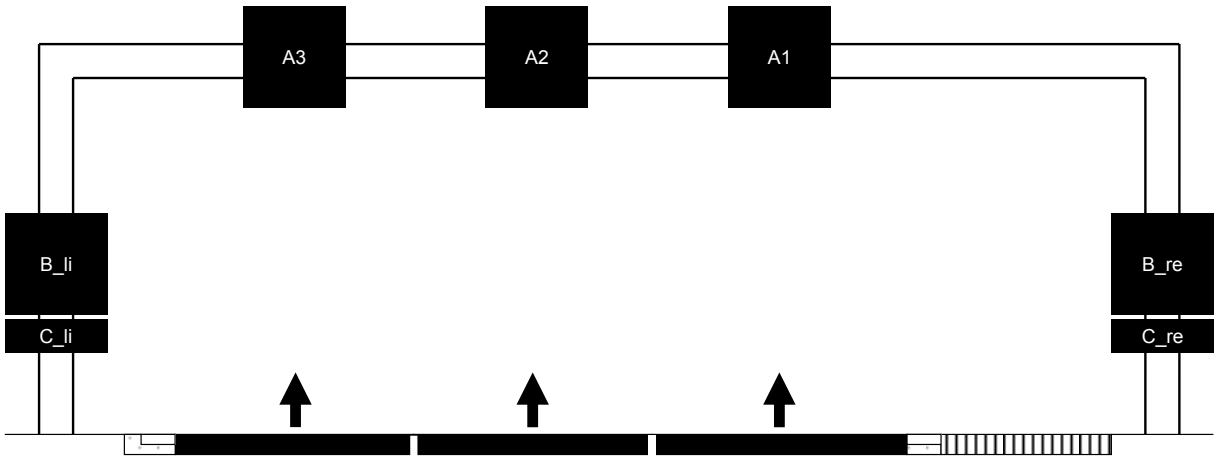


Abbildung 4-2: Schemadarstellung AQ-Variante 2: A-Zeichen überkopf, B- und C-Zeichen seitlich der Richtungsfahrbahn

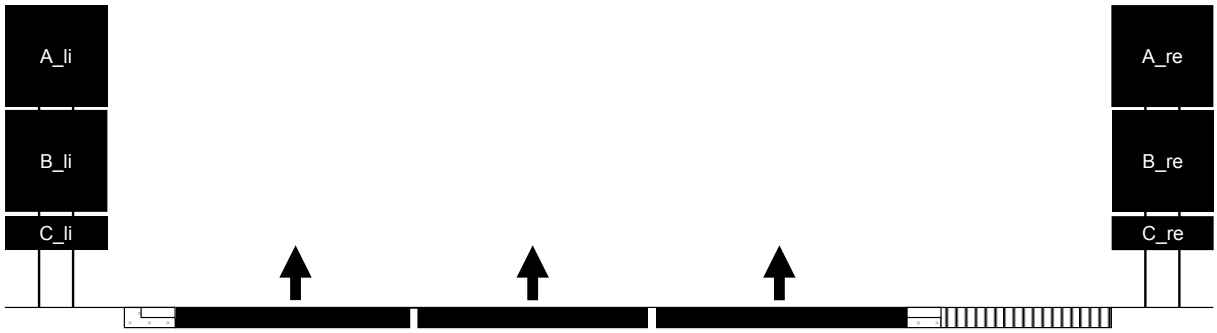


Abbildung 4-3: Schemadarstellung AQ-Variante 3: A-, B- und C-Zeichen seitlich der Richtungsfahrbahn

In den FG 4-Daten werden nur die Orte und Zeitpunkte der Schaltvorgänge erfasst und gespeichert. Die Anzahl der Attribute in den Daten gibt keine Auskunft über die Fahrstreifenanzahl am AQ. So kann ein Datensatz für einen zweistreifigen AQ auch das Attribut „A3“ enthalten.

Da an den Streckenstationen nur die jeweiligen Schaltvorgänge aufgezeichnet und in Datensätze geschrieben werden, wurde jeder Datenzeile des betrachteten Zeitraums (i. d. R. 1-Minuten-Intervalle des Jahres 2019) die Zeichenkombination entsprechend dem zuletzt dokumentierten Schaltvorgang zugewiesen. Für die Analyse der FCD, welche auf einer minuten-

genauen Auswertung der Daten basiert, wurden die Minuten, in denen ein Schaltvorgang stattgefunden hat und denen somit kein konstanter Schaltzustand zugeordnet werden kann, statt mit einer Zeichenkombination mit dem Vermerk „SchaltV“ versehen. Die Intervalle mit einem Schaltvorgang wurden in der späteren statistischen Auswertung ausgeschlossen.

Datenstandardisierung

Je nach Bundesland werden die Schaltdaten unterschiedlich aufbereitet und geliefert. Die Unterschiede betreffen die Art Datenspeicherung, das Datenformat sowie die Namensgebung für Attribute und Bezeichnung für Dateninhalte. Um auch für nicht-numerische Daten eine spätere Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen SBA zu gewährleisten, wurden sämtliche Einträge der Schaltdaten hinsichtlich ihrer Bezeichnung standardisiert. Eine Übersicht der Bezeichnungen ist in Tabelle 4-6 dargestellt.

Filterung von nicht-einheitlichen WVZ

Um Schaltungen aus der Auswertung auszuschließen, welche an verschiedenen Fahrstreifen jeweils voneinander abweichende Zeicheninhalte darstellten, wurden nur über den gesamten AQ einheitliche Zeichenkombinationen untersucht. Zu diesem Zweck wurden für jeden Schaltdatensatz drei neue Attribute „A_result“, „B_result“ und „C_result“ erstellt, welche nach dem in Abbildung 4-4 dargestellten Prinzip mit Werten gefüllt wurden. Da die Anzahl der A-Zeichen-Attribute in den Datensätzen nicht zwingend mit der Fahrstreifenanzahl am entsprechenden AQ übereinstimmt, muss der Datentyp jedes Attributs für alle Datenzeilen überprüft werden. Nur wenn z. B. ein Eintrag für ein A-Zeichen „NaN“ ist, also ein nicht zugewiesener Wert, kann davon ausgegangen werden, dass das entsprechende A-Zeichen am AQ nicht vorliegt.

Neben der Bestimmung der resultierenden Zeicheninhalte wurden auch die Zeicheninhalte der weniger häufigen AQ-Typen 2 und 3 („WVZ neben der Fahrbahn“, vgl. Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3) geprüft. Lagen die entsprechenden Attribute in einem Schaltdatensatz vor und enthielten diese links- und rechtsseitig der Fahrbahn identische Werte, dann wurde der Wert an das zugehörige resultierende Zeichen übergeben und gespeichert.

	Bezeichnung	Beschreibung	WVZ
A-Zeichen	-	Dunkelschaltung	
	DEFEKT	Dunkelschaltung als Folge eines technischen Defektes	
	120	Geschwindigkeitsbeschränkung (hier: „120 km/h“)	
	E120	Aufhebung der Geschwindigkeitsbeschränkung (hier: „Ende 120 km/h“)	
	FS_GESPERRT	Gesperrter Fahrstreifen	
	FS_FREI	Zur Benutzung freigegebener Fahrstreifen	
	PFEIL_L	Fahrstreifenwechsel nach links durchführen	
	PFEIL_R	Fahrstreifenwechsel nach rechts durchführen	
B-Zeichen	-	Dunkelschaltung	
	DEFEKT	Dunkelschaltung als Folge eines technischen Defektes	
	Z101	Gefahr	
	Z114	Schleudergefahr	
	Z123	Arbeitsstelle	
	Z124	Stau	
	Z277	Überholverbot für Kraftfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 3,5 t	
	Z281	Ende des Überholverbotes für Kraftfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 3,5 t	
	Z282	Ende sämtlicher Streckenverbote	
C-Zeichen	-	Dunkelschaltung	
	DEFEKT	Dunkelschaltung als Folge eines technischen Defektes	
	NEBEL		
	OELSPUR		
	PANNE		
	REIFENTEILE		
	SPERRUNG		
	UNFALL		

Tabelle 4-6: Standardisierte Bezeichnung und Darstellung der Zeicheninhalte aus Schaltdaten

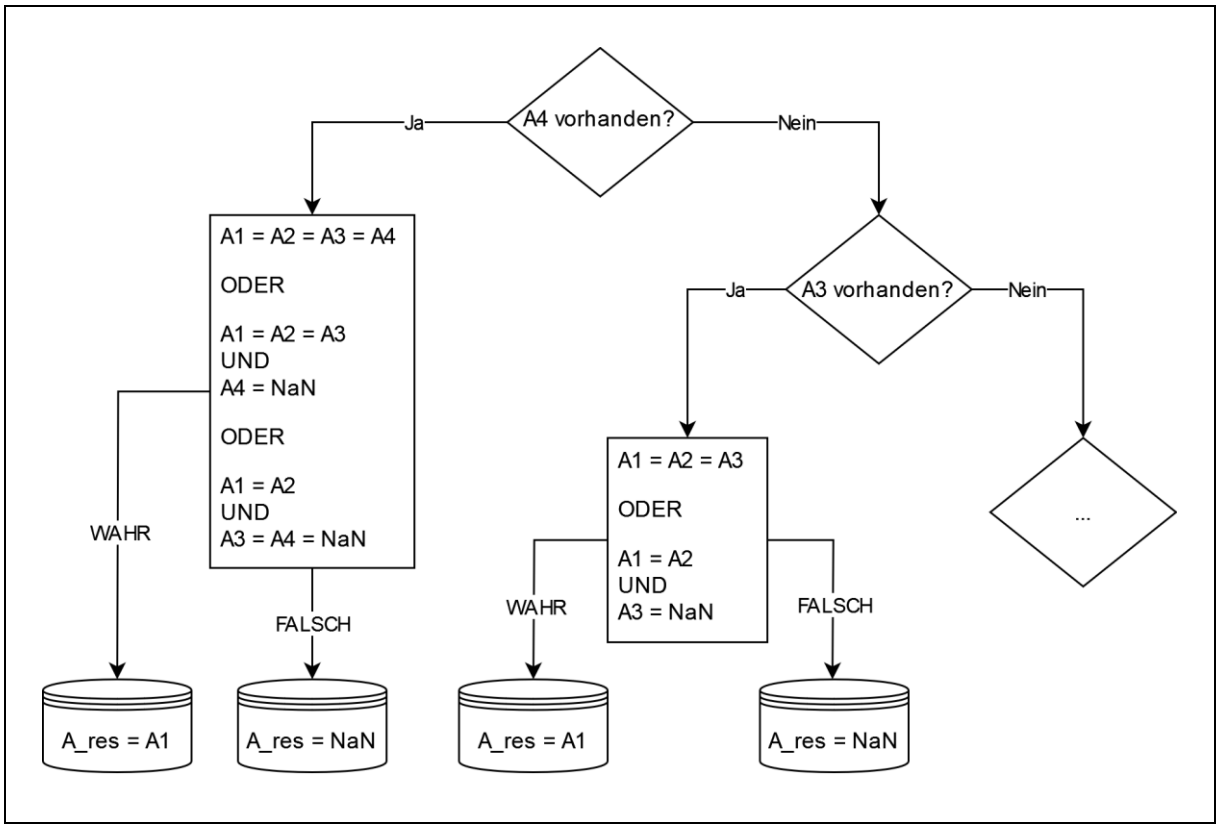


Abbildung 4-4: Aktivitätsdiagramm zur Ermittlung des resultierenden A-Zeicheninhalts (analog B- und C-Zeichen)

Zuordnung von Schaltbildern zu Schaltprogrammen

Im A-Zeichen angezeigte dynamische Geschwindigkeitsbeschränkungen können durch unterschiedliche Schaltprogramme ausgelöst werden. So kann eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 80 km/h in einem Fall Bestandteil eines Schaltprogrammes zur Harmonisierung des dichten Verkehrs und in einem anderen Fall Bestandteil eines Stautrichters im Zulauf zu einem Stauende sein. Bei der Aktivierung einer Harmonisierungsschaltung hat der Verkehrszustand in der Regel bereits die zur Auslösung erforderliche Dichte erreicht und die angezeigte Geschwindigkeitsbeschränkung kann verkehrsbedingt nur noch in einem begrenzten Ausmaß überschritten werden. Dagegen wird die Geschwindigkeitsbeschränkung als Bestandteil einer Stautrichterung stromabwärts ausgelöst, sodass mitunter am AQ der Trichterschaltung (noch) ein Verkehrszustand herrscht, der problemlos Geschwindigkeiten über der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkung erlaubt. Um die daraus resultierenden unterschiedlichen Voraussetzungen für die Befolgung einer dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkung statistisch separat auswerten zu können, erfolgte eine Zuordnung unterschiedlicher Schaltbilder zu einem der beiden Schaltprogramme „Harmonisierung“ und „Stauwarnung/Stautrichter“. Dazu wurde jeder Schaltzustand mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung im A-Zeichen gemeinsam mit dem zur gleichen Zeit angezeigten B-Zeichen betrachtet und das Schaltprogramm entsprechend der in Tabelle 4-7 dargestellten Übersicht zugeordnet. Einige Anlagen verwenden ein bestimmtes Schaltbild, welches auch bei niedrigen Verkehrsstärken als sogenannte Grundversorgung an einigen oder allen AQ der SBA angezeigt wird. Die Grundversorgung ist durch die alleinige Betrachtung des A- und B-Zeichens nicht von der Harmonisierungsschaltung zu unterscheiden, weshalb die Schaltbilder aus der Grundversorgung gemeinsam mit den

Schaltbildern aus Harmonisierungsschaltungen ausgewertet wurden. Da während der Grundversorgung aufgrund der geringen Verkehrsstärken nur wenige FCD generiert werden, kann von einem geringen Einfluss auf die statistischen Analyseergebnisse ausgegangen werden. Auf folgenden Untersuchungsstrecken waren im Analysezeitraum AQ mit einer Grundversorgung, die eine Geschwindigkeitsbeschränkung einschließt, in Betrieb:

- A 44, AS Soest – AK DO-Unna: „A-Zeichen: 100 km/h“ an 3 von 21 AQ
- A 57, AK Meerbusch – AK Moers: „A-Zeichen: 100 km/h“ an 5 von 11 AQ
- A 57, AK Moers – AK Meerbusch: „A-Zeichen: 100 km/h“ an 5 von 9 AQ

Im Regelfall wird bei einer Stautrichterung auf der ersten Trichterungsstufe (erster AQ stromaufwärts des Staus) die Zeichenkombination „60 km/h + Z124 – Stau“ und auf der zweiten Trichterungsstufe – je nach Streckenverlauf und Lage der AQ – „80 km/h + Z124 – Stau“ oder „100 km/h + Z124 – Stau“ angezeigt. Die Stautrichterung ist individuell durch die Verkehrszentralen parametrierbar und daher nicht einheitlich. Als Ergebnis von unterschiedlichen Schaltstrategien werden an einigen SBA die Schaltkombinationen „80/100/120 km/h + Z101 – Gefahr“ als zweite und/oder dritte Trichterungsstufe angezeigt. Da bei der Anzeige eines Gefahrenzeichens im B-Zeichen das auslösende Schaltprogramm mithilfe der vorliegenden Daten nicht eindeutig bestimmt werden konnte, erfolgte ein Ausschluss der entsprechenden Schaltbilder von der Auswertung genauso wie für alle nicht in Tabelle 4-7 dargestellten Schaltbilder. Aufgrund von komplexen SBA-internen Prozessen zur Schaltbildermittlung wie Quer- und Längsabgleich, Priorisierung sowie je nach Verkehrszentrale unterschiedlichen Konfigurationen konnte im Rahmen der Untersuchung nicht zwischen einem Haupttrichter (wo der Haupt-AQ von der Maßnahme getroffen wird) und einem Vor- oder Nachtrichter (stromauf- bzw. –abwärts des Haupt-AQ, an dem die Maßnahme beginnt) unterschieden werden.

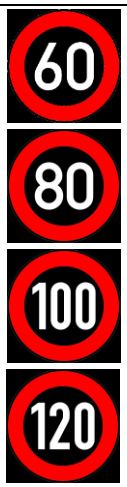
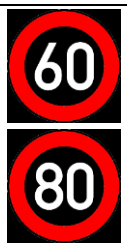
A-Zeichen	A-Zeichen (Piktogramm)	B-Zeichen	B-Zeichen (Piktogramm)	Schaltprogramm
Geschwindigkeits-beschränkung 60/80/100/120 km/h		- (Dunkelschal-tung)		Harmonisierung
		Zeichen 277 „Lkw-Überhol-verbot“		Harmonisierung
		Zeichen 281 „Ende des Lkw-Überholverbots“		Harmonisierung
Geschwindigkeits-beschränkung 60/80 km/h		Zeichen 124 „Stau“		Stauwarnung / Stautrichterung

Tabelle 4-7: Ausgewertete Zeichenkombinationen mit Zuordnung zum Schaltprogramm

Zuordnung der Schaltdaten zu den FCD

Da eine performante Fusion mit anderen, zeitlich aufgelösten (1-Minuten-) Daten nur über den entsprechend übereinstimmenden Zeitwert geschehen kann, wurde jedem AQ für jede Minute des betrachteten Jahres ein entsprechender Schaltzustand zugewiesen. Der Schaltzustand jeder Minute entspricht dabei immer dem Schaltbild oder dem Dateninhalt nach dem zeitlich vorausgegangenen Schaltvorgang. Die Minute, in der ein Schaltvorgang stattgefunden hat, wird als solche gekennzeichnet, indem jedes Attribut der Minute mit dem Inhalt „SchaltV“ versehen wird. Dieses Vorgehen hat mehrere Vorteile:

- Die Schaltvorgänge können während der Analyse problemlos quantifiziert werden.
- Die Minuten, in denen verschiedene Schaltbilder angezeigt wurden, können von der statistischen Analyse ausgeschlossen werden.
- Die auf diese Weise ausgeschlossenen 1-Minuten-Intervalle bilden einen gewissen zeitlichen Puffer (im Mittel 30 s) für die folgenden 1-Minuten-Intervalle, in denen ein neuer Schaltzustand von nahenden, den AQ passierenden Fahrzeugen nicht mehr gesehen oder gerade noch gesehen, jedoch nicht mehr befolgt wird.

Die Schaltdatenaufbereitung erfolgte für alle 93 AQ und lieferte im Ergebnis die Schaltzustände für jedes der 525.600 1-Minuten-Intervalle im Jahr 2019. Ein Beispiel für den Ergebnisdatensatz ist für den AQ A44_1335 an der A 44 in Tabelle 4-8 dargestellt.

Datum	AQ	A 1	A 2	B 1	C 1
11.03.2019 15:30	A44_1335	100	100	-	-
11.03.2019 15:31	A44_1335	100	100	-	-
11.03.2019 15:32	A44_1335	100	100	-	-
11.03.2019 15:33	A44_1335	100	100	-	-
11.03.2019 15:34	A44_1335	100	100	-	-
11.03.2019 15:35	A44_1335	100	100	-	-
11.03.2019 15:36	A44_1335	100	100	-	-
11.03.2019 15:37	A44_1335	SchaltV	SchaltV	SchaltV	SchaltV
11.03.2019 15:38	A44_1335	120	120	-	-
11.03.2019 15:39	A44_1335	120	120	-	-
11.03.2019 15:40	A44_1335	120	120	-	-
11.03.2019 15:41	A44_1335	SchaltV	SchaltV	SchaltV	SchaltV
11.03.2019 15:42	A44_1335	120	120	Z 277	-
11.03.2019 15:43	A44_1335	120	120	Z 277	-
11.03.2019 15:44	A44_1335	120	120	Z 277	-

Tabelle 4-8: 15-Minuten-Auszug aus einem Jahresdatensatz der aufbereiteten Schaltdaten des AQ A44_1335

Zuordnung der Schaltdaten zu den Daten aus der Luftbildanalyse

Die Analyse der Luftbilder beschränkte sich auf Zeiträume von ca. drei Stunden je Untersuchungsstrecke. Die kürzeren Betrachtungszeiträume erlaubten eine feinere Auflösung der Verkehrs- und Schaltdaten. Aus diesem Grund erfolgte die Aufbereitung der Schaltdaten für die Luftbildanalyse analog zur Aufbereitung für die FCD-Analyse, jedoch in sekundengenauer (statt minutengenauer) Auflösung.

4.1.6 Umfelddaten

Über die in den TLS (2012) definierte Umfelddatenerfassung im Rahmen der Funktionsgruppe 3 (FG 3) werden Umfelddaten an Messstellen entlang der SBA-Strecke i. d. R. zyklisch in 1-Minuten-Intervallen übertragen. Die erfassten Daten dienen u. a. als Grundlage für die Aktivierung von witterungsbedingten Schaltbildern. Die Umfelddatenerfassung und -speicherung umfasst eine Vielzahl von Informationen. Die im Rahmen der Untersuchung ausgewerteten Umfelddaten beschränken sich auf die in Tabelle 4-9 dargestellten Informationen. Die exakten Inhalte und Bezeichnungen unterscheiden sich je nach Bundesland. Umfelddaten zur Helligkeit und zur Sichtweite sowie weitere in den TLS aufgeführte Umfelddatenarten lagen für die Auswertung nicht vor.

Nr.	Kürzel	Bezeichnung	Datentyp	Beschreibung	Beispiel-inhalt
01	Datum	Zeitstempel	string [DD.MM.YYYY hh:mm:ss]	Zeitpunkt einer erfassten Zustandsänderung	03.07.2019 14:26:00
02	AQ	AQ-Name	string	Name des AQ, der durch die Umfelddatenerfassung beeinflusst wird.	A44/1184
03	NI	Nieder-schlagsintensi-tät	float	Niederschlagsmenge am den AQ beeinflussenden Umfelddatenmesspunkt in [mm/h]	1,2
04	NA	Niederschlags-art	string	Niederschlagsart an dem den AQ beeinflussenden Umfelddatenmesspunkt	Regen
05	WFD	Wasserfilmdi-cke	float	Dicke/Höhe des Wasserfil-mes in [mm]	0,03

Tabelle 4-9: Informationen aus den Umfelddaten

Da die Umfelddaten aus SBA in Hessen nur einen Monat lang vorgehalten werden, beschränkte sich die Analyse der Daten auf die SBA in NRW. Nach einer Qualitätsprüfung der Daten wurden weiterhin die Umfelddaten der SBA an der A 57 von der weiteren Analyse ausgeschlossen, wodurch sich die Analyse der Umfelddaten auf die Untersuchungsstrecke der A 44 zwischen der AS Soest und dem AK Dortmund-Unna beschränkte. Um die Witterung als Einflussgröße bei der Analyse der Befolgung von Geschwindigkeitsbeschränkungen über das gesamte Untersuchungskollektiv betrachten zu können, wurden minutengenaue Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) aus nahegelegenen Niederschlagsstationen beschafft und aufbereitet. In einem Vergleich mit den Umfelddaten der SBA an der Autobahn A 44 konnten jedoch weder für die Daten aus den Niederschlagsstationen noch für die modellbasierten Rasterdaten des DWD ausreichende Übereinstimmungen zu den Umfelddaten ermittelt werden. Es wird daher davon ausgegangen, dass die teils mehrere Kilometer von den Untersuchungsstrecken entfernten Niederschlagsstationen eine zu geringe räumliche Auflösung bieten, um die – für das Forschungsvorhaben erforderlichen – detaillierten Witterungskenngrößen für einzelne Strecken oder Streckenabschnitte liefern zu können.

Ähnlich der Archivierung der Schaltdaten werden im Rahmen der Umfelddatenarchivierung nur die erfassten Zustandsänderungen (z. B. Wechsel von „Niederschlag“ zu „kein Niederschlag“) für jede Messstation bzw. für jeden durch die Messstation beeinflussten AQ vorgehalten. Analog zur Datenaufbereitung der Schaltdaten (vgl. Kapitel 4.1.5) wurden daher jedem AQ für jede Minute des betrachteten Jahres alle in der entsprechenden Minute gültigen Umfeldeigenschaften zugewiesen. Die Umfeldeigenschaften einer Minute entsprechen dabei immer den Dateninhalten der zeitlich vorausgegangenen Erfassung einer Zustandsänderung. Für 1-Minuten-Intervalle, in denen eine Zustandsänderung erfasst wurde, werden die Umfeldeigenschaften nach der Zustandsänderung verwendet.

Die Umfelddatenaufbereitung enthält im Ergebnis die Umfeldeigenschaften für jedes der 525.600 1-Minuten-Intervalle im Jahr 2019. Ein Beispiel für den Ergebnisdatensatz für den AQ A44_1409 an der A 44 enthält Tabelle 4-10.

Datum	**AQ**	**NI [mm/h]**	**NA**
05.01.2019 02:50	A44_1409	0,0	kein Regen
05.01.2019 02:51	A44_1409	0,0	kein Regen
05.01.2019 02:52	A44_1409	0,0	Regen
05.01.2019 02:53	A44_1409	0,6	Regen
05.01.2019 02:54	A44_1409	0,6	Regen
05.01.2019 02:55	A44_1409	0,6	Regen
05.01.2019 02:56	A44_1409	1,8	Regen
05.01.2019 02:57	A44_1409	1,8	Regen
05.01.2019 02:58	A44_1409	0,6	Regen
05.01.2019 02:59	A44_1409	0,0	kein Regen

Tabelle 4-10: 10-Minuten-Auszug aus einem Jahresdatensatz der aufbereiteten Umfelddaten an dem AQ A44_1409

4.1.7 Längsneigungsdaten

Daten über die Längsneigung des Autobahnnetzes in Deutschland lagen dem Bearbeiter bereits aus früheren Forschungsprojekten vor und enthalten die mittlere Längsneigung an Autobahnabschnitten für i. d. R. 100 m lange Segmente (vgl. Abbildung 4-5). Die Zuordnung der Streckenlängsneigung zu einem FCD-Meldepunkt über die Betriebskilometrierung ist daher in den meisten Fällen hinreichend genau.

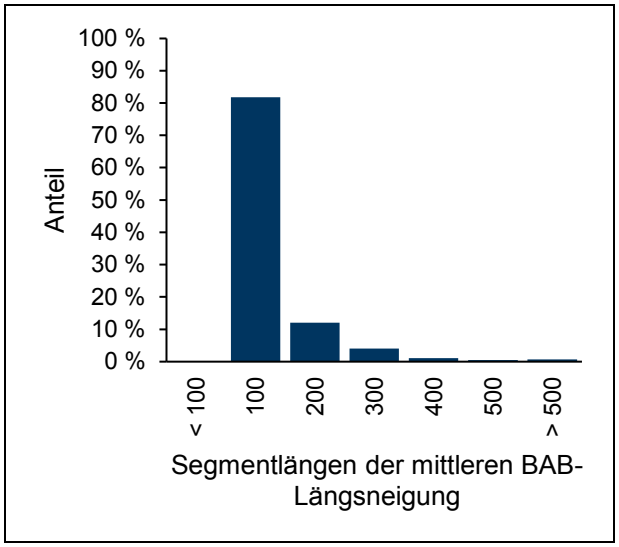


Abbildung 4-5: Segmentlängen der gemittelten BAB-Längsneigungsinformationen

4.1.8 Trajektoriendaten der Drohnenvideoaufnahmen

Für die Erzeugung von Trajektoriendaten wurden Luftbildvideos von bis zu fünf Drohnen mit sich überlappenden Aufnahmebildern im Zuge von SBA-Abschnitten für einen Zeitraum von mindestens 2 Stunden aufgenommen. Da die Videos einer Drohne mit einer Akkuladung für einen Zeitraum von ca. 15 min erfasst werden konnten (mit fliegendem Wechsel der Drohnen), wurden diese zu einem zeitlich zusammenhängenden Video zusammengeschnitten. Die Georeferenzierung der Luftbildausschnitte und die Erzeugung der Trajektoriendaten anhand der Videoaufnahmen erfolgte durch den Dienstleister DataFromSky. Die Genauigkeit der automatisierten Erfassung von Fahrzeugen bei Drohnenflügen bis zu einer Flughöhe von 500 Metern lag bei über 90 %.

Eine Roh-Fahrzeugtrajektorie verfügt über die folgenden Eigenschaften:

- ID des Fahrzeugs (fortlaufend durch die Auswertesoftware generiert),
- Fahrzeugtyp (mindestens 2+0),
- Zeitstempel pro Bild/Frame,
- zurückgelegte Distanz [m],
- momentane Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h],
- WGS-84 Koordinate [nach erfolgter Georeferenzierung des Videobilds],
- Tangentialbeschleunigung [m/s²],
- Longitudinalbeschleunigung [m/s²].

Die automatisch erfassten Fahrzeugtypen wurden anschließend einer manuellen Qualitätskontrolle unterzogen, da bei einer Flughöhe von 500 m eine exakte automatische Klassifizierung von Fahrzeugtypen nicht gewährleistet ist. Der Umfang der zu korrigierenden Fahrzeugtypen variierte je nach Untersuchungsstrecke zwischen 140 und 5.364 Trajektorienpfaden.

Die Roh-Trajektoriendaten enthalten alle Fahrzeuge, die im Bildausschnitt erfasst wurden. Dies ist problematisch, wenn neben der Untersuchungsstrecke weitere Straßen im Bildausschnitt verlaufen. Für die betroffenen Untersuchungsstrecken wurden die Trajektoriendaten in eine GIS-Software (QGIS) importiert. Alle Fahrten, die Datenpunkte außerhalb eines definierten Korridors um die Autobahn enthielten, wurden identifiziert und nachträglich aus dem Datensatz entfernt.

Nach der Bereinigung der Daten wurde anhand des Bewegungsprofils jeder ID die entsprechende Fahrtrichtung des Fahrzeuges ergänzt. Analog zur Aufbereitung der FCD erfolgte die Konvertierung der im Datensatz hinterlegten, zurückgelegten Strecke in die Betriebskilometer der Autobahn. Abschließend erfolgte eine Konvertierung des im Datensatz verwendeten Zeitstempels in ein „Datum-Uhrzeit“-Format entsprechend dem Aufnahmezeitpunkt des Videos. Im Zuge der Konvertierung wurden jeweils die Daten aus 0,033 s-Intervallen zu vollen Sekunden aggregiert, sodass ein Datensatz mit den in Tabelle 4-11 dargestellten Attributen für jede Untersuchungsstrecke erzeugt wurde.

Bezeichnung	Datentyp	Beschreibung	Beispielinhalt
ID	Long	Fahrzeug-ID	374
Zeitstempel _orig	Float	Zeitstempel aus dem Originaldatensatz	4,48
Zeitstempel	Datetime	Zeitstempel im [YYYY-MM-DD hh:mm:ss]-Format	2022-06-30 12:54:25
Tajectory_x [m]	Float	X-Koordinaten in WGS oder UTM pro Zeitintervall	500228,77
Tajectory_y [m]	Float	Y-Koordinaten in WGS oder UTM pro Zeitintervall	5610813,62
V_Kfz [km/h]	Float	Momentane Geschwindigkeit pro Zeitintervall	114,9142
Beschl_tan	Float	Tangentialbeschleunigung pro Zeitintervall	-0,2342
Beschl_lon	Float	Laterale Beschleunigung pro Zeitintervall	0,1982
Type	String	Fahrzeugklassifizierung (Lkw oder Pkw)	Car
Strecke_kum	Float	Kumulierte, zurückgelegte Strecke	663,02039
Bkm	Float	Betriebskilometer	418,004
FR	String	Fahrtrichtung	NO

Tabelle 4-11: Datenmodell der Trajektoriendaten

4.2 Datenweiterverarbeitung und -fusion

4.2.1 Zieldatensatz

Die empirische Analyse basiert auf den Auswertungen der FCD sowie der Trajektorien aus den Drohnenvideoaufnahmen. Diese Daten bilden als räumlich und zeitlich hochaufgelöste Verkehrsdaten die Grundlage für die spätere Analyse und Bewertung der SBA und werden um die Informationen aus den übrigen Basisdatensätzen (vgl. Kapitel 4.1) wie z. B. Schaltdaten ergänzt. Zudem werden die Daten um Informationen ergänzt, die sich ihrerseits aus der MQ-Datenanalyse ergeben. Die Gesamtheit aller im Rahmen des Arbeitsschrittes verbundenen Daten wird als Gesamtdatensatz bezeichnet und bildet die Grundlage für alle späteren statistischen Auswertungen (vgl. Kapitel 4.2.4).

4.2.2 Validierung der FCD-Geschwindigkeiten mit MQ-Daten

Da die FCD nur einen kleinen, meist einstelligen Prozentanteil des gesamten Fahrzeugkollektivs einer Strecke abdecken, wurde mithilfe der Geschwindigkeitsdaten von MQ überprüft, wie repräsentativ die Geschwindigkeiten für das Gesamtkollektiv sind. Tabelle 4-12 zeigt den Vergleich der Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (std) der Pkw-Geschwindigkeiten zwischen den Daten aus sämtlichen MQ entlang einer Untersuchungsstrecke und den entsprechenden FCD der Strecke, differenziert nach Untersuchungsstrecken und Schaltzustand. In Ihrer Gesamtheit liegt der Mittelwert der gemessenen Geschwindigkeiten aus FCD 1,5 % über dem Mittelwert der Geschwindigkeiten aus MQ-Daten. Die mittlere Standardabweichung der Pkw-Geschwindigkeiten aus den FCD ist erwartungsgemäß mehr als doppelt so groß wie

die mittlere Standardabweichung der mittleren Pkw-Geschwindigkeiten aus MQ, was auf die minutenweise Aggregation der mittleren Geschwindigkeiten in den MQ-Daten zurückzuführen ist. Bei Betrachtung der einzelnen Strecken fallen abweichende Mittelwerte zwischen FCD und MQ in beide Richtungen auf. Die größten Abweichungen der mittleren Pkw-Geschwindigkeiten wurden an der Untersuchungsstrecke der A 5 zwischen der AS Friedberg und dem AK Gambach gemessen (ID = 5). Hier liegt die mittlere Pkw-Geschwindigkeit aus FCD in der Gesamtheit um 15,5 km/h und damit 16,2 % über der mittleren Geschwindigkeit aus MQ.

	Strecken ID	1			4			5			6			Gesamt		
		MQ	FCD	Δ	MQ	FCD	Δ	MQ	FCD	Δ	MQ	FCD	Δ	MQ	FCD	Δ
Harmonisierungs-schaltung	n [Mio.]	3,32	2,47		0,74	0,88		0,98	1,11		0,38	0,35		5,42	7,34	
	mean	109,4	105,0	-4,4	106,8	108,7	1,8	106,5	116,6	10,1	121,2	118,6	-2,5	109,3	104,8	-4,5
	std	11,6	27,2	15,6	13,8	35,1	21,3	11,4	23,6	12,2	12,1	33,5	21,3	12,4	28,6	16,2
Stauwarnung	n [Mio.]	0,09	0,09		0,06	0,10		0,004	0,01		0,02	0,02		0,16	0,29	
	mean	90,1	78,3	-11,8	70,6	80,4	9,8	78,5	83,4	4,9	87,3	79,1	-8,1	82,7	78,9	-3,9
	std	19,4	39,8	20,4	25,3	47,0	21,7	25,2	52,1	26,9	23,8	52,4	28,6	24,0	42,2	18,2
Gesamtheit	n [Mio.]	10,51	5,96		9,99	8,51		8,94	7,25		8,94	4,60		6,53	31,26	
	mean	112,0	110,0	-2,0	100,1	105,0	5,0	95,6	111,1	15,5	126,9	126,1	-0,8	107,8	109,3	1,6
	std	30,8	30,1	-0,7	38,1	33,3	-4,8	39,5	28,4	-11,1	29,4	29,8	0,4	14,0	31,5	17,5

Tabelle 4-12: Vergleich der Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (std) von Pkw-Geschwindigkeiten zwischen Daten aus allen MQ entlang einer Strecke und den entsprechenden FCD der Strecke (Ganzjahresdaten aus 2019, alle Angaben in km/h)

4.2.3 Bewertung der Verkehrszustände (MQ-Daten)

Die Bewertung der Verkehrszustände erfolgte nach den Verkehrsstufen entsprechend dem MARZ (2018). Die Klassifizierungskriterien für die unterschiedlichen Verkehrsstufen sind in Tabelle 4-13 angegeben.

Mithilfe der MQ-Daten wurde für jedes 1-Minuten-Intervall des Jahres 2019 der Verkehrszustand ermittelt. Die minutengenauen Ergebnisse wurden anschließend mit den FCD und den Trajektorien verknüpft.

Verkehrsstufe		1 Fahrstreifen		2 Fahrstreifen		3 Fahrstreifen		4 Fahrstreifen	
		$V_{Kfz,g}$ [km/h]	$K_{Kfz,g}$ [Kfz/km]	$V_{Kfz,g}$ [km/h]	$K_{Kfz,g}$ [Kfz/km]	$V_{Kfz,g}$ [km/h]	$K_{Kfz,g}$ [Kfz/km]	$V_{Kfz,g}$ [km/h]	$K_{Kfz,g}$ [Kfz/km]
Z_1	Freier Verkehr	≥ 80	≥ 0 ≤ 20	≥ 80	≥ 0 ≤ 30	≥ 80	≥ 0 ≤ 40	≥ 80	≥ 0 ≤ 50
Z_2	Dichter Verkehr	≥ 80	> 20 ≤ 50	≥ 80	> 30 ≤ 60	≥ 80	> 40 ≤ 70	≥ 80	> 50 ≤ 80
Z_3	Zähfließen-der Verkehr	≥ 30 < 80	≤ 50	≥ 30 < 80	≤ 60	≥ 30 < 80	≤ 70	≥ 30 < 80	≤ 80
Z_4	Stau	< 30	> 50	< 30	> 60	< 30	>70	< 30	> 80

Tabelle 4-13: Zuordnung von Verkehrsstufen bei Erstversorgung nach dem MARZ (2018)

4.2.4 Datenfusion und FCD-Gesamtdatensatz

Im Rahmen der Datenaufbereitung wurde die metrische Verortung der FCD-Meldepunkte in die Betriebskilometrierung der Autobahn konvertiert (Kapitel 4.1.2). Parallel wurden AQ-Abschnitte entlang der Untersuchungsstrecke definiert, die jeweils am Betriebskilometer des Eintritts-AQ beginnen und am Betriebskilometer des Austritts-AQ enden (Kapitel 4.1.3). Durch einen Abgleich der FCD-Meldepunkte mit den Betriebskilometern der AQ-Abschnitte konnte jedem FCD-Meldepunkt der nächste, stromaufwärts gelegene AQ zugeordnet werden. Über den Abgleich der FCD-Meldepunkte mit den Schaltdaten der AQ konnte ergänzend der zum Zeitpunkt des Meldepunktes vorherrschende Schaltzustand am zuletzt durchfahrenen AQ ermittelt und den FCD zugeordnet werden.

Neben der Fusion der FCD mit den Schaltdaten erfolgte eine Fusion mit den übrigen, in den Kapiteln 4.1 und 4.2 beschriebenen Daten, wie z. B. den Längsneigungsinformationen oder dem Verkehrszustand nach dem MARZ (2018). Der Gesamtdatensatz der FCD-Analyse setzt sich aus sämtlichen FCD und allen fusionierten Daten zusammen. Der Datensatz umfasst 43,8 Mio. Datenzeilen und enthält die in Tabelle 4-14 angegebenen Informationen. Er bildete damit die wesentliche Grundlage für die statistischen Datenanalysen.

Nr.	Kürzel	Bezeichnung	Datentyp	Beschreibung	Beispielinhalt
01	index	Index	integer	Numerisch fortlaufender Index	1
02	rel_id	Relation ID	integer	Enthält die numerische Information über die Untersuchungsstrecke, auf der ein Fahrzeug gemeldet hat.	8
03	Date	Zeitstempel	Datetime	Zeitpunkt der Meldung eines Fahrzeuges im Format [YYYY-MM-DD hh:mm:ss]	2019-07-03 14:26:39
04	fztyp	Fahrzeugtyp	string	Fahrzeugtyp (Pkw oder Lkw)	Pkw
05	velocity	Geschwindigkeit	integer	Ganzzahlige Geschwindigkeit des Fahrzeuges zum Meldezeitpunkt in [km/h]	107
06	Bkm	Betriebskilometer	float	Ort des Fahrzeuges als Angabe in Autobahn-Betriebskilometer [km]	116.938
07	AQ	AQ-Name	string	Name des dem Meldepunkt vorangegangenen AQ	A44_1167
08	AQ_Bkm	AQ-Betriebskilometer	float	Autobahn-Betriebskilometer des dem Meldepunkt vorangegangenen AQ [km]	116.717
09	m_Fz-AQ	Abstand Fahrzeug-AQ	float	Abstand zwischen dem Meldepunkt des Fahrzeuges und dem vorangegangenen AQ [m]	221.8
10	AQ_nachf	AQ-Name	string	Name des dem Meldepunkt nachfolgenden AQ	A44_1184
11	AQ_nachf _Bkm	AQ-Betriebskilometer	float	Autobahn-Betriebskilometer des dem Meldepunkt nachfolgenden AQ [km]	118.389
12	m_Fz-AQnachf	Abstand Fahrzeug-AQ	float	Abstand zwischen dem Meldepunkt des Fahrzeuges und dem nachfolgenden AQ [m]	751.3
13	MQ	MQ-Name	String	Name des dem Meldepunkt vorangegangenen MQ	MQ_1184
14	MQ_Bkm	MQ-Betriebskilometer	Float	Autobahn-Betriebskilometer des dem Meldepunkt vorangegangenen MQ [km]	118.400
15	dist_AQ_MQ	Abstand AQ-MQ	integer	Distanz zwischen dem Meldepunkt vorangegangenen AQ und MQ [m]	11
16	NK	Netzknoten	string	Name des im AQ-Abschnitt liegenden Netzknotens/Knotenpunkts	Werl-Süd
17	NK_Typ	Netzknotentyp	string	Typ des im AQ-Abschnitt liegenden Netzknotens/Knotenpunkts: AK = Autobahnkreuz AD = Autobahndreieck AS = Anschlussstelle TR = Tank & Rastanlage PW = Park & Rastanlage	AS
18	NK_Bkm	Netzknoten-Betriebskilomenter	float	Autobahn-Betriebskilometer des im AQ-Abschnitt liegenden Netzknotens/Knotenpunkts (Knotenpunktmitte).	128.000
19	NK_Bkm_von	Netzknoten-Betriebskilomenter	float	Beginn des Ausfädelungsstreifens der Ausfahrt eines Netzknotens/Knotenpunkts	127.000
20	NK_Bkm_bis	Netzknoten-Betriebskilomenter	float	Ende des Einfädelungsstreifens der Einfahrt eines Netzknotens/Knotenpunkts	129.000
21, 22, 23	A1,..,n	A-Zeichen	string	Zeicheninhalt A-Zeichen (z. B. Geschwindigkeitsbeschränkung)	120
24	A_res	Resultierendes A-Zeichen	integer	Zeicheninhalt A-Zeichen über den gesamten Richtungsquerschnitt (nur Geschwindigkeitsbeschränkung)	120
25, 26	B1,..,n–1	B-Zeichen	string	Zeicheninhalt B-Zeichen	Z277
27	B_res	Resultierendes B-Zeichen	string	Zeicheninhalt B-Zeichen über den gesamten Richtungsquerschnitt	Z277
28, 29	C1,..,n–1	C-Zeichen	string	Zeicheninhalt C-Zeichen	Stau

30	C_res	Resultierendes C-Zeichen	string	Zeicheninhalt C-Zeichen über den gesamten Richtungsquerschnitt	Stau
31, 32	D1,..,n–1	D-Zeile	string	Inhalt Textzeile D	-
33	Schalt	Schaltprogramm	string	Dem Schaltbild zugeordnetes Schaltprogramm („Harmonisierung“ / „Stauwarnung“)	Harmo
34	NI	Niederschlagsintensität	string	Niederschlagsmenge am den AQ beeinflussenden Umfelddatenmesspunkt in [mm/h]	1,2 mm/h
35	NA	Niederschlagsart	string	Niederschlagsart an dem den AQ beeinflussenden Umfelddatenmesspunkt	Regen
36	MQ	MQ-Name	string	Name des dem AQ zugehörigen MQ	A44_1167
37	MARZ 18VS	Verkehrsstufe	Integer	Verkehrsstufe (1–4) nach dem MARZ 2018 am MQ	3
38	qPkw	Anzahl Pkw	integer	Anzahl der in der Minute erfassten Pkw am MQ	7
39	qLkw	Anzahl Lkw	integer	Anzahl der in der Minute erfassten Lkw am MQ	2
40	qKfz	Anzahl Kfz	integer	Anzahl der in der Minute erfassten Kfz am MQ	9
41	vPkw	Pkw-Geschwindigkeit	float	Mittlere Pkw-Geschwindigkeit des 1-Minuten-Intervalls in [km/h] am MQ	113,48
42	vLkw	Lkw-Geschwindigkeit	float	Mittlere Lkw-Geschwindigkeit des 1-Minuten-Intervalls in [km/h] am MQ	91,77
43	vKfz	Kfz-Geschwindigkeit	float	Mittlere Kfz-Geschwindigkeit des 1-Minuten-Intervalls in [km/h] am MQ	109,22
44	C	Kapazität	integer	Kapazität in [Fz/h] am MQ	3748
45	mittl_ln	Mittlere Längsneigung	float	Mittlere Längsneigung auf dem Streckenabschnitt des Meldepunktes in [%] (i. d. R. Mittelwerte über Teilstrecken mit einer Länge von 100–200 m)	1,58
46	nFS	Fahrstreifen	byte	Anzahl der Fahrstreifen im AQ-Abschnitt	2

Tabelle 4-14: Inhalte des Gesamtdatensatzes der FCD-Analyse

4.3 Methodik

4.3.1 Korrelationsanalyse

Mithilfe einer Korrelationsanalyse wurde der Zusammenhang zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit bzw. der Befolgung der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkungen und den Attributen

- ID der Untersuchungsstrecke
- Verkehrszustand nach dem MARZ (2018),
- Geschwindigkeitsbeschränkung aus A-Zeicheninhalt,
- Abstand vom Fahrzeug zum vorausgegangenen AQ,
- Abstand zwischen vorausgegangenem und nachfolgendem AQ
- Umfelddaten (für eine Untersuchungsstrecke),
- Längsneigung und
- Fahrstreifenanzahl

ermittelt, um systematische Zusammenhänge zwischen den Zielgrößen und den Attributen zu erfassen und zu quantifizieren. Die Analyse erfolgte grundsätzlich getrennt für Datenpunkte,

denen ein Schaltprogramm „Harmonisierung“ bzw. „Stauwarnung“ zugeordnet wurde (vgl. Kapitel 4.1.5). Der A-Zeicheninhalt (Geschwindigkeitsbeschränkung) wurde in einer ersten Auswertung als Variable berücksichtigt. In weiteren Auswertungen erfolgten mehrere Korrelationsanalysen getrennt nach angezeigter Geschwindigkeitsbeschränkung.

Datenpunkte, welche eine Unterschreitung von mehr als 10 km/h aufweisen, wurden aus der Untersuchung ausgeschlossen, da davon ausgegangen wird, dass Unterschreitungen um mehr als 10 km/h – insbesondere bei geringen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten – oft nicht mehr auf das Einhalten einer Geschwindigkeitsbeschränkung, sondern auf externe Einflüsse (z. B. Stauzustand) zurückzuführen sind.

Der Test auf Korrelation erfolgte nach Pearson und nach Spearman. Da es sich – mit Ausnahme des Verkehrszustandes nach dem MARZ (2018) und der Strecken-ID – um metrische Variablen handelt, wird jeweils das Ergebnis des Pearson-Tests dargestellt, während das Ergebnis des Spearman-Tests die Ergebnisse für den Fall einer Nichtnormalverteilung oder einer nichtlinearen Korrelation innerhalb der Attribute validiert.

Die Auswertung nach dem Abstand zwischen dem vorausgegangenen und nachfolgenden AQ erfolgte dreifach anhand der metergenauen Werte sowie anhand von gleich großen Ergebnisklassen. Die Klassengröße ergibt sich entsprechend der Verteilung der vorhandenen AQ-Abschnitte im Untersuchungskollektiv. Klassen mit drei oder weniger enthaltenen AQ-Abschnitten wurden aus der Untersuchung ausgeschlossen, sodass sich die beiden in Abbildung 4-6 dargestellten Analysebereiche ergaben.

Zur Beschreibung der Überschreitung und zur Bewertung der Befolgung von Geschwindigkeitsbeschränkungen werden die in Kapitel 4.3.2 erläuterten Begriffe verwendet.

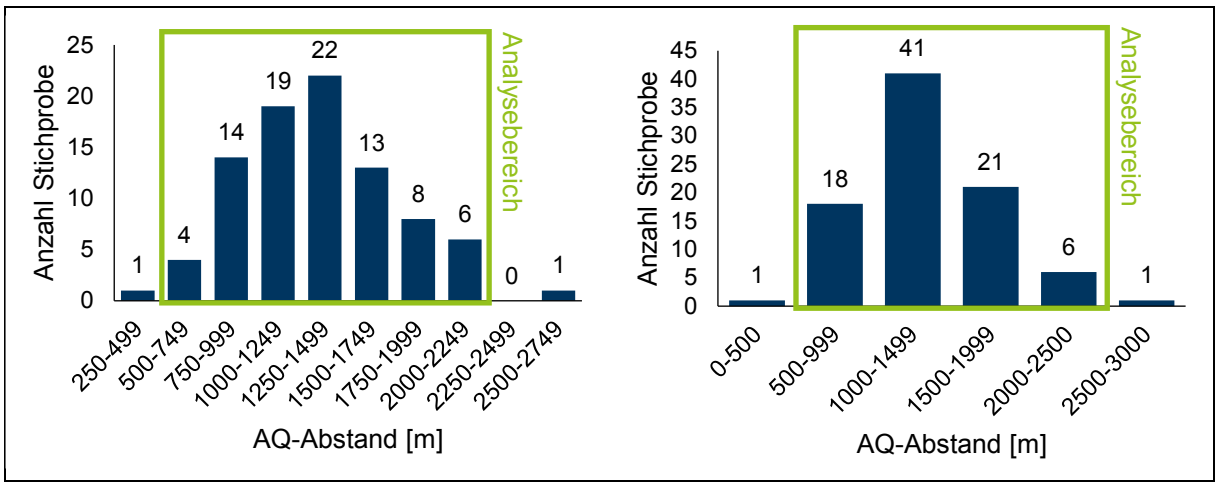


Abbildung 4-6: Anzahl der Klassen bei Einteilung der AQ-Abschnitte nach AQ-Abstand in 250 m- (links) und 500 m-Klassen (rechts)

4.3.2 Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens über die Distanz zwischen zwei AQ

Um den Einfluss der AQ-Lage bzw. -Abstände, der Längsneigung und der Knotenpunkte auf die gefahrenen Geschwindigkeiten sichtbar zu machen, erfolgte die Auswertung der FCD anhand der gemittelten, fahrzeugseitig gemeldeten Geschwindigkeiten räumlich differenziert in 100 m-Abschnitten entlang der Untersuchungsstrecken. Auf diese Weise konnte die mittlere Befolgung der AQ-Anzeigen in Abhängigkeit von der Entfernung zum zuletzt passierten AQ

bestimmt werden. Die Darstellung erfolgte mithilfe der für ein Beispiel in Abbildung 4-7 dargestellten, Boxplot-ähnlichen „Tube"-Diagramme, wobei die Mitte der Tube den Median, die erste farbig abgesetzte Schicht den Interquartilsabstand und die zweite farbig abgesetzte Schicht jeweils die v_{15}-Geschwindigkeit (15. Perzentil der Geschwindigkeitsverteilung) bzw. die v_{85}-Geschwindigkeit (85. Perzentil der Geschwindigkeitsverteilung) darstellen. Gleichzeitig erfolgte eine Überlagerung der Geschwindigkeitslagemaße mit den ggf. innerhalb der Strecke liegenden Knotenpunktbereichen.

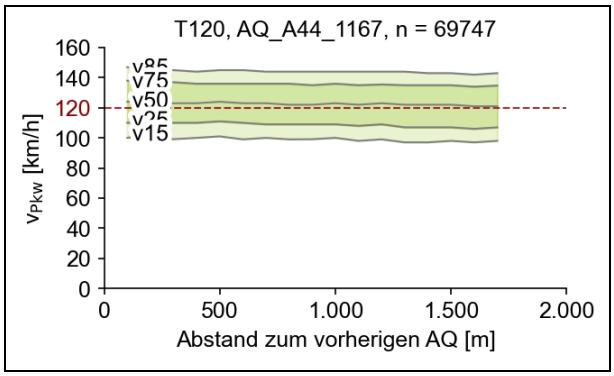


Abbildung 4-7: Beispieldarstellung eines Tube-Diagrammes zur kontinuierlichen Darstellung von Lagemaßen der Geschwindigkeitsverteilung

Als Kenngröße zur Analyse der Befolgung von Geschwindigkeitsbeschränkungen wurde die mittlere Pkw-Geschwindigkeit verwendet. Zur Klassifizierung der Über- oder Unterschreitung und zur Bewertung der Befolgung von Geschwindigkeitsbeschränkungen werden nachfolgend folgende Bezeichnungen in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der mittleren Pkw-Geschwindigkeit und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit verwendet:

- −5 bis −10 km/h: geringe Unterschreitung, sehr gute Befolgung
- bis zu ±5 km/h: Einhaltung, sehr gute Befolgung
- 5 bis 10 km/h: geringe Überschreitung, gute Befolgung
- 10 bis 20 km/h: moderate Überschreitung, moderate Befolgung
- 20 bis 30 km/h: deutliche Überschreitung, schlechte Befolgung
- über 30 km/h: sehr deutliche Überschreitung, sehr schlechte Befolgung

Bei Unterschreitungen um mehr als 10 km/h wird davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeitswahl – insbesondere bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 60 km/h und 80 km/h – nicht mehr mit dem Einhalten einer Geschwindigkeitsbeschränkung erklärt werden kann, sondern auf den Verkehrszustand, die Witterungsbedingungen oder andere externe Einflüsse zurückzuführen ist. Analog zum Vorgehen bei der Korrelationsanalyse wurde in diesen Fällen von einer Bewertung abgesehen.

4.3.3 Weg-Zeit-Analyse der Trajektoriendaten

Anhand der aufbereiteten Trajektoriendaten wurden Geschwindigkeitsprofile (Trajektorien) für jede Untersuchungsstrecke und jedes Fahrzeug mithilfe von Weg-Zeit-Diagrammen visualisiert. Die x-Achse kennzeichnet dabei die Uhrzeit am Erhebungstag, die y-Achse den Ort entlang der Untersuchungsstrecke und die Farbgebung der Trajektorie als virtuelle z-Achse die

an der entsprechenden Weg-Zeit-Koordinate von einem Fahrzeug gefahrene Geschwindigkeit.

Für jeden im Untersuchungsausschnitt vorhandenen AQ wurden die Schaltvorgänge sekundengenau ermittelt und grafisch in die Weg-Zeit-Diagramme integriert. Die visuelle Kombination von Fahrzeugtrajektorien und -geschwindigkeiten sowie den zur entsprechenden Zeit angezeigten Schaltbildern ermöglichte eine qualitative Beurteilung des Fahrverhaltens in unterschiedlichen Schaltszenarien und eine Validierung der FCD-basierten Analysen.

4.4 Ergebnisse

4.4.1 Schaltdaten

Im Ergebnis der Auswertung der Schaltdaten enthält Tabelle 4-15 eine Gesamtbetrachtung der durchschnittlichen Zeitanteile der an den 93 untersuchten AQ im Jahr 2019 angezeigten Zeichenkombinationen. Demnach wurde in durchschnittlich 44,1 % der Zeit des Jahres mindestens ein Schaltzeichen angezeigt. In durchschnittlich 2,3 % der Zeit fiel der AQ wegen eines technischen Defektes aus oder wurde bewusst abgeschaltet. Das bei aktiver AQ-Anzeige am häufigsten dargestellte Schaltbild am WVZ A war mit durchschnittlich 34,5 % die Geschwindigkeitsbeschränkung auf 100 km/h. Am WVZ B wurde im Fall eines aktiven AQs meist das Zeichen 277 „Lkw-Überholverbot“ geschaltet. Das WVZ C war in 92,5–99,5 % der Zeit ausgeschaltet. War das Zeichen aktiv, wurde meist die „NEBEL“-Warnung angezeigt. Die am häufigsten gezeigten Schaltkombinationen aus WVZ A und WVZ B waren:

- 100 km/h ohne Zusatzzeichen (18,7 %),
- 100 km/h + Z 277 (13,4 %) und
- 120 km/h + Z 277 (11,5 %).

Insgesamt wurden 57,0 % der wenigstens eine Minute lang aktiven Schaltbilder durch das „Harmonisierungsprogramm“ ausgelöst, 9,5 % durch das „Lkw-Überholverbot“ (Tabelle 4-16).

Bei Betrachtung der einzelnen AQ (Abbildung 4-8) fallen kaum Besonderheiten auf. Die Grundversorgung unterscheidet sich je nach SBA-Strecke. Während etwa an der A 57 meist 100 km/h-Kombinationen geschaltet wurden, waren entlang der Untersuchungsstrecke der A 44 häufiger 120 km/h-Kombinationen aktiv.

A-Zeichen	Anteil	nMin	B-Zeichen	Anteil	Minuten
T100	34,5 %	7.030.320	-	18,7 %	3.804.271
			Z101	0,3 %	62.826
			Z114	1,3 %	269.562
			Z123	0,2 %	35.244
			Z277	13,4 %	2.723.501
			Z281	0,7 %	134.916
T120	20,5 %	4.183.239	-	8,3 %	1.686.939
			T281	0,5 %	92.649
			Z101	0,1 %	24.124
			Z123	0,2 %	44.720
			Z277	11,5 %	2.334.807
-	17,5 %	3.574.044	Z124	2,4 %	487.596
			Z277	8,9 %	1.811.426
			Z281	2,8 %	560.514
			Z282	3,5 %	714.508
Schaltvorgang	16,0 %	3.260.002	Schaltvorgang	16,0 %	3.260.002
T80	6,1 %	1.250.218	-	0,8 %	171.440
			Z101	0,3 %	60.265
			Z114	0,8 %	156.986
			Z123	1,5 %	309.783
			Z124	0,4 %	74.589
			Z277	2,1 %	436.324
			Z281	0,2 %	40.831
E100	1,6 %	322.014	-	1,5 %	296.015
			Z277	0,1 %	25.999
T60	1,5 %	296.702	Z123	0,1 %	20.429
			Z124	1,0 %	205.496
			Z277	0,3 %	70.777
E120	1,0 %	200.761	-	0,6 %	112.701
			Z277	0,4 %	88.060
Unbekannt	0,6 %	120.635	Unbekannt	0,6 %	120.635
Temposplit	0,2 %	46.703	-	0,1 %	21.326
			Z277	0,1 %	25.377

Tabelle 4-15: Mittlere Zeitanteile der dargestellten WVZ-Inhalte an den 93 untersuchten AQ (ab einem Anteil von 0,1 %)

Schaltprogramm	Anteil
Harmonisierung	57,0 %
Schaltvorgang	16,0 %
Lkw-Überholverbot	9,5 %
Aufhebung einer Streckenbeschränkung	6,3 %
Stauwarnung	3,8 %
Nässe / Schleudergefahr	2,2 %
Baustelle	2,1 %
Sonstige	1,5 %
Gefahrenwarnung	0,8 %
Unbekannt	0,6 %
Temposplit	0,2 %

Tabelle 4-16: Anteile der dargestellten WVZ-Inhalte an den 93 untersuchten AQ nach Schaltprogramm

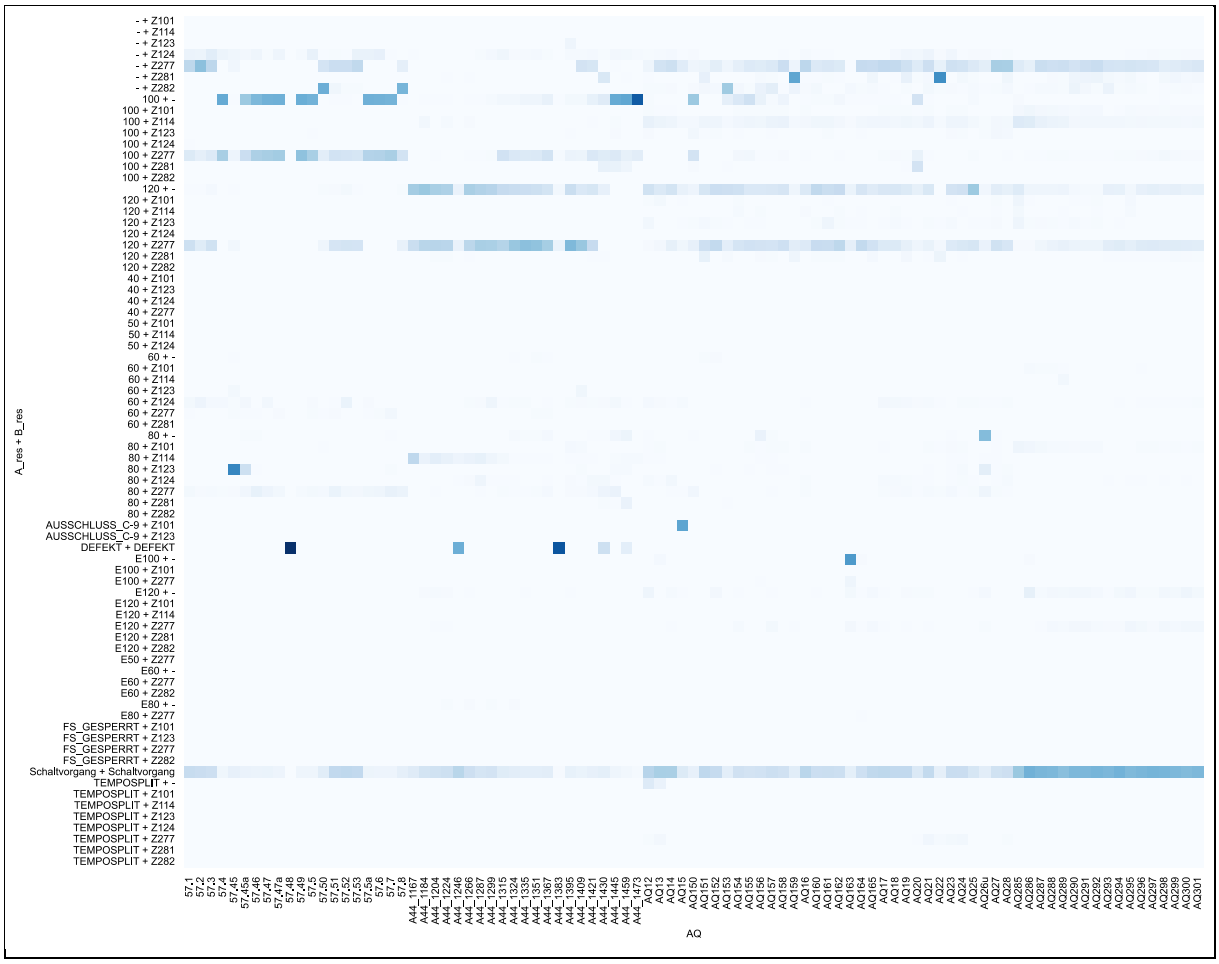


Abbildung 4-8: Anteile der dargestellten WVZ-Inhalte nach AQ (dunkelblau ≙ 100 %)

4.4.2 Korrelationsanalyse

Mit dem Ausschluss von potenziell witterungsbedingten Schaltbildern (vgl. Kapitel 4.1.5) beschränkte sich die Berücksichtigung der Umfelddaten im Rahmen der Korrelationsanalyse auf den überprüfbaren Einfluss von Niederschlagsintensitäten auf das Geschwindigkeitsverhalten während Harmonisierungs- und Stauwarnungsschaltungen. Die Interpretation der Ergebnisse gestaltete sich jedoch insofern schwierig, als etwa detektierte Nässe im Rahmen der Schaltbildpriorisierung zur Anzeige eines Z. 114 – „Schleudergefahr“ im B-Zeichen führt. Da die Schaltbilddifferenzierung ausschließlich anhand des B-Zeichens erfolgt, kann somit nicht eindeutig zwischen einer Harmonisierungsschaltung mit nässebedingter Schleudergefahr und einer reinen Nässe-Schaltung mit Geschwindigkeitsbeschränkung differenziert werden. Hinzu kommt, dass nur für eine von sechs Untersuchungsstrecken Umfelddaten in auswertbarer Form vorlagen, weshalb keine Rückschlüsse auf den Einfluss von umfeldbedingten Schaltungen auf das Fahrverhalten des Gesamtkollektivs gezogen werden konnten. Aus den genannten Gründen wurden die Umfelddaten als Einflussfaktor aus der Korrelationsanalyse ausgeschlossen.

Die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse beziehen sich auf die Korrelationsanalyse mit dem A-Zeicheninhalt als berücksichtigte Variable. Ergänzend dazu wurde die Korrelationsana-

lyse separat für alle im A-Zeichen angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkungen durchgeführt (siehe Anhang). Die separaten Analysen ergaben keine nennenswert abweichenden Ergebnisse.

Harmonisierungsschaltungen

Abbildung 4-9 zeigt das Ergebnis der Korrelationsanalyse der FCD-Geschwindigkeiten für die Harmonisierungsschaltungen. Erwartungsgemäß konnte eine hohe Korrelation zwischen den gefahrenen Geschwindigkeiten und der Höhe der Überschreitung von Geschwindigkeitsbeschränkungen, unabhängig von der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkung, ermittelt werden. Überdies ist eine leichte, negative Korrelation zwischen der Höhe der angezeigten zulässigen Höchstgeschwindigkeit und der Höhe der Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit erkennbar. Dies bedeutet, dass höhere angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeiten besser befolgt werden als niedrige zulässige Höchstgeschwindigkeiten.

Für die Wahl der Pkw-Geschwindigkeit und für die Befolgung der Geschwindigkeitsbeschränkung konnte keine Korrelation mit dem AQ-Abstand oder den AQ-Abstandsklassen in 250-m- bzw. 500-m-Schritten nachgewiesen werden. Außerdem wurde nahezu keine Korrelation mit dem Abstand eines Fahrzeuges zum zuletzt passierten AQ ermittelt.

Erkennbar sind die Korrelationen zwischen den gefahrenen Pkw-Geschwindigkeiten und der Strecken-ID und der Fahrstreifenanzahl sowie die erwartbare negative Korrelation zur Verkehrsstufe nach dem MARZ (2018). Für keine dieser Einflussfaktoren konnte jedoch eine nennenswerte Korrelation zur Befolgung der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkung ermittelt werden. Über alle auswertbaren ca. 4,8 Mio. FCD-Meldepunkte liegt die mittlere Geschwindigkeit bei ca. 118,5 km/h bei einer Standardabweichung von 18,6 km/h. Die mittlere Überschreitung angezeigter Geschwindigkeitsbeschränkungen während Harmonisierungsschaltungen beträgt 10,5 km/h bei einer Standardabweichung von 15,1 km/h.

Korrelationskoeffizienten nach Pearson, Harmonisierung, nFCD=4.795.366

	Strecken-ID	Fahrstreifenanzahl	MARZ18VS	Längsneigung	Abstand Fz–AQvor	A-Zeichen	AQ-Abstand	AQ-Abst. (250m-Klasse)	AQ-Abst. (500m-Klasse)	vPkw	Überschreitung
Strecken-ID											
Fahrstreifenanzahl	0,77										
MARZ18VS	-0,02	-0,06									
Längsneigung	-0,05	-0,01	0,03								
Abstand Fz–AQvor	-0,04	-0,09	0,01	-0,04							
A-Zeichen	0,29	0,44	-0,40	-0,03	0,00						
AQ-Abstand	-0,13	-0,20	-0,02	-0,03	0,38	0,00					
AQ-Abst. (250m-Klasse)	-0,10	-0,18	-0,02	-0,04	0,37	0,01	0,99				
AQ-Abst. (500m-Klasse)	-0,10	-0,18	-0,03	0,00	0,36	0,05	0,95	0,96			
vPkw	0,26	0,37	-0,25	-0,05	0,01	0,59	-0,01	-0,01	0,02		
Überschreitung	0,07	0,07	0,04	-0,04	0,00	-0,14	-0,01	-0,02	-0,02	0,71	

1,00 0,75 0,50 0,25 0,00 −0,25 −0,50 −0,75 −1,00

	n_{FCD}	Median	Mittelwert	Standardabw.
Fahrstreifenanzahl	4.553.175	2	2,3	0,5
MARZ18VS	4.559.416	1	1,3	0,5
Längsneigung [%]	4.731.143	0,0	-0,1	1,4
Abstand Fz–AQvor [m]	4.795.366	683,9	731,3	477,1
A-Zeichen [km/h]	4.795.366	100	108,0	13,1
AQ-Abstand [m]	4.665.560	1.402	1.480,4	361,2
AQ-Abst. (250m-Kl.) [m]	4.665.560	1.500	1.594,1	379,1
AQ-Abst. (500m-Kl.) [m]	4.665.560	1.500	1.720,3	431,7
vPkw [km/h]	4.795.366	117	118,5	18,6
Überschreitung [km/h]	4.795.366	7	10,5	15,1

Abbildung 4-9: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Harmonisierungsschaltungen aus FCD (TLimit = 60,80,100,120 km/h)

Stauwarnungschaltungen

Abbildung 4-10 zeigt das Ergebnis der Korrelationsanalyse für die Stautrichterschaltungen. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit den Ergebnissen der Korrelationsanalyse für die Harmonisierungsschaltungen. Nennenswert ist die geringfügige, aber erkennbare Korrelation zwischen der Überschreitung der Geschwindigkeitsbeschränkung und der Fahrstreifenanzahl, was bedeutet, dass Stauwarnungen mit Geschwindigkeitsbeschränkungen auf zweistreifigen Strecken tendenziell besser befolgt werden als auf dreistreifigen Strecken. Über alle auswertbaren ca. 200.000 FCD-Meldepunkte liegt die mittlere Geschwindigkeit bei ca. 102,4 km/h bei einer Standardabweichung von 25,5 km/h. Die mittlere Überschreitung angezeigter Geschwindigkeitsbeschränkungen während Stautrichterschaltungen beträgt 36,7 km/h bei einer Standardabweichung von 25,0 km/h.

Korrelationskoeffizienten nach Pearson, Stauwarnung, nFCD=201.770

	Strecken-ID	Fahrstreifenanzahl	MARZ18VS	Längsneigung	Abstand Fz–AQvor	A-Zeichen	AQ-Abstand	AQ-Abst. (250m-Klasse)	AQ-Abst. (500m-Klasse)	vPkw	Überschreitung
Strecken-ID											
Fahrstreifenanzahl	0,74										
MARZ18VS	0,13	0,11									
Längsneigung	-0,04	-0,00	0,05								
Abstand Fz–AQvor	-0,05	-0,10	-0,06	-0,11							
A-Zeichen	0,05	0,15	-0,39	-0,03	-0,05						
AQ-Abstand	-0,15	-0,25	-0,15	-0,03	0,39	-0,14					
AQ-Abst. (250m-Klasse)	-0,11	-0,22	-0,15	-0,04	0,38	-0,15	0,99				
AQ-Abst. (500m-Klasse)	-0,11	-0,25	-0,14	-0,02	0,36	-0,14	0,94	0,95			
vPkw	0,23	0,25	-0,19	-0,05	-0,02	0,24	0,00	0,01	0,02		
Überschreitung	0,21	0,19	-0,05	-0,04	0,00	-0,14	0,06	0,07	0,08	0,93	

1,00 0,75 0,50 0,25 0,00 −0,25 −0,50 −0,75 −1,00

	n_{FCD}	Median	Mittelwert	Standardabw.
Fahrstreifenanzahl	186.931	2	2,4	0,5
MARZ18VS	196.190	2	2,2	1,0
Längsneigung [%]	194.264	0,0	-0,1	1,4
Abstand Fz–AQvor [m]	201.770	651,8	698,4	458,8
A-Zeichen [km/h]	201.770	60	65,8	9,5
AQ-Abstand [m]	201.617	1.338	1.408,9	359,5
AQ-Abst. (250m-Kl.) [m]	201.617	1.500	1.514,2	387,5
AQ-Abst. (500m-Kl.) [m]	201.617	1.500	1.624,0	412,3
vPkw [km/h]	201.770	102	102,4	25,5
Überschreitung [km/h]	201.770	36	36,7	25,0

Abbildung 4-10: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Stauwarnungsschaltungen aus FCD (TLimit = 60,80,100,120 km/h)

4.4.3 Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens über die Distanz zwischen zwei AQ

Für die räumliche Auswertung der FCD wurden die Lagemaße der FCD-Geschwindigkeiten aller AQ-Abschnitte der Untersuchungsstrecken anhand des Gesamtdatensatzes betrachtet. Die Auswertung erfolgte in Abhängigkeit vom Abstand zum zuletzt passierten AQ und zum nächstgelegenen AQ. Die Ergebnisse der Analyse bestätigen im Wesentlichen die Ergebnisse der Korrelationsanalysen und zeigen sehr heterogene Lagemaße der Geschwindigkeiten entlang der AQ-Abschnitte. Dies gilt sowohl zwischen den einzelnen Untersuchungsstrecken als auch zwischen den einzelnen AQ-Abschnitten innerhalb einer Untersuchungsstrecke.

In der Mehrheit der betrachteten Fälle sind sowohl die Mediane der Geschwindigkeiten als auch die übrigen Lagemaße über den gesamten AQ-Abschnitt konstant. Ein Einfluss des Abstands zum zuletzt passierten oder zum vorausliegenden AQ lässt sich nur in wenigen Einzelfällen erahnen. Die Missachtung bzw. Befolgung der Geschwindigkeiten ist abhängig von der

angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkung und bestätigt ebenfalls die Ergebnisse aus der statistischen Korrelationsanalyse:

- T120 wird in der Regel gut bis sehr gut befolgt (Median),
- T100 wird meist gering bis moderat überschritten (Median),
- T80 und T60 werden insbesondere bei Stautrichter-Schaltungen häufig deutlich bis sehr deutlich überschritten (Median).

Während die T120-Anzeigen auf nahezu allen AQ-Abschnitten befolgt und im Median höchstens geringfügig überschritten werden, unterscheidet sich die Befolgung der T100- und besonders der T80- und T60-Anzeigen je nach Strecke erkennbar. Ein Beispiel für die stark abweichende Befolgung verschiedener Schaltbilder zeigt Abbildung 4-11: Über alle untersuchten AQ-Abschnitte verändern sich Median und Streuung der Geschwindigkeiten minimal. Die Schwankungen der Geschwindigkeiten während der T100- und T80-Schaltungen können durch die geringen Stichprobengrößen erklärt werden. Für einen Vergleich mit T60-Schaltungen lagen zu wenige Daten vor.

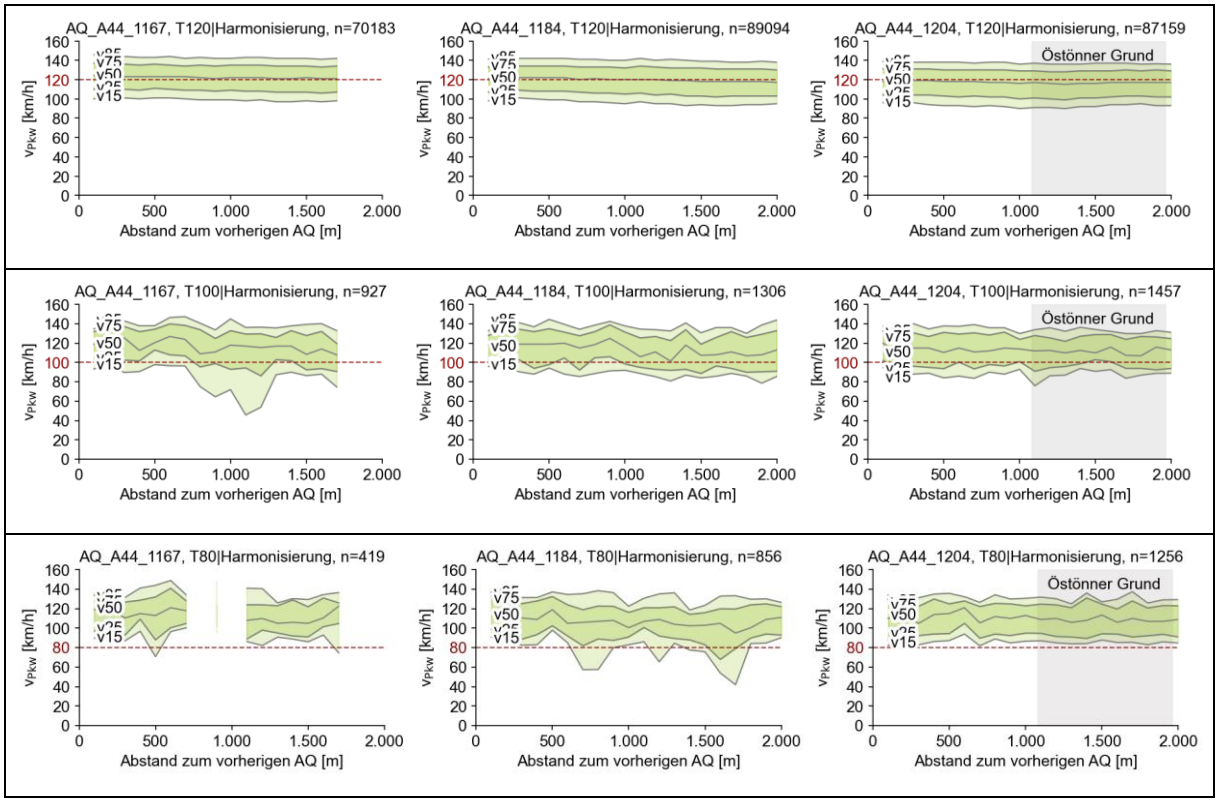


Abbildung 4-11: Vergleich der Geschwindigkeiten an drei aufeinanderfolgenden AQ-Abschnitten entlang der Strecke der A 44 Soest – Unna-Ost

Eine erzwungene Befolgung von Schaltbildern während Störungen des Verkehrsablaufs oder Stausituationen entsteht, wenn die angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeit die durch den Verkehrszustand bedingte, maximal mögliche Geschwindigkeit überschreitet. Als Beispiel zeigt Abbildung 4-12 eine Abfolge von drei AQ-Abschnitten auf der A 57 zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch. Der an der AS Krefeld-Gartenstadt entstehende Stau dehnt sich regelmäßig bis über die AS Moers-Kapellen aus. Die T120-Schaltungen am AQ_57.3 reagiert nicht auf die regelmäßigen Stausituationen, die angezeigte Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h wird bei einer Stichprobe von fast 30.000 FCD-Meldepunkten von der v85-

Geschwindigkeit kaum überschritten. Bei den niedrigeren zulässigen Höchstgeschwindigkeiten 100 km/h und 80 km/h ist auch der sich regelmäßig ausbreitende Stau durch die große Streuung der Geschwindigkeiten erkennbar. Die Geschwindigkeitsbeschränkungen werden zwar im Median gut befolgt, die Streuung der Geschwindigkeiten ist mit einer Spannweite von ca. 10 km/h (v15) bis 110 km/h (v85) jedoch enorm.

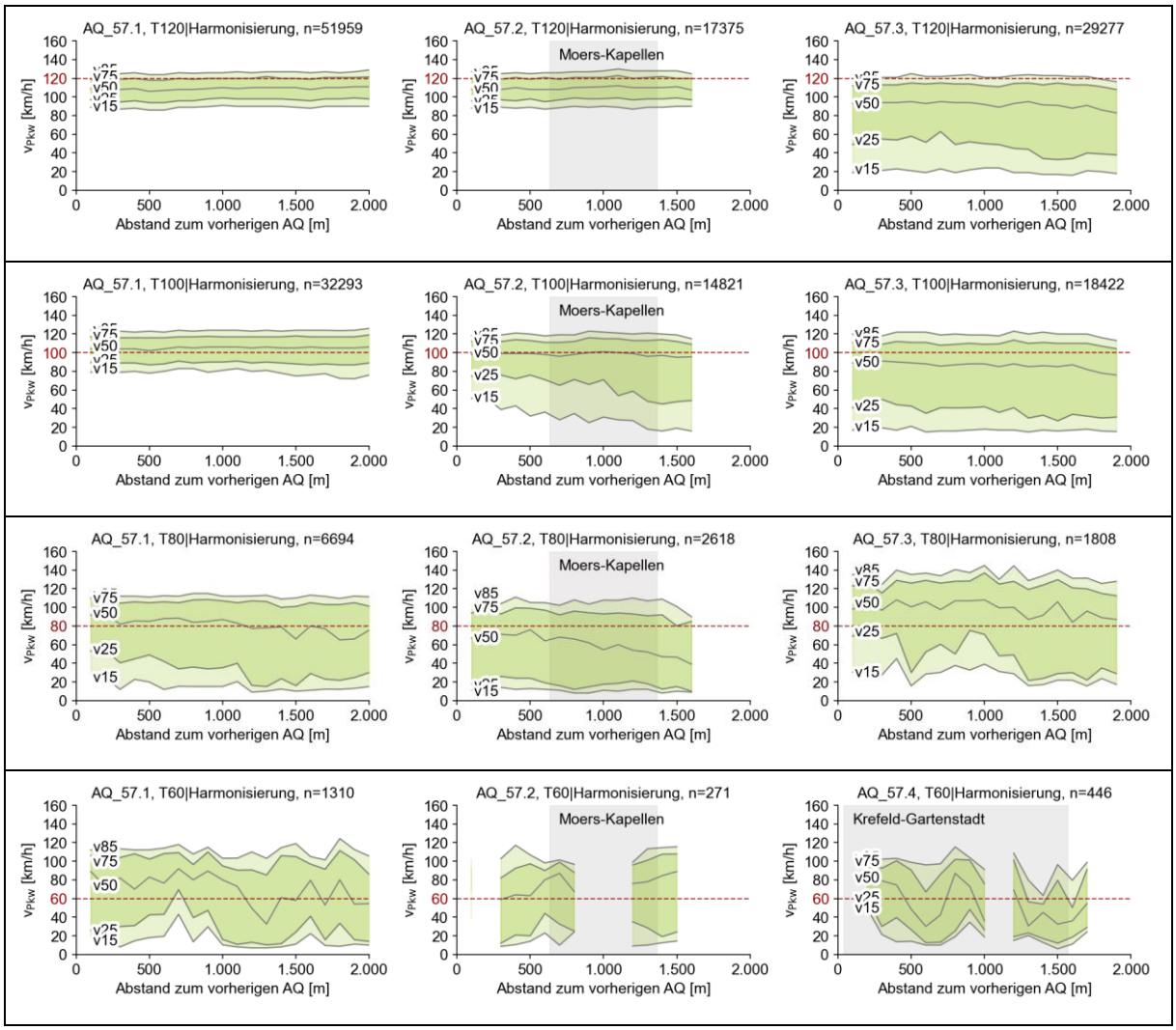


Abbildung 4-12: Vergleich der Geschwindigkeiten während unterschiedlicher Schaltbilder an drei aufeinanderfolgenden AQ-Abschnitten entlang der A 57 Moers – Meerbusch

Unterschiedliche Befolgungen von gleichen Geschwindigkeitsbeschränkungen sind gelegentlich auch innerhalb einer Untersuchungsstrecke zu beobachten.

Knotenpunkte haben keinen einheitlichen Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten vor, innerhalb oder nach dem Knotenpunkt. In einigen Fällen ist eine Abnahme der Geschwindigkeiten im Zulauf zum Knotenpunkt erkennbar, in einigen Fällen nimmt gleichzeitig die Streuung der Geschwindigkeiten zu und in anderen Fällen ab. Auf vielen AQ-Abschnitten ist keine Veränderung der Geschwindigkeiten im Knotenpunktbereich erkennbar.

In Tabelle 4-17 bis Tabelle 4-20 finden sich exemplarische Darstellungen für die Heterogenität des Fahrverhaltens bei gleichen und unterschiedlichen Schaltbildern. Für T60-Schaltungen

lagen häufig zu wenige Datenpunkte für eine robuste Darstellung der Lagemaße vor. Ausreichend viele Meldepunkte während T60-Anzeigen waren vor allem im Bereich der Knotenpunkte vorhanden.

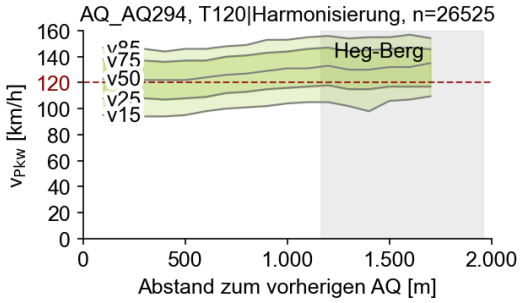
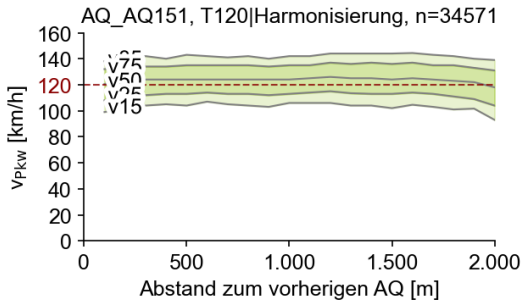
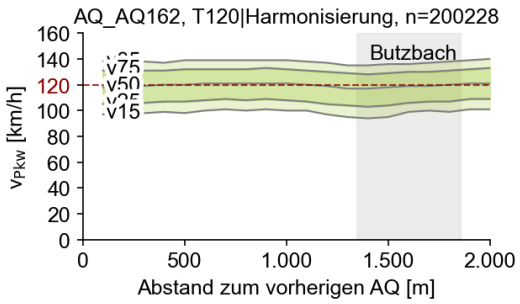
Streckencharakteristik	Exemplarische Ergebnisbeschreibung	Exemplarische Darstellung
• T120 • Zulauf zu Knotenpunkt	• Sehr gute Befolgung im Median am AQ, • Nach dem AQ konstante Zunahme der Geschwindigkeiten bis zum nachfolgenden AQ um ca. 10 km/h, • Gleichbleibende Streuung der Geschwindigkeiten	
• T120 • Außerhalb Knotenpunktbereich	• Sehr gute Befolgung im Median, • Gleichbleibende Geschwindigkeiten, • Geringe und gleichbleibende Streuung der Geschwindigkeiten	
• T120 • Zulauf zu Knotenpunkt	• Sehr gute Befolgung im Median, • Gleichbleibende Geschwindigkeiten, • Gleichbleibende Streuung der Geschwindigkeiten, • Kaum sichtbarer Einfluss der AS Butzbach	

Tabelle 4-17: Exemplarische FCD-Geschwindigkeitsverläufe in Abhängigkeit vom Abstand zum vorausgegangenen und folgenden AQ (T120-Schaltungen)

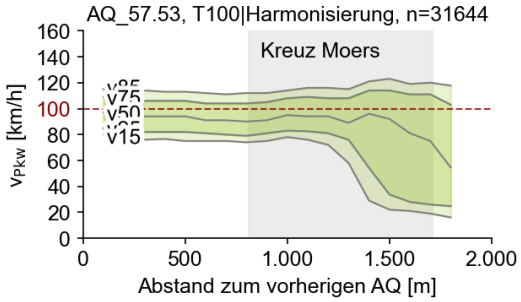
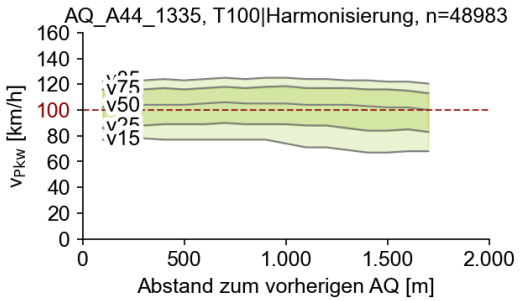
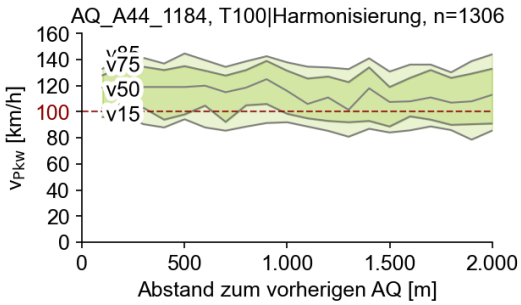
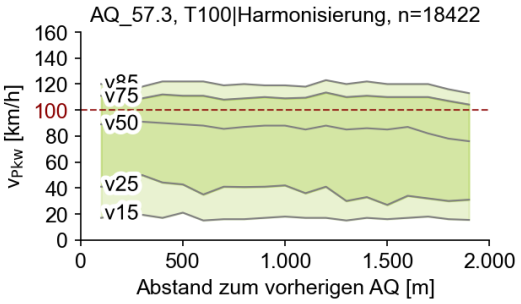
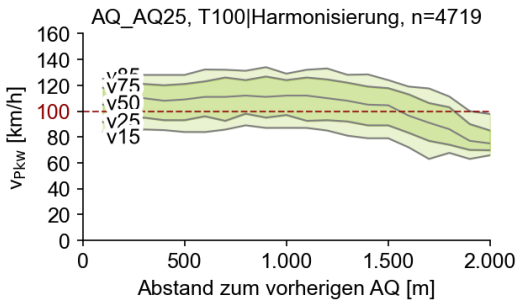
Streckencharakteristik	Exemplarische Ergebnisbeschreibung	Exemplarische Darstellung
• T100 • Zulauf zu Knotenpunkt • Staus im Knotenpunktbereich	• Sehr gute Befolgung im Median, • Zunächst gleichbleibende Geschwindigkeiten, • Erkennbare Abnahme der Geschwindigkeiten mit Zunahme der Streuung im Bereich des AK Moers	
• T100 • Außerhalb Knotenpunktbereich	• Sehr gute Befolgung im Median, • Gleichbleibende Geschwindigkeiten, • Gleichbleibende Streuung der Geschwindigkeiten	
• T100 • Außerhalb Knotenpunktbereich	• Moderate Befolgung ab v50, • Gleichbleibende Geschwindigkeiten, • Gleichbleibende Streuung der Geschwindigkeiten	
• T100 • Regelmäßige Staus, • Außerhalb Knotenpunktbereich	• Weitgehend gleichbleibende Geschwindigkeiten, • Große und weitgehend gleichbleibende Streuung der Geschwindigkeiten • Sehr große Unterschreitungen unter dem Median	
• T100 • Außerhalb Knotenpunktbereich	• Gute Befolgung im Median am AQ, • Abnehmende Geschwindigkeiten unmittelbar vor dem nachfolgenden AQ	

Tabelle 4-18: Exemplarische FCD-Geschwindigkeitsverläufe in Abhängigkeit vom Abstand zum vorausgegangenen und folgenden AQ (T100-Schaltungen)

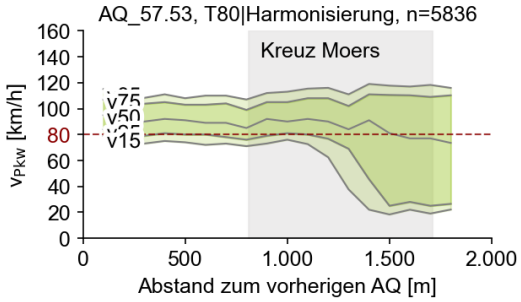
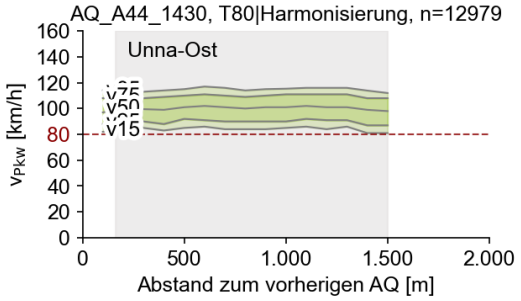
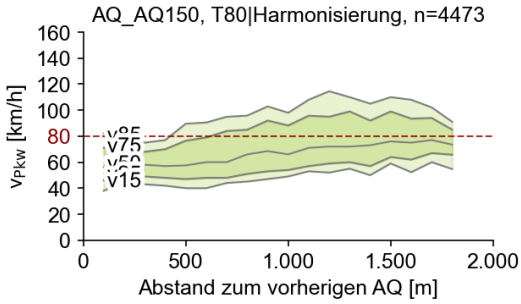
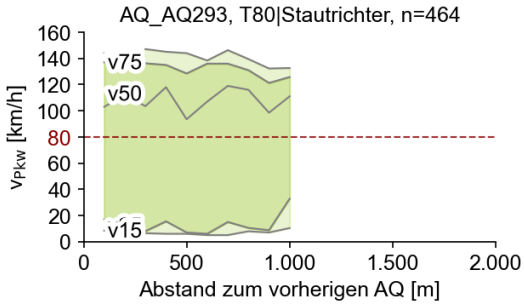
Streckencharakteristik	Exemplarische Ergebnisbeschreibung	Exemplarische Darstellung
• T80 • Zulauf zu Knotenpunkt • Staus im Knotenpunktbereich	• Gute bis moderate Befolgung im Median, • Zunächst gleichbleibende Geschwindigkeiten, dann erkennbare Abnahme der Geschwindigkeiten mit Zunahme der Streuung im Bereich des AK Moers • Fast identisch zur Situation während T100	
• T80 • Im Knotenpunktbereich	• Schlechte Befolgung im Median, • Gleichbleibende Geschwindigkeiten, • Gleichbleibende Streuung der Geschwindigkeiten	
• T80 • Außerhalb Knotenpunktbereich	• Zunächst regelmäßige Unterschreitung von T80 bei geringer Streuung • Mit zunehmendem Abstand zum AQ Anpassung der Geschwindigkeiten an T80	
• T80 • Außerhalb Knotenpunktbereich	• Erhebliche Streuung der Geschwindigkeiten	

Tabelle 4-19: Exemplarische FCD-Geschwindigkeitsverläufe in Abhängigkeit vom Abstand zum vorausgegangenen und folgenden AQ (T80-Schaltungen)

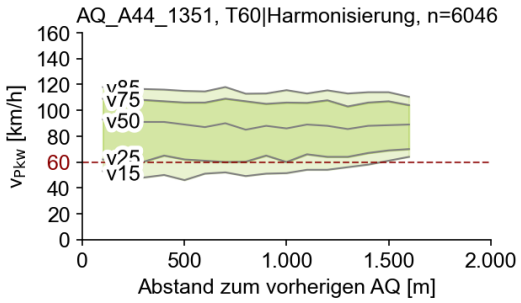
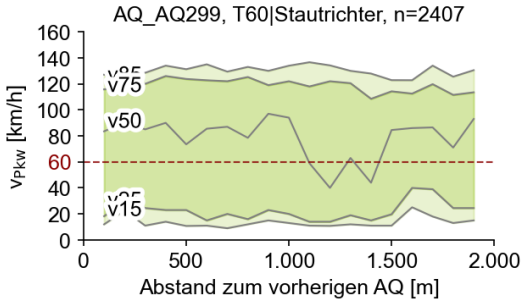
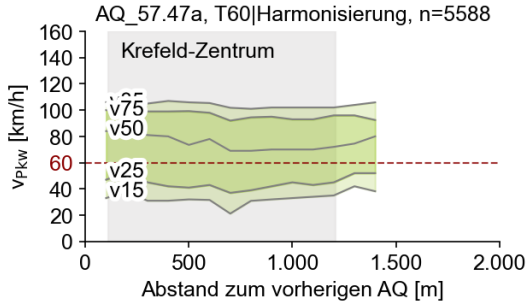
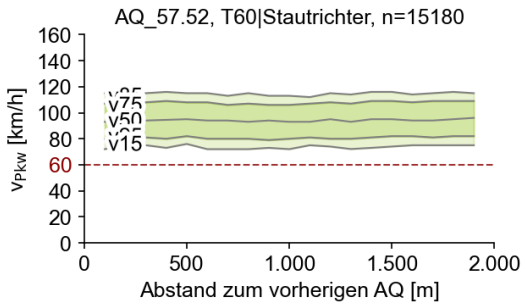
Streckencha-rakteristik	Exemplarische Ergebnisbeschreibung	Exemplarische Darstellung
• T60 • Außerhalb Knoten-punktbereich	• Im Median schlechte bis sehr schlechte Befolgung, • Große Streuung	
• T60 • Außerhalb Knoten-punktbereich	• Sehr große Streuung, • Sehr großer Interquartilsab-stand zwischen v25 und v75	
• T60 • In zentralem Knoten-punktbereich	• Schlechte Befolgung im Me-dian, • Große Streuung der Ge-schwindigkeiten bei gleich-bleibenden Lagemaßen	
• T60 • Außerhalb Knoten-punktbereich	• Durchgängig sehr schlechte Befolgung im Median, • Gleichbleibende Lagemaße der Geschwindigkeiten über den gesamten AQ-Abschnitt	

Tabelle 4-20: Exemplarische FCD-Geschwindigkeitsverläufe in Abhängigkeit vom Abstand zum vorausgegangenen und folgenden AQ (T60-Schaltungen)

4.4.4 Weg-Zeit-Analyse der Trajektoriendaten

In Abbildung 4-13 sind die Weg-Zeit-Diagramme der sieben Untersuchungsstrecken dargestellt. Höher aufgelöste Versionen der Darstellungen finden sich im Anhang. Lediglich für eine der sieben untersuchten Strecken – die A 5 bei Homberg (Ohm) – konnten am Tag der Drohnenmessung regelmäßige und deutliche Veränderungen im Verkehrszustand über den Erhebungszeitraum festgestellt werden.

Auffällig bei der Betrachtung der Weg-Zeit-Diagramme ist die stark unterschiedliche Schaltfrequenz je nach SBA. Während an der SBA im Zuge der A 2 mit drei Schaltvorgängen im Untersuchungszeitraum von knapp 3,5 Stunden kaum Aktivität herrschte, schalteten die AQ entlang der A 81 in einem vergleichbaren Zeitraum bei vergleichbarem Verkehrszustand ca. 130-mal, was einem Zustandswechsel alle 1,9 Minuten entspricht. Über einen Zeitraum von 45 Minuten wechselte das Schaltbild am AQN14 38-mal zwischen den Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 100 km/h, 120 km/h sowie der Aufhebung der Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h und einer Dunkelschaltung.

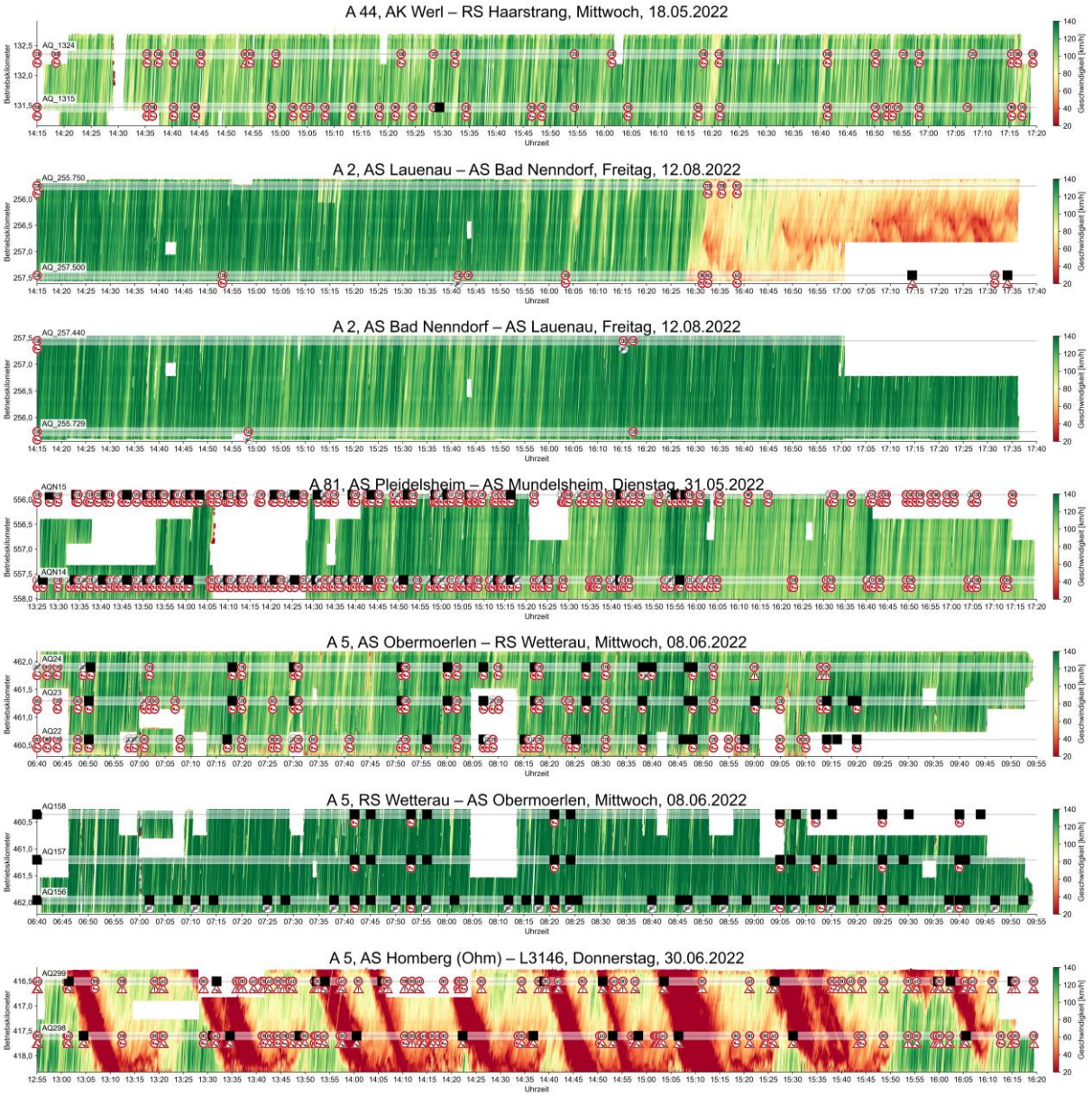


Abbildung 4-13: Weg-Zeit-Diagramme mit Fahrzeugtrajektorien und Schaltzuständen

In Abbildung 4-14 sind zwei Detailbetrachtungen des Weg-Zeit-Diagrammes für die A 5 zwischen der AS Homberg (Ohm) und der Überführung über die L 3146 dargestellt. In beiden Darstellungen lässt sich die korrekte Funktionsweise der Stauerkennung und -trichterung erkennen. Mit Erreichen des Staus am AQ299 gegen 13:02 Uhr schaltet der AQ dunkel und zeigt das Zeichen 124 – Stau. Gleichzeitig schaltet der stromaufwärts gelegene AQ298 ebenfalls das Zeichen 124 mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 60 km/h. Nach Auflösung des

Staus am AQ299 gegen 13:07 Uhr wechselt die Anzeige auf eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 100 km/h in Kombination mit dem Zeichen 277 – Lkw-Überholverbot.

In beiden Ausschnitten der Abbildung 4-14 ist zu erkennen, dass die Geschwindigkeitsbeschränkungen der Stautrichterungen schlecht befolgt werden. Die Geschwindigkeits-beschränkungen auf 60 km/h und 80 km/h, welche wechselnd in Kombination mit Gefahrenwarnungen und Stauwarnungen schalten, werden fast ausnahmslos von den Verkehrsteilnehmenden überschritten, in einigen Fällen um mehr als 30 km/h, trotz geringer AQ- und MQ-Abstände. Erst mit dem Erreichen des Stauendes reduzieren sich die Geschwindigkeiten. Die Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus der statistischen Analyse, das Geschwindigkeitsbeschränkungen aus Stauwarnungen – unabhängig vom AQ-Abstand – häufig deutlich überschritten werden.

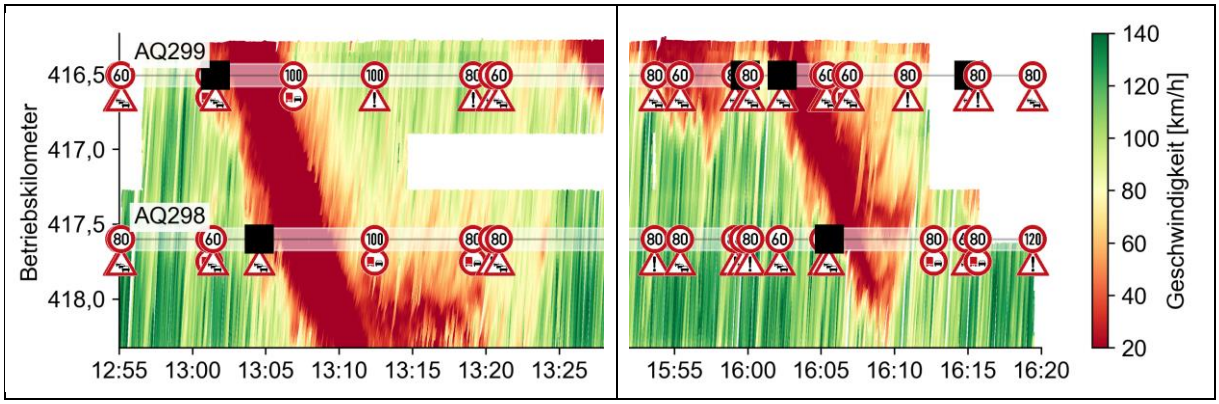


Abbildung 4-14: Detaildarstellungen des Weg-Zeit-Diagrammes mit Fahrzeugtrajektorien und Schaltzuständen für die A 5, zwischen der AS Homberg (Ohm) und der L 3146

5 Simulation

5.1 Methodische Rahmenbedingungen

Verkehrsteilnehmende reagieren in der Realität individuell und zeitlich fein aufgelöst mit Fahrstreifenwechseln und Geschwindigkeitsveränderung auf den Verkehrszustand im Sichtbereich (Taktisches Fahrverhalten). Dies gilt umso mehr, wenn sich neben dem Verkehrszustand weitere externe Einflüsse, wie die Witterung und die angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkungen, ändern. Simulationsstudien haben jedoch gezeigt, dass sich taktisches Fahrverhalten (noch) nicht simulieren lässt. Als ein Element des taktischen Fahrverhaltens kann auch die Befolgung von Geschwindigkeitsbeschränkungen gesehen werden. Die Befolgung von Geschwindigkeitsbeschränkungen lässt sich gegenwärtig nur statisch über die Zuweisung einer Wunschgeschwindigkeit an eine Fahrer-Fahrzeug-Einheit (FFE) an einem bestimmten Querschnitt simulieren. Die der FFE zugewiesene Wunschgeschwindigkeit bleibt erhalten, bis sie an einem weiteren Querschnitt erneut verändert wird. Das bedeutet, dass die Wunschgeschwindigkeit zwar in Abhängigkeit vom Schaltzustand am entsprechenden AQ für jedes Steuerungsintervall angepasst werden kann, sich diese jedoch bis zum nächsten AQ nicht mehr verändert. In der Simulation wurde mithilfe von weitgehend unveränderten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen simuliert (vgl. Kapitel 5.2.4), wodurch sich plausible Befolgungen der Geschwindigkeitsbeschränkung während der Harmonisierungsschaltungen ergaben, jedoch deutlich zu hohe Befolgungen während der Stauwarnungen im Vergleich zu den empirischen Ergebnissen (vgl. Kapitel 4.4.2) Im Rahmen der Simulation wurde auf die Implementierung von Wunschgeschwindigkeiten, welche große Überschreitungen von Geschwindigkeitsbeschränkungen zur Folge haben, verzichtet, sodass die Ergebnisse für die Simulation von Stauwarnungen als theoretische Ergebnisse unter nahezu optimalen Bedingungen betrachtet werden müssen. Zusammenfassend gilt ein Grundsatz, der für alle Verkehrssimulationen gilt, in denen komplexe Netze oder Systeme untersucht werden sollen, die über simulationserprobte Standardszenarien hinausgehen: Die Simulation kann keine Näherung an eine oder mehrere reale Streckenabschnitte oder Verkehrssituationen garantieren, sondern liefert allgemeine Ergebnisse, die immer als Ergebnisse unter Laborbedingungen verstanden werden müssen und nicht überinterpretiert werden dürfen.

5.2 Methodik

5.2.1 Zielgrößen

Zur Erweiterung der empirischen Erkenntnisse aus der Datenauswertung wurde ein mikroskopisches Simulationsmodell in PTV Vissim erstellt, mit dem Szenario- und Sensitivitätsanalysen hinsichtlich der Auswirkungen unterschiedlicher Parameter der Anlagenkonfiguration von SBA durchgeführt wurden. Die Anwendung der Simulation erfolgte mithilfe von zwei Modellstrecken unter Variation von verschiedenen Anlagenkonfigurationen, die nicht empirisch beobachtet werden konnten, und diente der Ergänzung des Wertebereichs der empirischen Ergebnisse. Für jeden Simulationsschritt wurden die in Tabelle 5-1 genannten Zielgrößen bestimmt. Nach abgeschlossener Simulation erfolgte die Darstellung der Ergebnisse mithilfe von Boxplots, in denen die Lagemaße der Zielgrößenverteilung sowie die arithmetischen Mittel der Zielgrößen mit zugehörigem Konfidenzintervall abgebildet sind.

Zielgröße	Kürzel	Indikator für
Mittlere Pkw-Geschwindigkeit	$v_{Pkw,mittel}$	Verkehrsfluss
Standardabweichung der Pkw-Geschwindigkeiten	$\sigma_{v,Pkw}$	Harmonisierungswirkung
Anteil TTC < 2 s	TTC	Sicherheitswirkung

Tabelle 5-1: Zielgrößen der Simulation

Die Einzelfahrzeugdaten aus der Simulation ermöglichen eine Analyse der Time To Collision (TTC) im Längsverkehr. Diese entspricht der Zeit bis zum theoretischen Aufprall eines Folgefahrzeuges auf das vorausfahrende Fahrzeug bei gleichbleibender Fahrtrichtung und Geschwindigkeit beider Fahrzeuge und dient dazu, das Unfallrisiko einer Verkehrssituation einzustufen, ohne dass es zu einem Unfall gekommen sein muss (FGSV 2012). Je geringer der Zeitabstand zur potenziellen Kollision ist, desto gefährlicher ist eine Situation. Die TTC wird über den gesamten Verlauf einer Verkehrssituation ermittelt, wobei der kleinste Wert der Ermittlung der Konfliktschwere dient. Die Grenze zwischen einem leichten und einem schweren Konflikt wird entsprechend den FGSV (2012) mit einer TTC von 1,5 Sekunden definiert. Eine Reduzierung von niedrigen TTC-Werten wird entsprechend den Hinweisen für das Qualitätsmanagement in der Verkehrsbeeinflussung (FGSV 2019b) als Indikator für eine zunehmende Verkehrssicherheit bewertet.

Die Berechnung der TTC erfolgt nach Gl. 5-1.

$$TTC = \frac{\Delta x_{netto}}{\Delta v} \tag{5-1}$$

mit:

TTC	=	Time To Collision	[s]
Δx_{netto}	=	Netto-Folgeabstand zur vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit (FFE)	[m]
Δv	=	Geschwindigkeitsdifferenz zur vorausfahrenden FFE	[km/h]

Ist der Nettoabstand zwischen den betrachteten Fahrzeugen nicht eindeutig ermittelbar, kann der Nettoabstand stattdessen mithilfe der Nettozeitlücke zwischen den Fahrzeugen und der Geschwindigkeit des Folgefahrzeuges nach Gl. 5-2 approximiert werden.

$$\Delta x_{netto} = \Delta t_{netto} \cdot v_2 \tag{5-2}$$

mit:

Δt_{netto}	=	Nettozeitlücke	[s]
v_2	=	Geschwindigkeit des Folgefahrzeuges	[m/s]

In jedem Simulationsschritt werden in PTV Vissim die Messgrößen „Folgeabstand_netto“ und „Geschwindigkeitsdifferenz für jede FFE zum vorausfahrenden Fahrzeug“ ermittelt. Mithilfe von Gleichung 5-1 wird je abgeschlossenem Simulationsdurchlauf die TTC anhand dieser Eingangsgrößen berechnet.

Für eine bessere Vergleichbarkeit wird der Anteil der TTC < 2 s für die verschiedenen Szenarien gegenübergestellt. Für die Darstellung der Mittelwerte und Lagemaße der Anteile an Simulationsschritten, in denen eine TTC < 2 s betrug, wurden ausschließlich Fälle berücksichtigt, in denen sich eine betrachtete FFE auf die vorausfahrende FFE zubewegte, also eine positive Differenzgeschwindigkeit vorlag.

5.2.2 Modellstrecke „Harmonisierung“

Für die Simulation wurde eine 8 km lange, ebene Modellstrecke bestehend aus einer freien Strecke zwischen zwei Knotenpunkten erstellt. Entlang der Strecke wurde eine SBA mit gleichbleibendem AQ-Abstand modelliert (Abbildung 5-1). Der für die SBA implementierte Schaltalgorithmus entspricht der Erkennung der „Fahrtrichtungsbezogenen Verkehrslage“ (Harmonisierung) nach dem MARZ (2018).

Ziel der Modellstrecke „Harmonisierung“ ist es, den Einfluss von verschiedenen SBA-Konfigurationen auf den Verkehrsablauf im Verkehrsstärkebereich einer gängigen Harmonisierungsschaltung zu ermitteln. Während der Simulation kommt es zu häufigen Harmonisierungsauslösungen und Schaltungen zwischen 80 km/h und 120 km/h. Es kommt nicht zur Staubildung. Die Modellstrecke „Harmonisierung“ wurde als zweistreifige und als dreistreifige Variante erstellt.

Um die verschiedenen Verkehrszustände unterhalb der Kapazität und die zugehörigen Harmonisierungsschaltzustände zu simulieren, wurden die Szenarien der Modellstrecke „Harmonisierung“ (zweistreifig) unter einer Zuflussganglinie simuliert, welche innerhalb eines Simulationsdurchlaufes (1 h) von 2.000 auf 3.800 Kfz/h ansteigt und nach einer Haltezeit von 25 min wieder auf 2.000 Kfz sinkt. Analog wurde eine Ganglinie für die dreistreifige Modellstrecke mit Verkehrsstärken zwischen 3.800 und 5.400 Kfz/h simuliert. Die Ganglinien bewegen sich damit ober- und unterhalb der im Rahmen der Kalibrierung verwendeten konstanten Zuflüsse, für die gute Ergebnisse erzielt werden konnten.

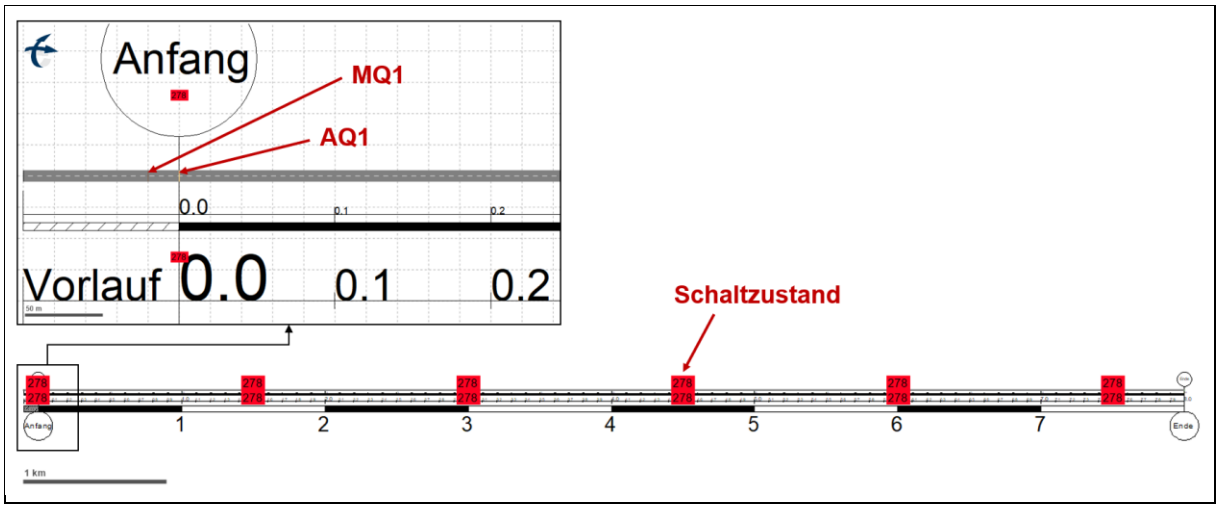


Abbildung 5-1: Darstellung der zweistreifigen Modellstrecke „Harmonisierung“ in PTV Vissim

5.2.3 Modellstrecke „Stauwarnung“

Die Modellstrecke „Stauwarnung“ basiert auf der Modellstrecke „Harmonisierung“ (Abbildung 5-1). Der für die SBA implementierte Schaltalgorithmus entspricht der Erkennung der „Fahrtrichtungsbezogenen Stauerkennung“ (Stauwarnung) nach dem MARZ (2018). Im Unterschied

zur Modellstrecke „Harmonisierung“ wurde am Ende der Modellstrecke zusätzlich ein künstlicher Engpass mithilfe eines Langsamfahrbereichs implementiert. Dieser kann durch gezieltes Aktivieren und Deaktivieren eine große oder mehrere kleine Stauwellen auslösen, welche sich stromaufwärts durch das Netz bewegen. Eine Freigabe der Strecke führt wiederum zur Stauauflösung.

Ziel der Modellstrecke „Stauwarnung“ ist es, durch die gezielt in das Netz injizierten Stauwellen die Wirkung von unterschiedlichen SBA-Konfigurationen auf den Verkehrsablauf während gängiger Stauwarnungs-Schaltungen zu untersuchen. Mithilfe des frei steuerbaren, künstlichen Engpasses können verschiedene Staumuster, wie z. B. ein Megastau oder vereinzelte Stauwellen simuliert werden. Zur Isolation der Wirkung von Stauwarnungsschaltungen erfolgt keine Überlagerung mit Harmonisierungsschaltungen. Die Modellstrecke „Stauwarnung“ wurde als zweistreifige und als dreistreifige Variante erstellt.

5.2.4 Kalibrierung

Simulationsparameter werden meist mithilfe von lokal quantifizierbaren Verkehrskenngrößen kalibriert, z. B. mithilfe von q-v-Beziehungen oder der Fahrstreifenaufteilung der Verkehrsstärke. Diese Art der Kalibrierung ermöglicht eine präzise Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen und realen Verkehrsdaten aus ortsgleichen MQ. Im Rahmen der Simulation einer SBA ist eine ortsfeste Kalibrierung der Parameter nicht ratsam, da sich das Fahrverhalten durch die wechselnden Wunschgeschwindigkeiten (= angezeigte Geschwindigkeitsbeschränkungen) ortsabhängig ständig verändert. Um eine SBA-konforme Kalibrierung durchführen zu können, wurde daher überprüft, inwieweit verschiedene Parametersets geeignet sind, den fließenden Verkehr nicht nur lokal plausibel (z. B. q-v-Beziehungen, Fahrstreifenaufteilung) abzubilden, sondern auch räumlich (Weg-Zeit-Beziehungen, Fahrzeugtrajektorien). Zu diesem Zweck wurde die Modellstrecke mit und ohne SBA unter Verwendung verschiedener Parametersets simuliert und die Ergebnisse einer einstündigen Simulation als Weg-Zeit-Diagramm dargestellt. Im Zuge der Kalibrierung wurden die im Folgenden beschriebenen Parameter variiert, um eine bestmögliche Anpassung an das anhand der Drohnentrajektorien abgebildete Fahrverhalten entlang einer SBA-Strecke zu erreichen.

Die Kalibrierung anhand der im folgenden beschriebenen Parameter erfolgte nicht sukzessiv, sondern iterativ je nach Erfolg oder Misserfolg eines einzelnen Kalibrierungsschrittes. Eine Übersicht aller verwendeten Parameterwerte nach erfolgter Kalibrierung ist im Anhang in Tabelle A-1 dargestellt.

Verkehrseigenschaften

Für die Kalibrierung wurde eine konstante Verkehrsstärke von 3.000 Kfz/h für die zweistreifige bzw. 4.200 Kfz/h für die dreistreifige Strecke jeweils bei einem Schwerverkehrsanteil von 5 % verwendet. Die Verkehrsstärken werden damit begründet, dass ein dichter Verkehr erzeugt werden soll, der zu unterschiedlichen Harmonisierungsschaltvorgängen führt und der sich noch deutlich unterhalb der Kapazität befindet.

Zur Validierung der Simulation beim Auftreten von Stausituationen wurden die Verkehrsstärken für die Modellstrecke „Stauwarnung“ sukzessive erhöht, bis ein mit empirischen Ergebnissen vergleichbares Resultat erzielt wurde. Für eine konstante Verkehrsstärke von q = 2.800 Kfz/h konnte dabei ein weitgehend mit der empirischen Situation an der A 5 bei Homberg (Ohm) übereinstimmendes Ergebnis erzielt werden.

Fahrverhalten

Als Grundkonfiguration wurde das Parameterset für eine HBS-konforme Simulation nach GEISTEFELDT et al. (2017) verwendet. Die in GEISTEFELDT et al. (2017) verwendete Vissim-Programmversion 5.40 und die für die vorliegende Untersuchung verwendete Vissim-Programmversion 2023 (SP04) weisen untereinander – als Folge der Programmweiterentwicklung der vergangenen Jahre – einige Unterschiede auf. Die Anpassung der Parameter an die aktuelle Programmversion erfolgte entsprechend Tabelle A-1.

Da sich im Laufe der Jahre auch die Standardparameter des Fahrverhaltens auf Autobahnen in PTV Vissim geändert haben, wurden weitere Kalibrierungsdurchläufe mit dem gegenwärtigen Vissim-Standardparametersatz vorgenommen. Es ergab sich eine bessere Übereinstimmung zwischen den empirisch ermittelten Trajektorien und den Simulationsergebnissen bei Verwendung des Parametersets aus GEISTEFELDT et al. (2017).

Lkw-Überholverbot

Unabhängig von der Parametrierung des Fahrverhaltens stellten sich im Weg-Zeit-Diagramm häufige Leerflächen ohne Trajektorien dar (vgl. Abbildung 5-2). Eine manuelle Prüfung der Simulation ergab, dass es auf längerer Strecke zu häufigen und mehrere Kilometer langen Quasi-Überholvorgängen durch Lkw kommt, welche den Verkehrsfluss auf dem Überholfahrstreifen maßgeblich beeinträchtigen. Über die gesamte Strecke wurde daher ein Lkw-Überholverbot in Form eines für den Schwerverkehr gesperrten Überholfahrstreifens angewendet.

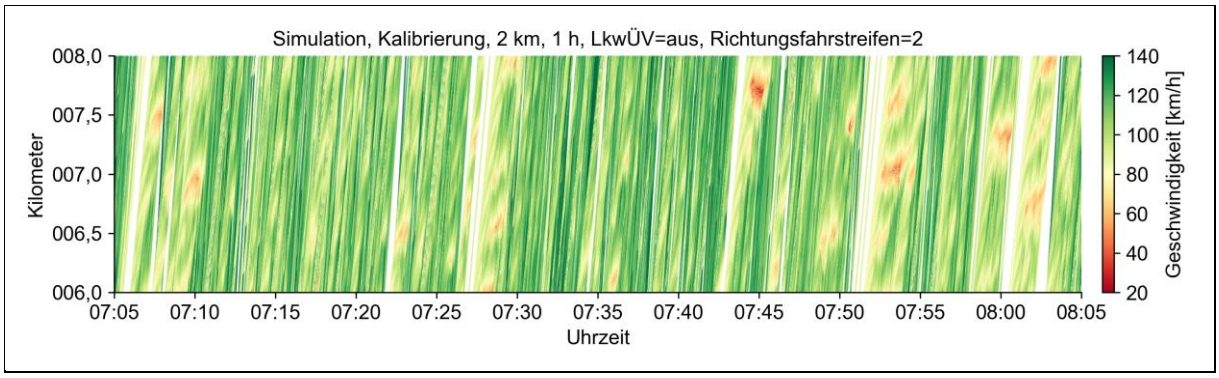


Abbildung 5-2: Leere Trajektorienfelder und vereinzelte, kurze Zusammenbrüche durch nebeneinanderfahrende Lkw

Befolgung von dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen

Die Befolgung von Geschwindigkeitsbeschränkungen ist im Rahmen der Simulation als Wunschgeschwindigkeitsverteilung entsprechend der auf dem Streckenabschnitt vorhandenen statischen Geschwindigkeitsbeschränkung implementiert. Wenn an einem AQ eine Geschwindigkeitsbeschränkung angezeigt wird, wird die Wunschgeschwindigkeitsverteilung für alle FFE, welche ab diesem Zeitpunkt den betroffenen AQ passieren, entsprechend der Wunschgeschwindigkeitsverteilung für die angezeigte Geschwindigkeitsbeschränkung aktualisiert. Die in PTV Vissim regulär implementierten Wunschgeschwindigkeiten beginnen auch für Pkw – unabhängig von der Geschwindigkeitsbeschränkung – bei ca. 80 km/h. Bei einer Wunschgeschwindigkeitsverteilung „130“ werden beispielsweise ca. 1,7 % der FFE mit einer Wunschgeschwindigkeit von weniger als 90 km/h in das Netz eingespeist. Die Tatsache, dass auch Pkw-Führende grundsätzlich niedrige Wunschgeschwindigkeiten haben können, ist un-

bestritten. Jedoch wird diese Wunschgeschwindigkeit in PTV Vissim unabhängig vom „Überholwunsch“ verarbeitet. Das bedeutet, dass auf langer Strecke regelmäßig Situationen entstehen, in denen ein Pkw mit marginal höherer Wunschgeschwindigkeit als die eines vorausfahrenden Lkw jenen Lkw auch bei dichtem Verkehr über teils kilometerlange Strecken mehrere Minuten lang „überholt“. Dadurch wird der Verkehr auf dem Überholfahrstreifen auch bei unkritischen Verkehrsstärken massiv beeinträchtigt. Die beobachteten Situationen ähnelten denen von langsam überholenden Lkw vor der Implementierung eines Lkw-Überholverbots. Im Weg-Zeit-Diagramm sind die Situationen als weiße Felder, welche frei von darstellbaren Trajektorien sind, erkennbar. Um das Problem ohne einen Eingriff in die Parametrisierung zu verringern, wurden die ohnehin geringen Anteile von Pkw mit Wunschgeschwindigkeiten unterhalb von 100 km/h für alle Wunschgeschwindigkeitsverteilungen ab 100 km/h aufwärts auf ein Minimum von 100 km/h hochgestuft. Eine Darstellung der im Rahmen der Simulation verwendeten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen zeigt Abbildung 5-3.

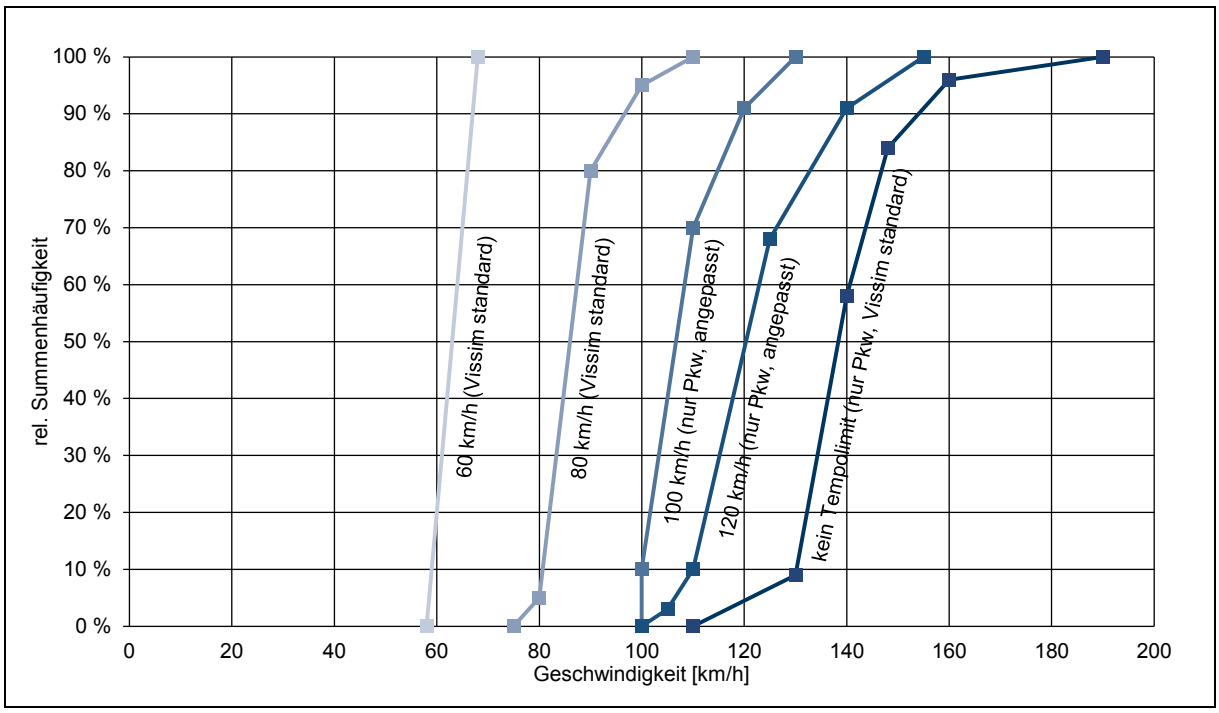


Abbildung 5-3: Im Rahmen der Simulation verwendete Wunschgeschwindigkeitsverteilungen

Fahrzeuglängen

Die in PTV Vissim grundlegend implementierte Lkw-Längenverteilung besteht aus nur einem Lkw-Typ („HGV-EU 04“) mit einer Länge von 10,20 m und ist damit an den innerörtlichen Verkehr angepasst. Im Rahmen der Netzmodellierung erfolgte eine Anpassung der Lkw-Längenverteilung an die in Abbildung 5-4 dargestellte Lkw-Längenverteilung auf Autobahnen in Vissim nach GEISTEFELDT et al. (2022). Zu diesem Zweck wurden die in Tabelle 5-2 dargestellten Lkw-Typen in Vissim erstellt, welche mit dem zugehörigen Anteil am Schwerverkehr ins Netz eingespeist wurden.

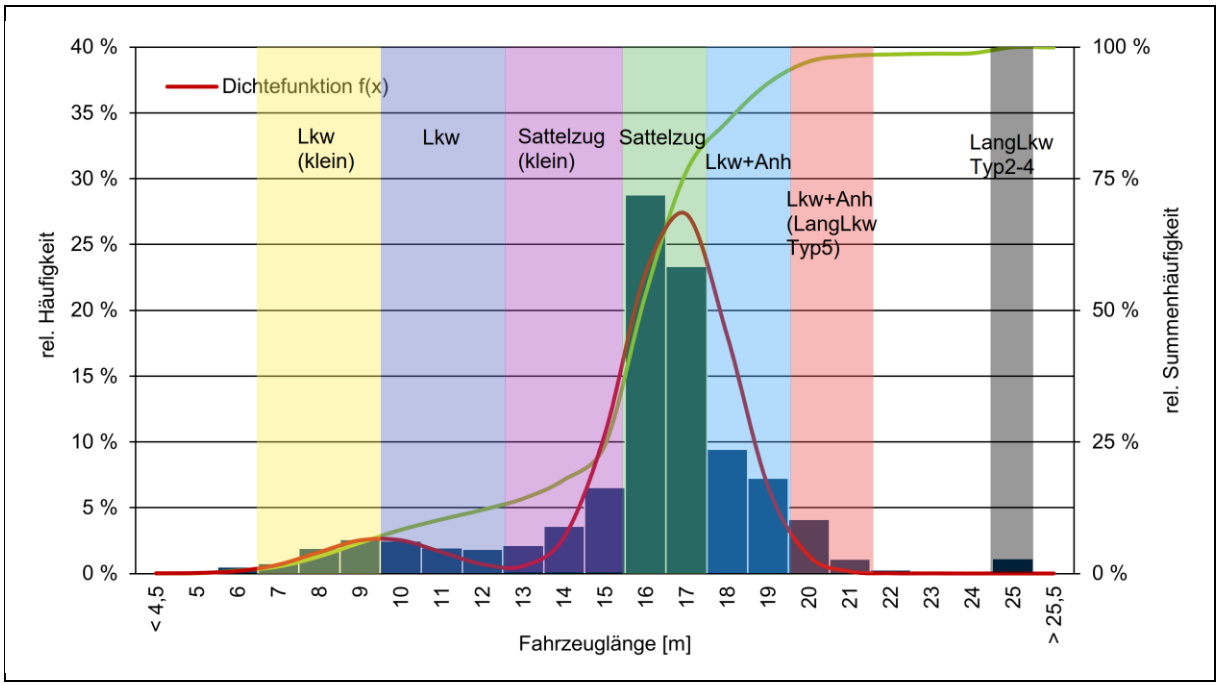


Abbildung 5-4: Längenverteilung von Lkw auf Autobahnen im Jahr 2017 nach GEISTEFELDT et al. (2022)

Bezeichnung	**Länge**	**Anteil am SV**
Lkw (klein)	8,80 m	6 %
Lkw	10,20 m	6 %
Sattelzug (klein)	14,50 m	13 %
Sattelzug	16,50 m	53 %
Lkw mit Anhänger	18,75 m	16 %
Lkw mit Anhänger (Lang-Lkw Typ 5 nach § 3 LKWÜberlStVAusnV	20,00 m	5 %
Lang-Lkw Typ 2–4 nach § 3 LKWÜberlStVAusnV	25,25 m	1 %

Tabelle 5-2: In PTV Vissim implementierte Lkw-Typen mit Anteil am SV auf Autobahnen

5.2.5 Ergebnis der Kalibrierung und Validierung

In Abbildung 5-5 sind die FFE-Trajektorien eines exemplarischen Kalibrierungsergebnisses den Trajektorien aus der empirischen Drohnenvideoerhebung für die A 44 zwischen dem AK Werl und der RS Haarstrang gegenübergestellt. Beide Darstellungen umfassen einen Zeitraum von einer Stunde über eine Strecke von ca. 2 km und weisen eine sehr gute Übereinstimmung der Geschwindigkeitsverläufe auf. Abbildung 5-6 zeigt den Vergleich der FFE-Trajektorien aus der Simulation mit den empirischen Daten am Beispiel der dreistreifigen A 2 zwischen der AS Bad Nenndorf und der AS Lauenau. Die Trajektorien weisen ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung der Geschwindigkeitsverläufe auf.

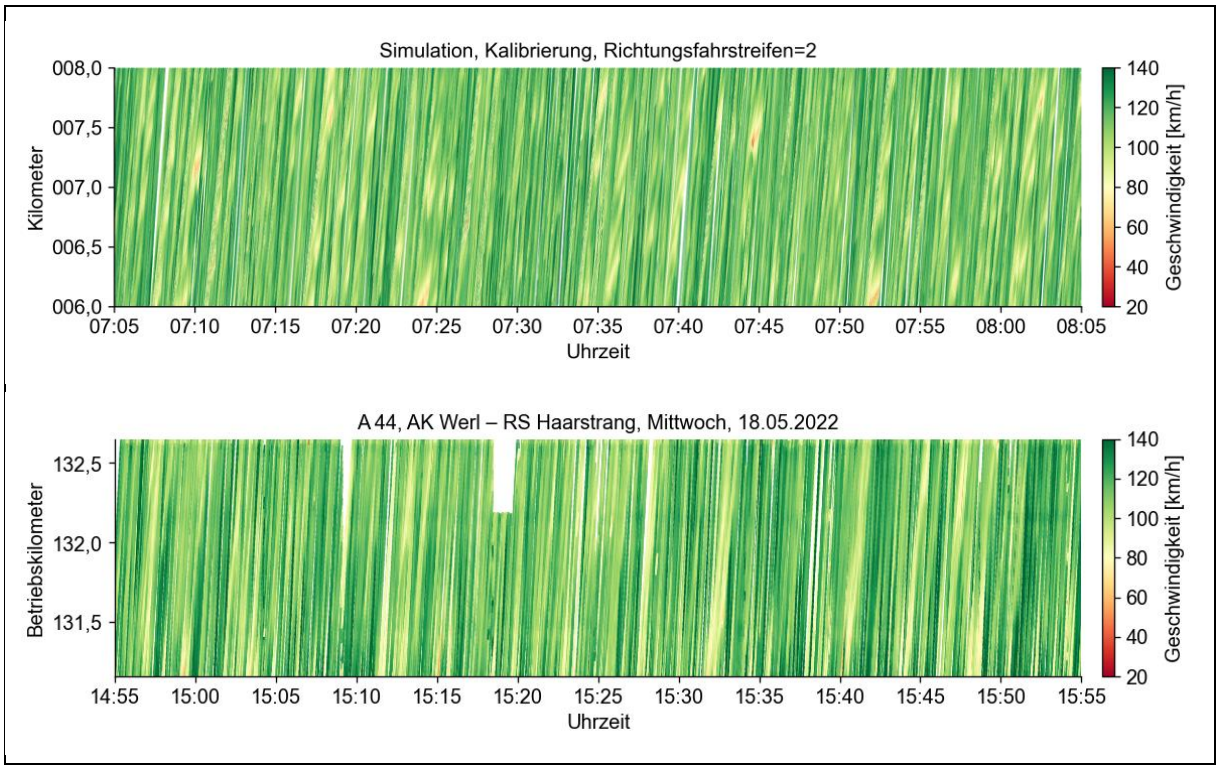


Abbildung 5-5: Vergleich der FFE-Trajektorien aus der Simulation (oben) mit den empirischen Daten am Beispiel der zweistreifigen A 44 zwischen dem AK Werl und der RS Haarstrang (unten)

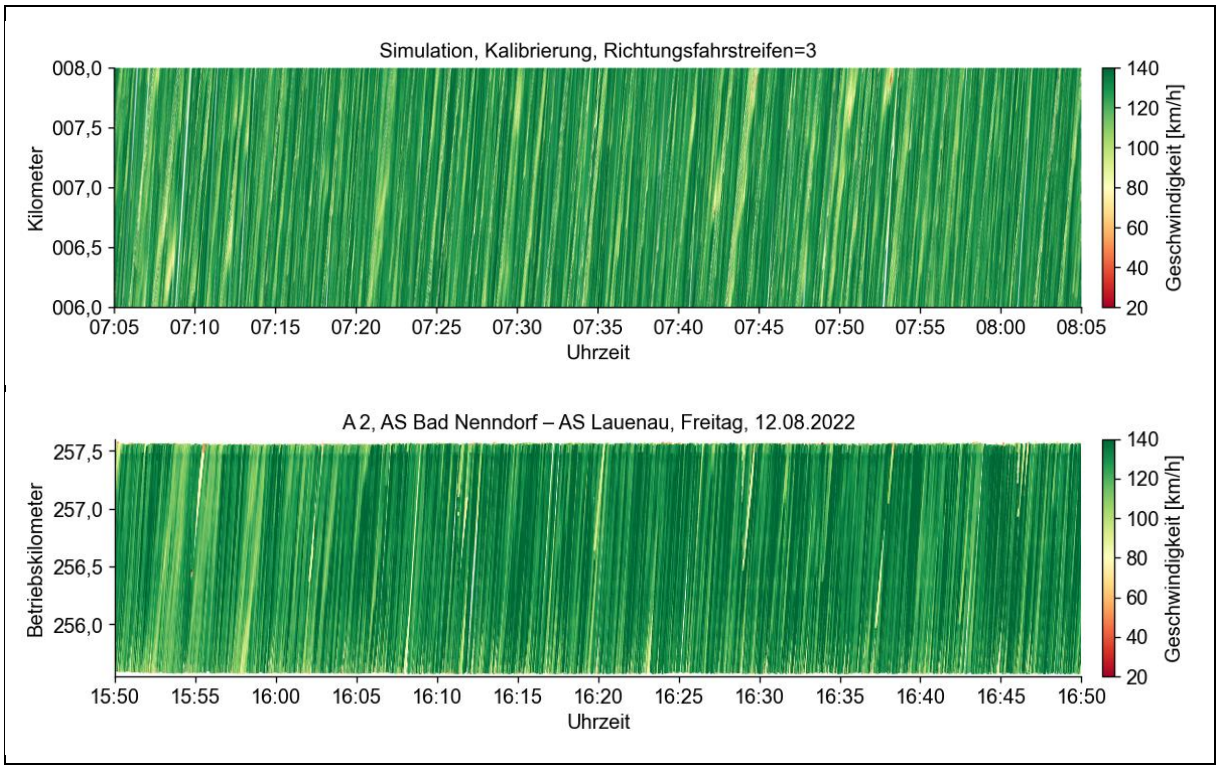


Abbildung 5-6: Vergleich der FFE-Trajektorien aus der Simulation (oben) mit den empirischen Daten am Beispiel der dreistreifigen A 2 zwischen der AS Bad Nenndorf und der AS Lauenau (unten)

Abbildung 5-7 zeigt die Erzeugung von vereinzelten Stauwellen in der Simulation (oben) nach dem Vorbild der empirisch gemessenen Stauwellen an der A 5 zwischen der AS Homberg (Ohm) und der L 3146. Die Entstehung des Staus konnte weitgehend plausibel simuliert werden. Trotz realitätsnaher Verkehrsstärken konnte die Ausbreitung des Staus nicht entsprechend der empirischen Vorlage nachgebildet werden. Auch bei vergleichbarer bis etwas langsamerer Stauausbreitungsgeschwindigkeit löst sich der Stau in der Simulation sehr schnell auf, sodass lediglich Ausbreitungslängen von ca. 1,5 km simuliert werden konnten. Da die Ausbreitungslängen der Stauwellen essenziell für die Simulation von AQ-Abständen von bis zu 3 km sind, wird auf eine Simulation einzelner Stauwellen verzichtet.

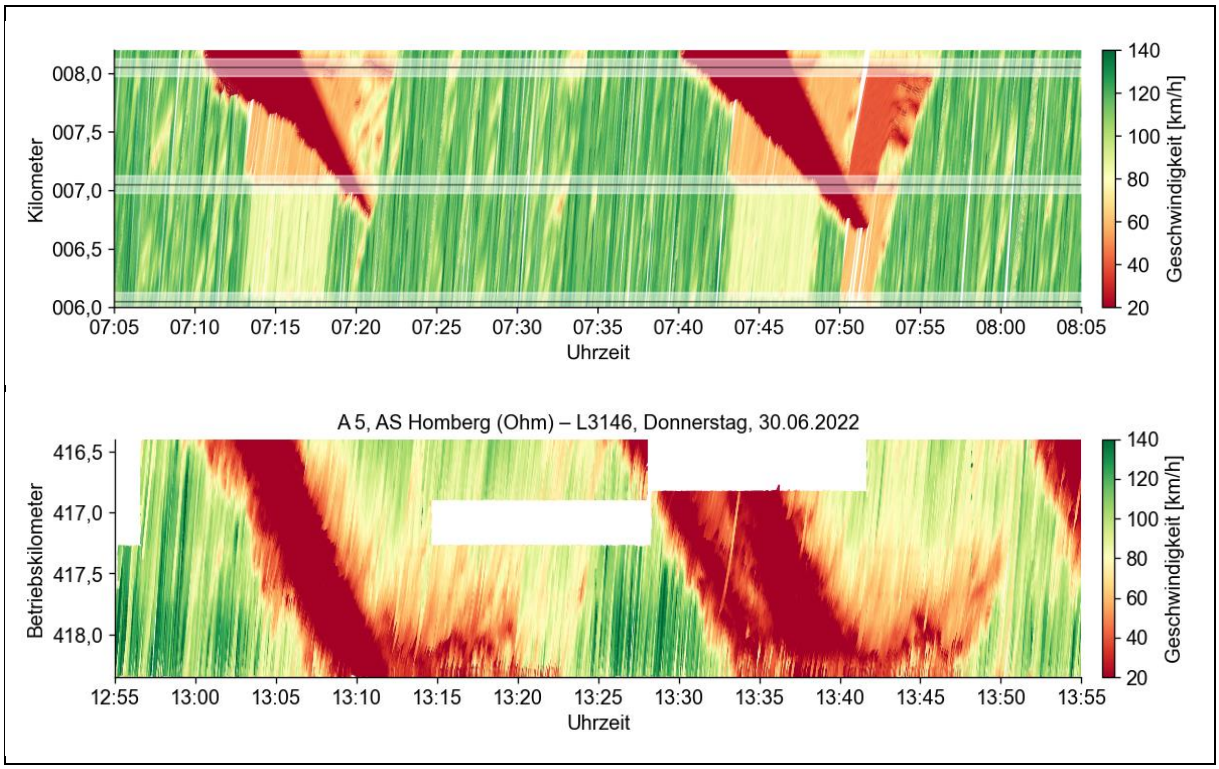


Abbildung 5-7: Vergleich der FFE-Trajektorien aus der Simulation (oben) mit den empirischen Daten am Beispiel der zweistreifigen A 5 zwischen der AS Homberg (Ohm) und der L 3146 (unten, die weißen Flächen resultieren aus fehlenden Drohnendaten)

Zur Simulation von Stauwarnungen wird ausschließlich die Stauvariante einer einzelnen großflächigen Stauwelle nachgebildet. Für die statistische Auswertung werden alle Trajektorien, welche sich eine Minute lang ununterbrochen in einem Stauzustand befinden, aus der Simulation entfernt (vgl. Abbildung 5-8).

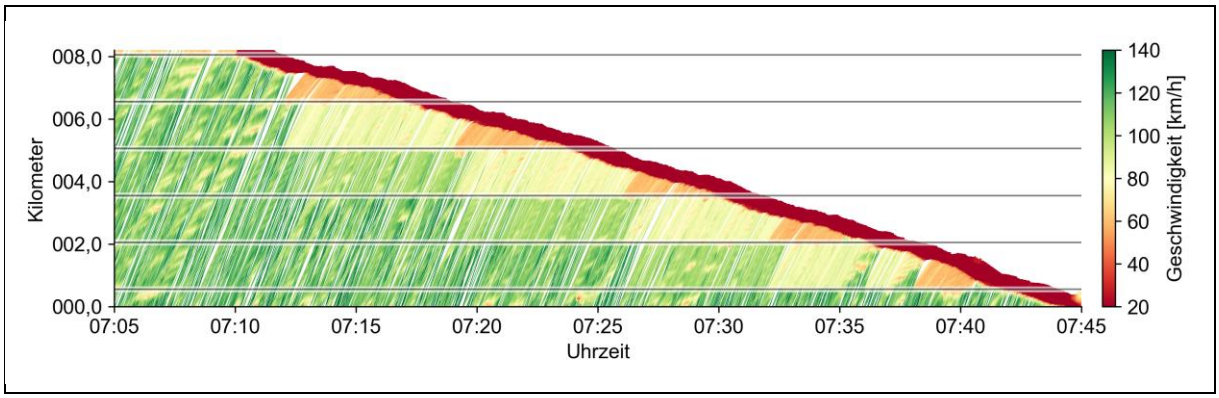


Abbildung 5-8: Beispieltrajektorien aus der Simulation einer großflächigen Stauwelle

5.2.6 Variation von SBA-Parametern und Simulation

Um die Auswirkungen auf die in 5.2.1 beschriebenen Zielgrößen im Simulationsmodell zu prüfen, wurden die in Tabelle 5-3 dargestellten Einflussparameter innerhalb eines bestimmten Wertebereichs variiert. Auf eine Variation der Lkw- und Pkw-Anteile wurde in der Simulation verzichtet, um die Übersichtlichkeit und Belastbarkeit der Ergebnisse nicht durch eine zu große Anzahl von Variablen zu beeinträchtigen.

Die Ergebnisse werden mithilfe von Boxplot-Diagrammen dargestellt. Zusätzlich zu den Ergebnissen durch Variation der SBA-Parameter werden in den Diagrammen die Ergebnisse der Simulation für den Fall der deaktivierten SBA („ohne“ SBA) dargestellt.

Kategorie	**Veränderte Parameter**	**Wertebereich**
Anlagentechnik	AQ-Abstand	500 m, 1.000 m, 1.500 m, 2.000 m, 2.500 m, 3.000 m
	MQ-Abstand	500 m, 1.000 m, 1.500 m, 2.000 m, 2.500 m, 3.000 m
	Abstand AQ–MQ	−1.000 m bis +1.000 m in 100 m-Intervallen
Steuerungstechnik	Steuerungsintervall	15 s, 30 s, 60 s, 90 s, 120 s
Streckeneigenschaften	Fahrstreifenanzahl	2 FS, 3 FS

Tabelle 5-3: Übersicht der im Rahmen der Simulation veränderten SBA-Parameter

5.2.7 Anzahl der Simulationsläufe

Die Anzahl der erforderlichen Simulationsläufe wurde im Rahmen einer Poweranalyse entsprechend den Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation (FGSV 2006) separat für die Simulationsstrecken „Harmonisierung“ und „Stauwarnung“ berechnet (Gl. 5-3).

$$n_{Sim} = \frac{t(\alpha, n_{Sim} - 1)^2 \cdot s^2}{C^2} \quad (5\text{-}3)$$

mit:

n_{Sim}	=	Anzahl der erforderlichen Simulationsläufe	[-]
$t(\alpha, n-1)$	=	Wert aus der Student-Verteilung für die Wahrscheinlichkeit eines einseitigen Fehlers	[-]
s	=	Standardabweichung der untersuchten Kenngröße aus der Voruntersuchung (n_{Sim}=10)	[s]
C	=	Maximales Konfidenzintervall	[s]

Basierend auf einem Ausgangswert von n = 10 Simulationsdurchläufen wurde das Konfidenzintervall des arithmetischen Mittels jeder Zielgröße für ein Konfidenzniveau von 95 % bestimmt. Die in Tabelle 5-4 dargestellten Konfidenzintervalle wurden als Maxima im Rahmen der Simulationsstudie festgelegt. Nach erfolgter Simulation wurden die Konfidenzintervalle neu berechnet und in den Ergebnisboxplots mitdargestellt. In den meisten Fällen lagen die Konfidenzintervalle dabei deutlich unter den angestrebten Werten.

Zielgröße	**Konfidenzniveau**	**Maximales Konfidenzintervall**
Mittlere Geschwindigkeit	95 %	2,0 km/h
Standardabweichung der mittleren Geschwindigkeit	95 %	1,0 km/h
Anteil Time To Collision (TTC) < 2 s	95 %	0,1 %

Tabelle 5-4: Festgelegte Höchstwerte der Konfidenzintervalle im Rahmen der Simulation

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Modellstrecke „Harmonisierung“

Einfluss des AQ-Abstands

Abbildung 5-9 zeigt den Einfluss des AQ-Abstands auf die mittlere Kfz-Geschwindigkeit und die zugehörige Standardabweichung sowie den Anteil der Zeitschritte, in denen die TTC < 2 s war.

Für die zweistreifige Untersuchungsstrecke zeigt sich eine geringfügige Abnahme der mittleren Geschwindigkeit um weniger als 1 % je 500 m Abstand zwischen 500 und 2.000 m. Gleichzeitig steigt die Standardabweichung der Geschwindigkeiten um ca. 2 % je 500 m. Oberhalb eines AQ-Abstands von 2.000 m können keine Veränderungen der mittleren Geschwindigkeit und der Standardabweichung mehr festgestellt werden. Der Anteil der TTC < 2 s nimmt von 500 bis 3.000 m AQ-Abstand stetig um rund 2 % zu.

Während die mittlere Geschwindigkeit im Vergleichsfall ohne SBA um ca. 3 % über der mittleren Geschwindigkeit mit SBA liegt, liegen die Standardabweichungen der Geschwindigkeiten

um fast 14 % über dem Szenario mit SBA. Der Anteil der TTC < 2 s liegt für den Fall ohne SBA um mehr als 50 % über der Simulation mit SBA.

Für die dreistreifige Modellstrecke sind die Ergebnisse in Abbildung 5-10 vergleichbar mit denen der zweistreifigen Modellstrecke. Mit zunehmendem AQ-Abstand werden die Interquartilsabstände der Standardabweichungen der Geschwindigkeiten erkennbar größer. Die Differenzen zwischen den Anteilen der TTC < 2 s sind mit einer Zunahme von rund 3–6 % je 500 m AQ-Abstand etwas größer als im Fall der zweistreifigen Modellstrecke.

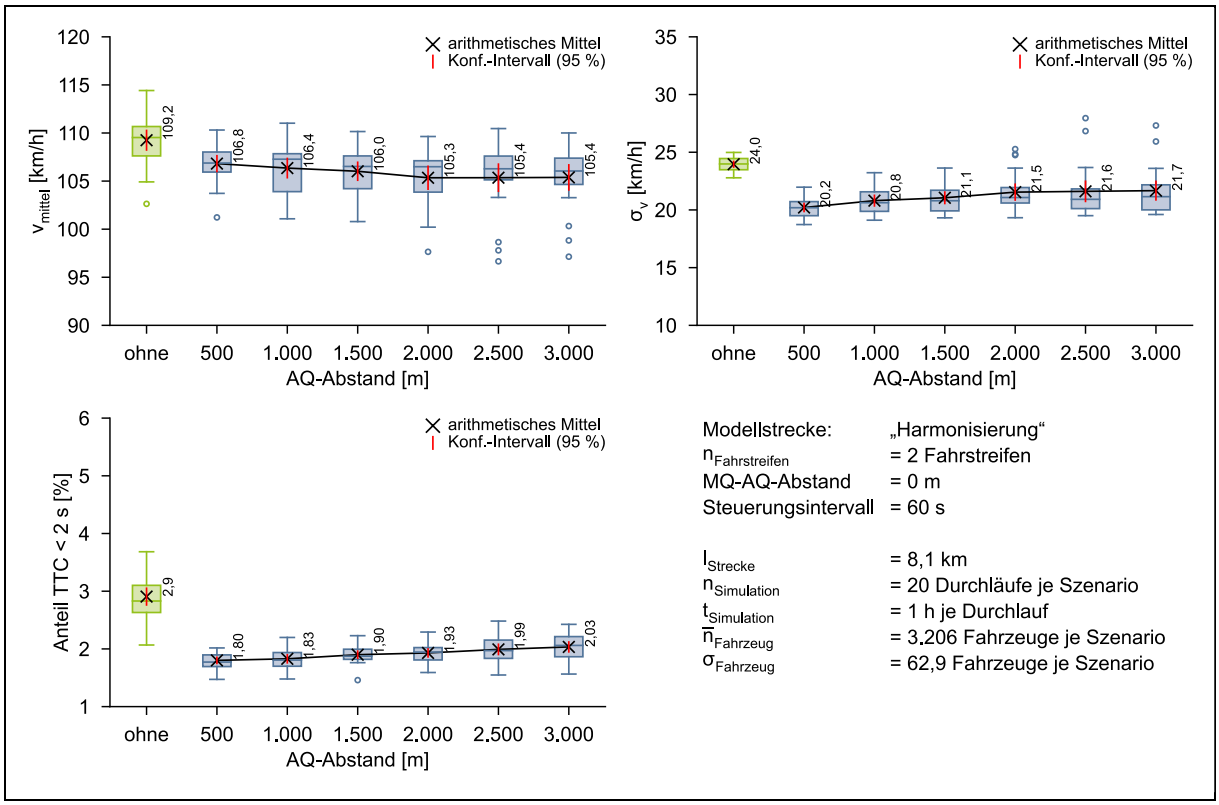


Abbildung 5-9: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Harmonisierung“ mit 2 Fahrstreifen nach AQ-Abstand

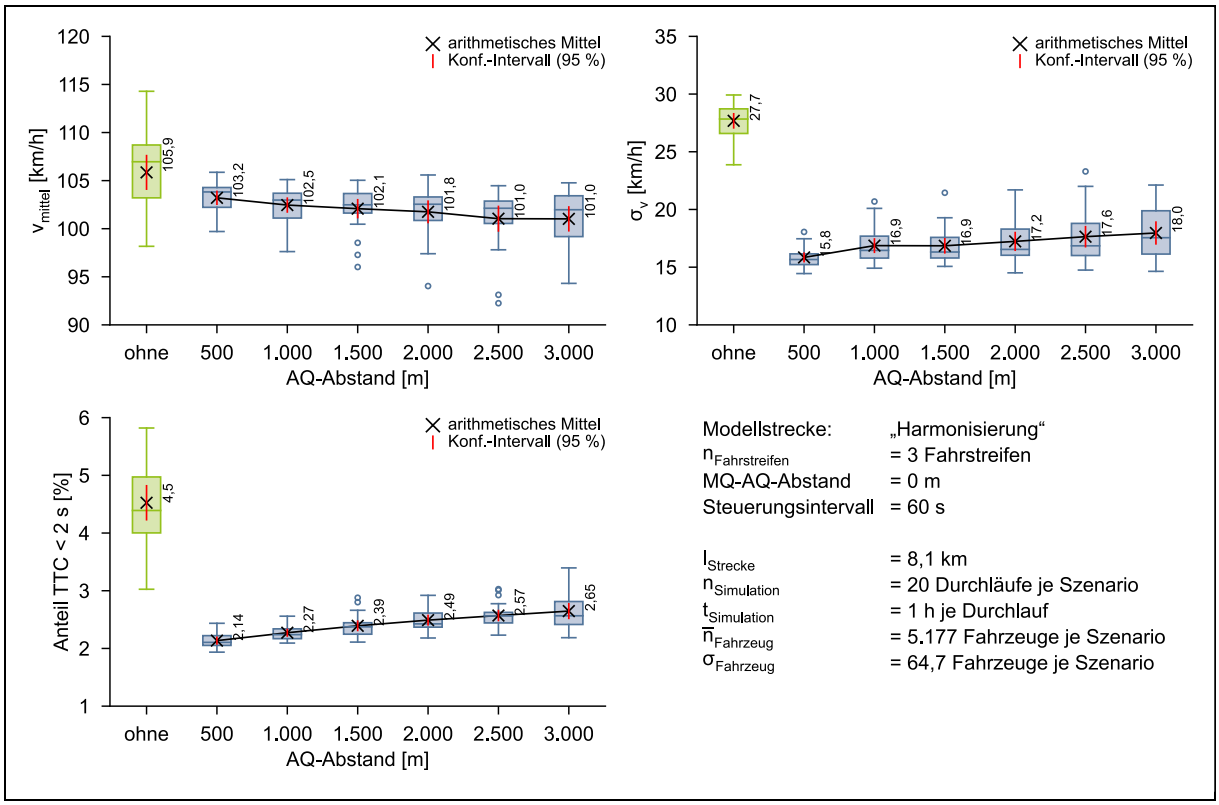


Abbildung 5-10: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Harmonisierung“ mit 3 Fahrstreifen nach AQ-Abstand

Einfluss des Steuerungsintervalls

Abbildung 5-11 stellt den Einfluss des Steuerungsintervalls auf die mittlere Kfz-Geschwindigkeit und die zugehörige Standardabweichung sowie den Anteil der Zeitschritte, in denen die TTC weniger als 2 Sekunden betrug, dar. Ausgehend von dem in der Praxis gängigen Steuerungsintervall 60 s ist ein deutliches Absinken der mittleren Geschwindigkeiten bei kleiner werdendem Steuerungsintervall erkennbar. Gleichzeitig steigt die Standardabweichung der Geschwindigkeiten. Für Steuerungsintervalle > 60 s ist fast kein Unterschied in der mittleren Geschwindigkeit und der zugehörigen Standardabweichung zum 60 s-Intervall erkennbar. In der Verteilung der Anteile der TTC < 2 s liegen die Ergebnisse für alle Steuerungsintervalle dicht beieinander.

Die Simulationsergebnisse der dreistreifigen Modellstrecke (Abbildung 5-12) sind mit den Ergebnissen für die zweistreifige Modellstrecke vergleichbar.

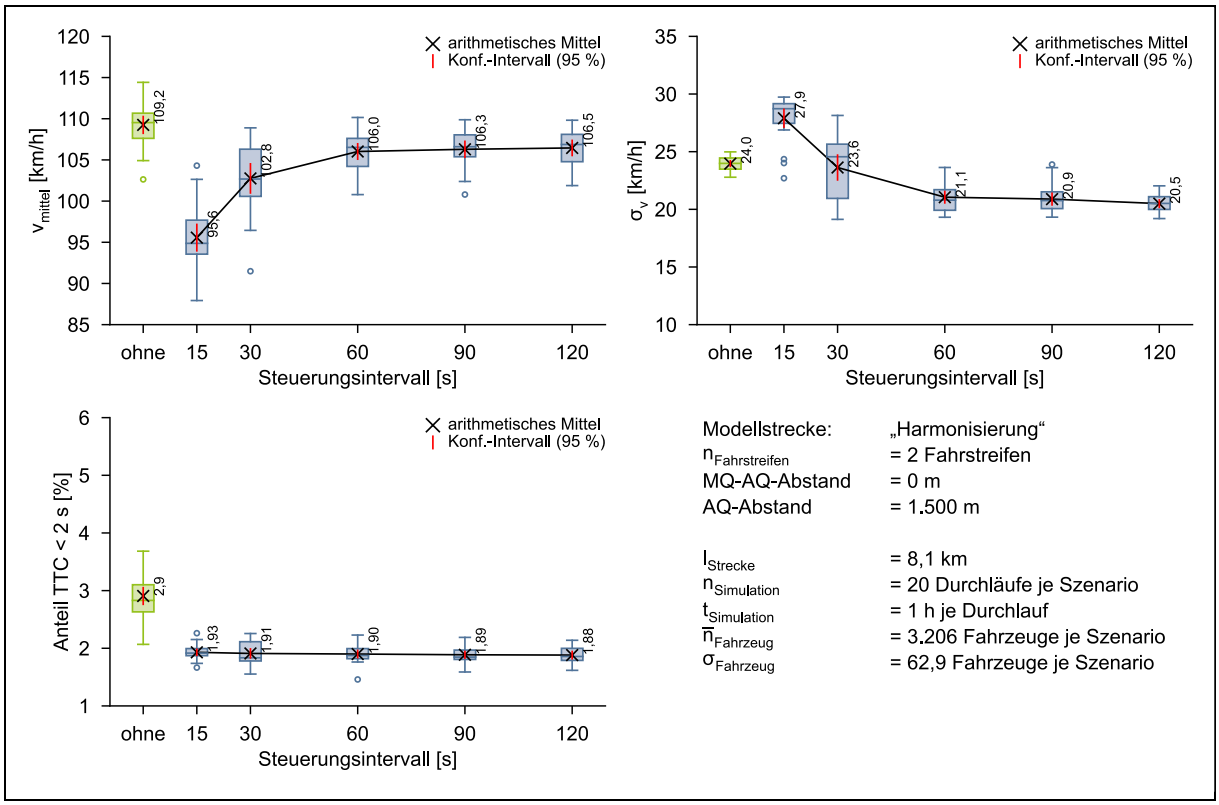


Abbildung 5-11: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Harmonisierung“ mit 2 Fahrstreifen nach Steuerungsintervall

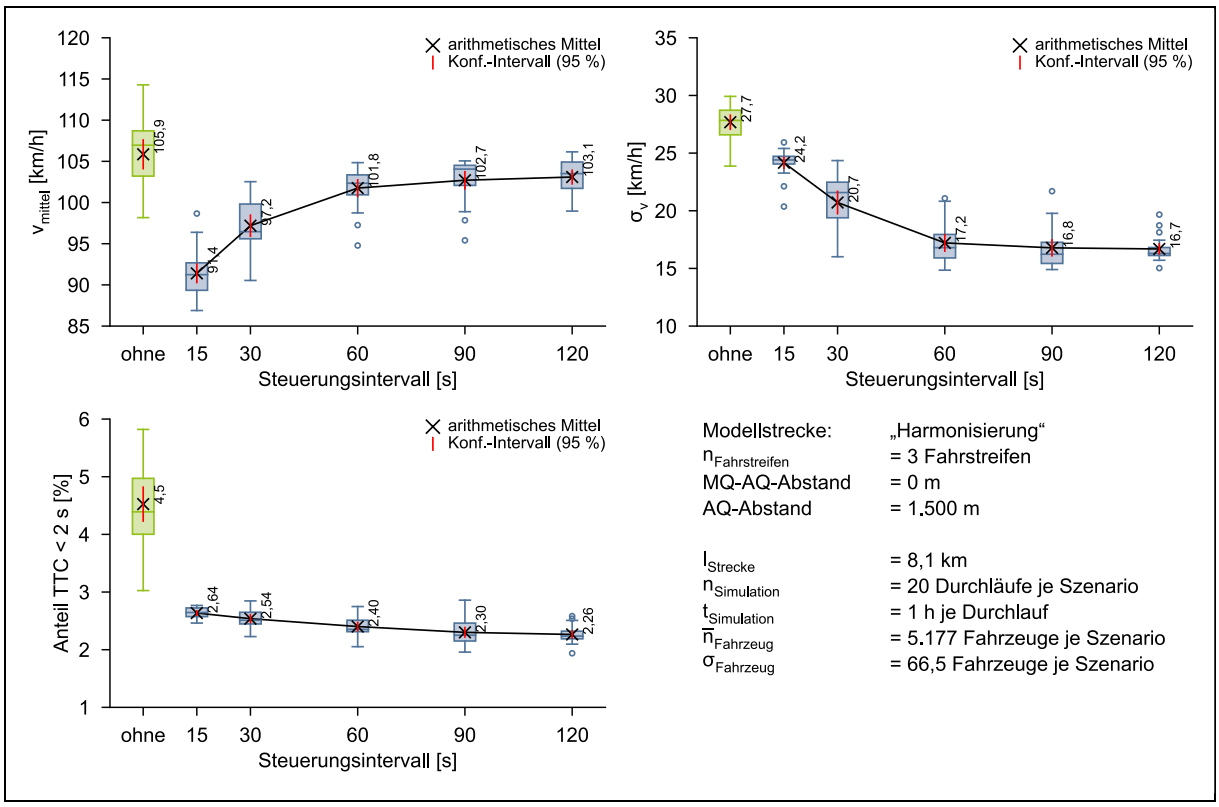


Abbildung 5-12: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Harmonisierung“ mit 3 Fahrstreifen nach Steuerungsintervall

Einfluss des MQ-AQ-Abstands

Abbildung 5-13 zeigt die Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Harmonisierung“ mit zwei Fahrstreifen in Abhängigkeit vom MQ-AQ-Abstand. Unabhängig davon, ob sich der MQ stromaufwärts (negativer MQ-AQ-Abstand) oder stromabwärts (positiver MQ-AQ-Abstand) vom AQ befindet, bleiben die Mediane der mittleren Geschwindigkeiten im Ergebnis vergleichbar, die Ausreißer nach unten nehmen mit steigendem Abstand zum AQ etwas zu. Für die Standardabweichungen der Geschwindigkeiten wurden um ca. 5 % niedrigere Ergebnisse gemessen, wenn der MQ stromabwärts des AQ liegt. Zudem gibt es einige Ausreißer nach oben für den Fall, dass der MQ mehr als 200–400 m entfernt stromaufwärts vom AQ liegt. Der Anteil an Simulationsintervallen mit einer TTC < 2 s nimmt mit größer werdendem Abstand vom MQ zum AQ stetig, aber geringfügig um bis zu 7 % (stromabwärts) bzw. 11 % (stromaufwärts) zu.

Für die dreistreifige Modellstrecke sind die in Abbildung 5-14 dargestellten Ergebnisse der TTC vergleichbar. Die mittleren Geschwindigkeiten und die zugehörige Standardabweichung liegen für eine Lage des MQ stromabwärts des AQ – wie bei der zweistreifigen Modellstrecke – wenige Prozentpunkte unter den Werten für eine Lage des MQ stromaufwärts des AQ. Die Ausreißer in der Standardabweichung der Geschwindigkeiten sind erkennbar schwächer ausgeprägt als bei der zweistreifigen Modellstrecke.

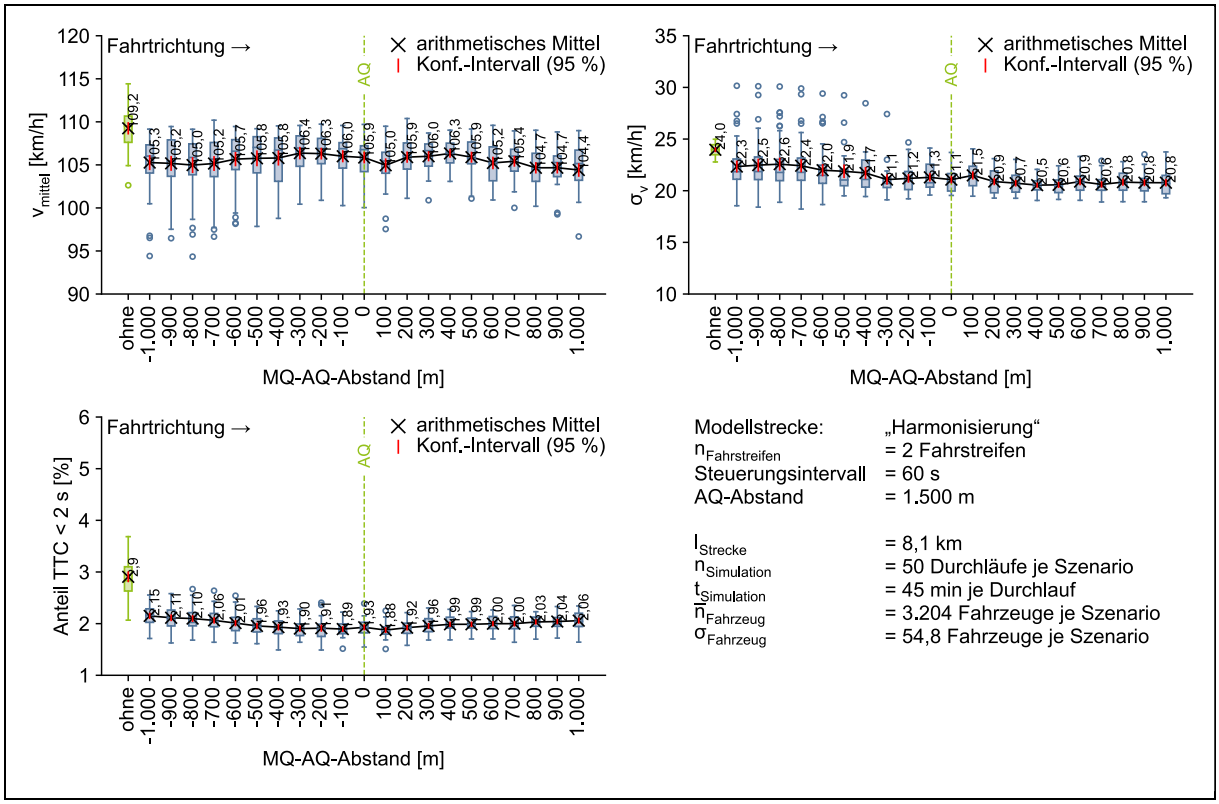


Abbildung 5-13: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Harmonisierung“ mit 2 Fahrstreifen nach MQ-AQ-Abstand

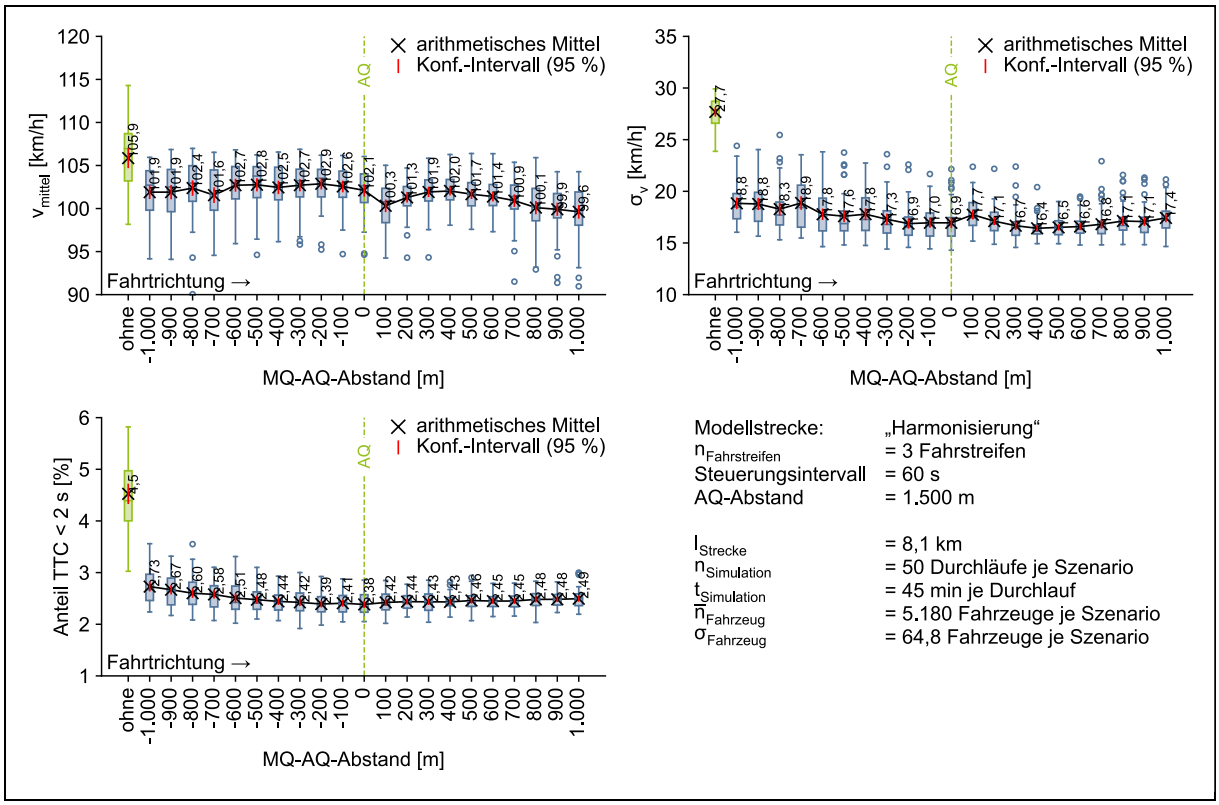


Abbildung 5-14: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Harmonisierung“ mit 3 Fahrstreifen nach MQ-AQ-Abstand

5.3.2 Modellstrecke „Stauwarnung“

Einfluss des AQ-Abstands

Abbildung 5-15 zeigt den Einfluss des AQ-Abstands auf die Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Stauwarnung“. Die mittleren Geschwindigkeiten nehmen mit größer werdendem AQ-Abstand stetig ab, gleichzeitig sinken auch die zugehörigen Standardabweichungen deutlich. Die Ergebnisse sind auf das in der Simulation idealisierte Befolgungsverhalten von Geschwindigkeitsbeschränkungen zurückzuführen. Ein großer AQ-Abstand führt in Kombination mit der guten Befolgung dazu, dass über größere Distanzen im Zulauf zum Stauende niedrigere Geschwindigkeiten mit geringeren Standardabweichungen gefahren werden. Interessant ist in diesem Zusammenhang das Ergebnis für die Anteile von Simulationsschritten mit einer TTC < 2 s: Der Anteil schwankt geringfügig mit Abweichungen von höchstens 9 % je 500 m ohne klare Tendenz. Dies bedeutet, dass im Fahrverhaltensmodell der Simulation Fahrzeuge mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h ohne kritische Zeitlücken am Stauende abbremsen können.

Während die mittlere Geschwindigkeit im Vergleichsfall ohne SBA um bis zu 25 % über der mittleren Geschwindigkeit mit SBA liegt, sind die zugehörigen Standardabweichungen um bis zu 17 % geringer als im Szenario ohne SBA. Der Anteil der TTC < 2 s ist für die Fälle ohne und mit SBA vergleichbar.

Die Ergebnisse für die dreistreifige Modellstrecke in Abbildung 5-16 sind vergleichbar mit den Ergebnissen für die zweistreifige Modellstrecke. Erwähnenswert sind jedoch die abweichenden Ergebnisse für den Simulationsfall ohne SBA, bei dem die mittleren Geschwindigkeiten

und Standardabweichungen unter den Werten für die zweistreifige Strecke und damit häufig auch unter den entsprechenden Werten aus den Simulationsszenarien mit SBA liegen.

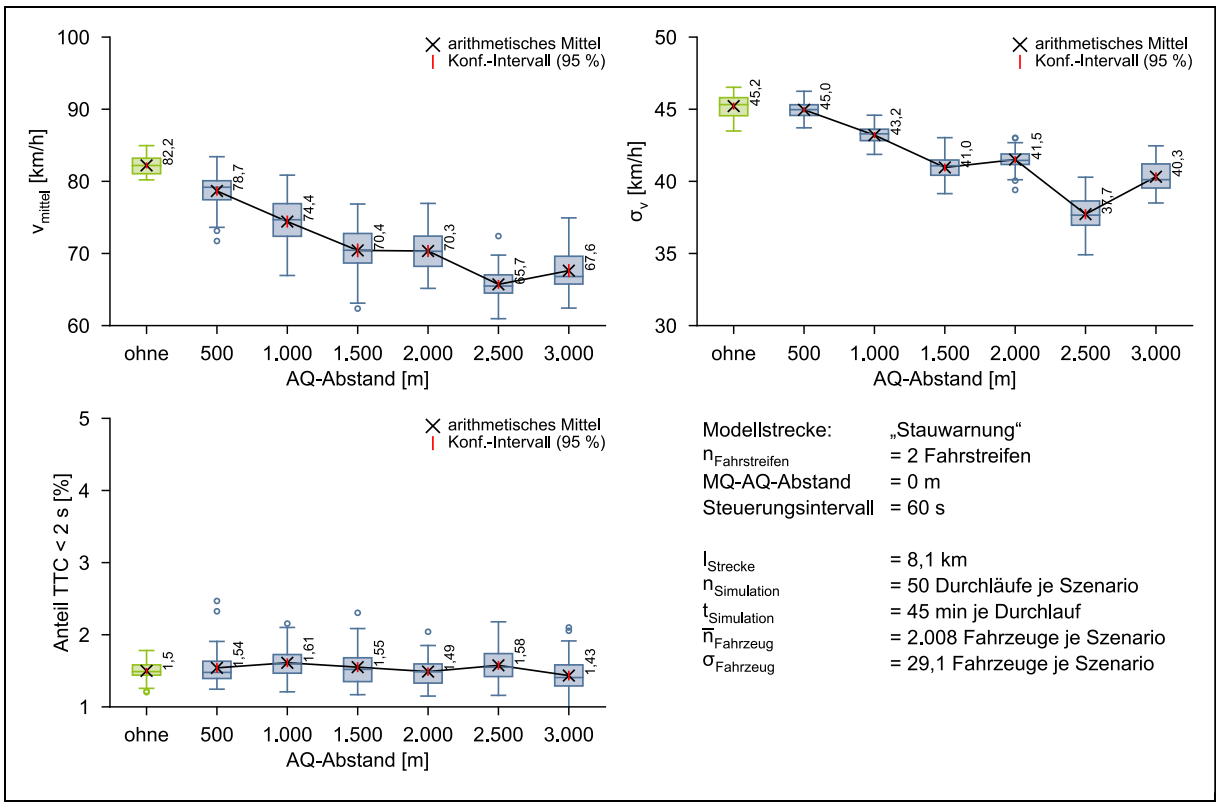


Abbildung 5-15: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Stauwarnung“ mit 2 Fahrstreifen nach AQ-Abstand

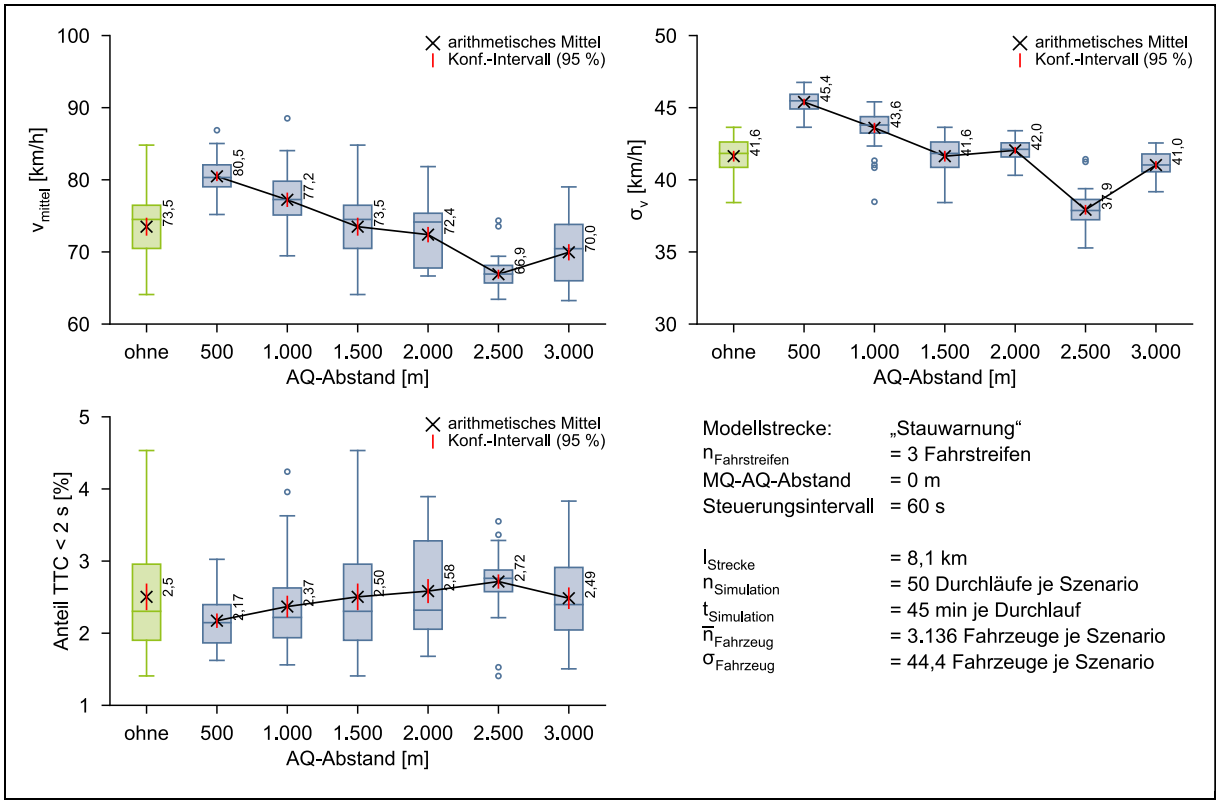


Abbildung 5-16: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Stauwarnung“ mit 3 Fahrstreifen nach AQ-Abstand

Einfluss des Steuerungsintervalls

Abbildung 5-17 zeigt den Einfluss des Steuerungsintervalls auf die mittlere Kfz-Geschwindigkeit und die zugehörige Standardabweichung sowie den Anteil der Zeitschritte, in denen die TTC < 2 s war. Die Ergebnisse sind konträr zu denen aus der Modellstrecke „Harmonisierung“. Ausgehend von dem in der Praxis gängigen Steuerungsintervall 60 s ist eine deutliche Zunahme der mittleren Geschwindigkeiten bei kleiner werdendem Steuerungsintervall erkennbar, gleichzeitig sinkt die Standardabweichung der Geschwindigkeiten. Für die Steuerungsintervalle > 60 s ist der Effekt vergleichbar, aber deutlich weniger stark ausgeprägt. In der Verteilung der Anteile der TTC < 2 s sind die Ergebnisse für alle Steuerungsintervalle unstet, aber nah beieinander.

Die Ergebnisse für die dreistreifige Modellstrecke (Abbildung 5-18) sind nahezu identisch zu den Ergebnissen für die zweistreifige Modellstrecke.

Die Ergebnisse für den Einfluss des Steuerungsintervalls für die Modellstrecke „Stauwarnung“ sind kritisch zu betrachten.

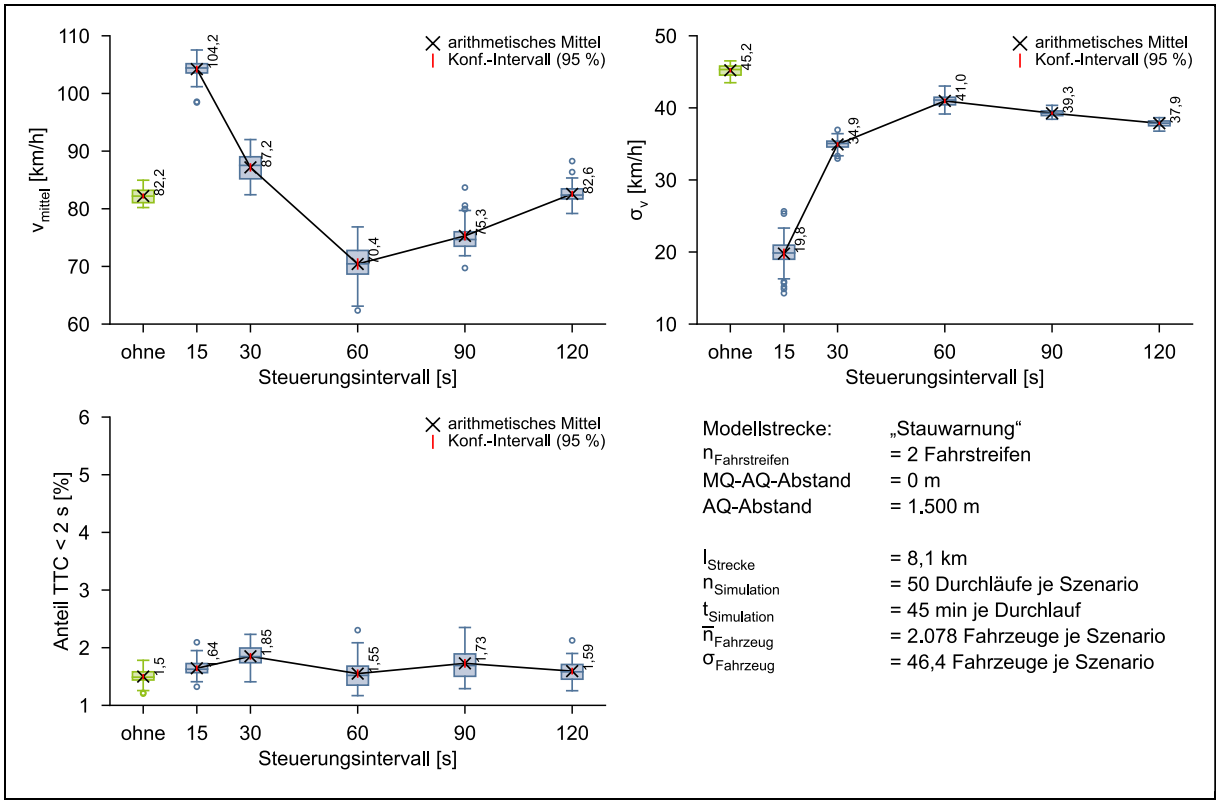


Abbildung 5-17: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Stauwarnung“ mit 2 Fahrstreifen nach Steuerungsintervall

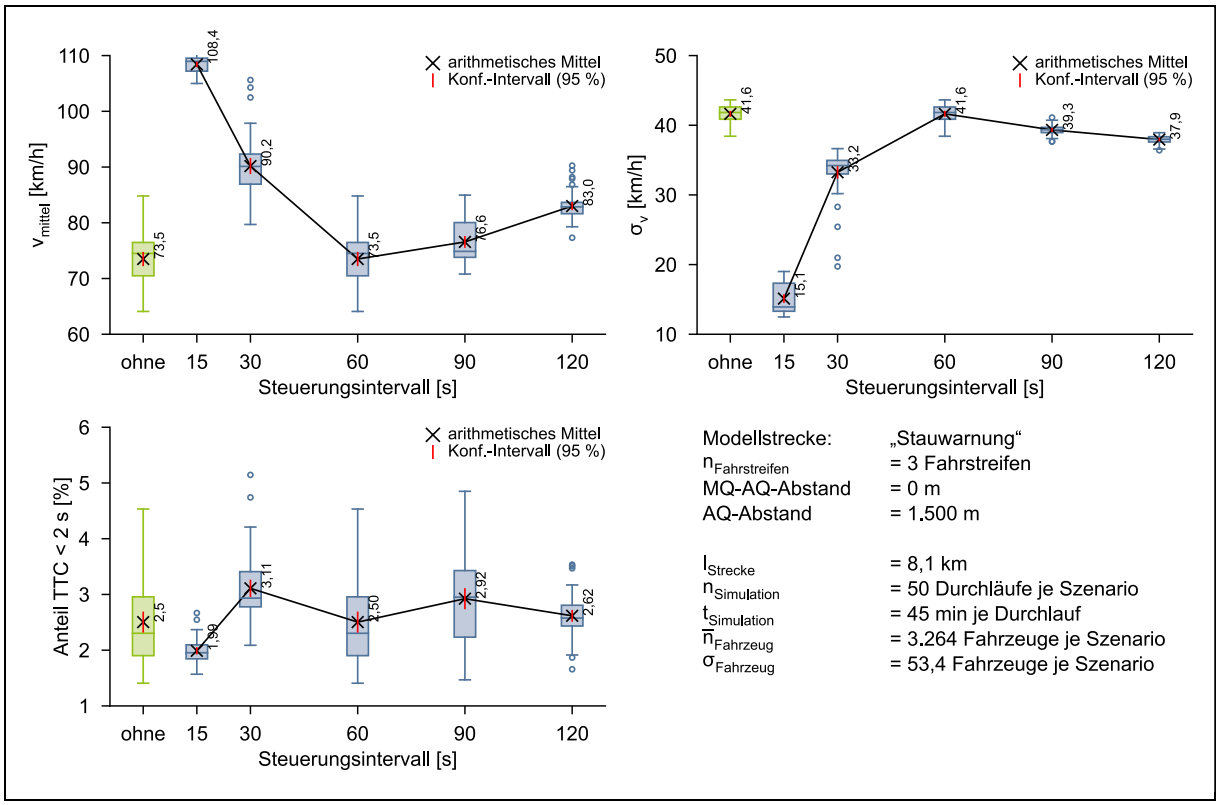


Abbildung 5-18: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Stauwarnung“ mit 3 Fahrstreifen nach Steuerungsintervall

Einfluss des MQ-AQ-Abstands

Abbildung 5-19 zeigt die Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Stauwarnung“ mit zwei Fahrstreifen in Abhängigkeit vom MQ-AQ-Abstand. Die Mediane der mittleren Geschwindigkeiten nehmen mit zunehmendem MQ-Abstand stromabwärts (positiver MQ-AQ-Abstand) ab, gleichzeitig sinken die Standardabweichungen. Tendenziell ist der Anteil an Simulationsintervallen mit einer TTC < 2 s etwas geringer, wenn der MQ stromabwärts des AQ liegt.

Die Ergebnisse für die dreistreifige Modellstrecke (Abbildung 5-20) sind vergleichbar mit den Ergebnissen für die zweistreifige Modellstrecke.

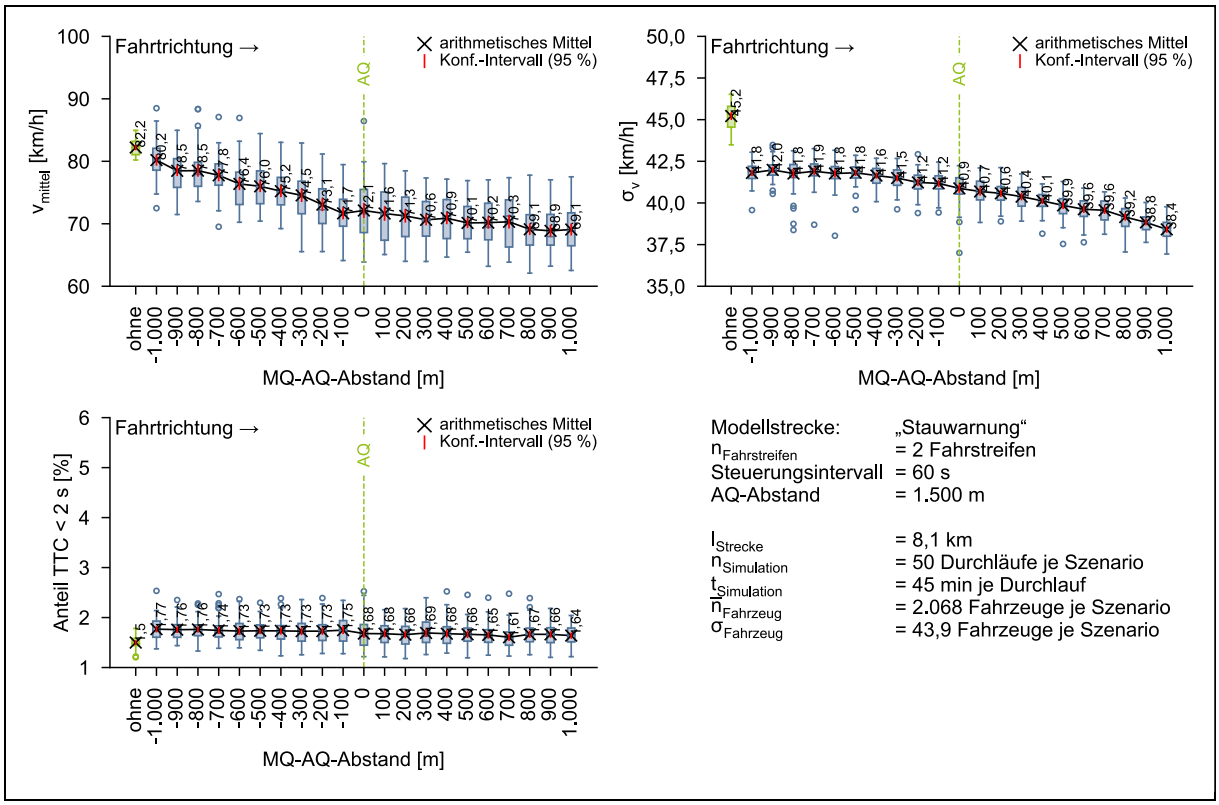


Abbildung 5-19: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Stauwarnung“ mit 2 Fahrstreifen in Abhängigkeit vom MQ-AQ-Abstand

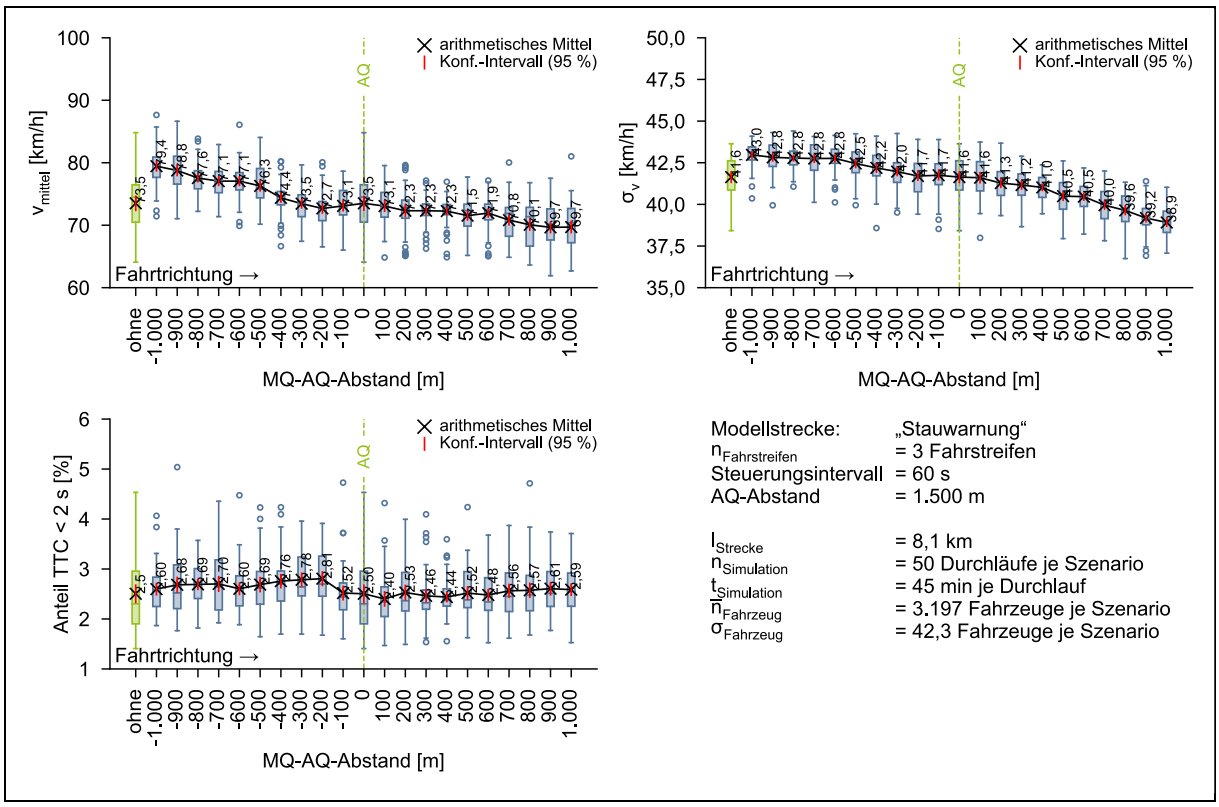


Abbildung 5-20: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Stauwarnung“ mit 3 Fahrstreifen in Abhängigkeit vom MQ-AQ-Abstand

6 Modell zur Wirkfeldanalyse von Stauwarnungen

6.1 Motivation

Weder für die Geschwindigkeitswahl noch für die Befolgung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit konnte im Rahmen der empirischen Analysen eine statistische Korrelation zum AQ-Abstand festgestellt werden. In der Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens über die Distanz zwischen zwei AQ zeigten sich heterogene Ergebnisse hinsichtlich der Geschwindigkeitswahl und der Streuung der Geschwindigkeiten über den Weg. Auch in der Simulation zeigten sich nur geringe Auswirkungen des AQ-Abstands auf die mittleren Geschwindigkeiten und die Standardabweichungen der mittleren Geschwindigkeiten. Da demnach nicht von einem wesentlichen Einfluss der AQ-Abstände auf die Wirkung einer SBA auf den Verkehrsablauf auszugehen ist, entfällt eine volkswirtschaftliche Bewertung anhand von verkehrstechnischen Kriterien.

Die Analyse der Wirkung von unterschiedlichen AQ-Abständen auf die Verkehrssicherheit war nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Ein nachweisbarer Einfluss unterschiedlicher AQ-Abstände auf die Unfallkenngrößen entlang einer Strecke würde eine volkswirtschaftliche Bewertung durch die Gegenüberstellung von Veränderungen der Investitionskosten und der Unfallkosten ermöglichen. Sicherheitswirkungen von SBA – etwa durch Stauwarnungen – können ggf. auch dann erreicht werden, wenn eine Befolgung der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkung ausbleibt: Ein Verkehrsteilnehmender, der einen AQ mit Stauwarnung passiert, fährt möglicherweise aufmerksamer und mit erhöhter Bremsbereitschaft, ohne seine Geschwindigkeit unmittelbar anzupassen. Nachfolgend wird ein Modell vorgestellt, mit dessen Hilfe für verschiedene SBA-Konfigurationen und Verkehrseigenschaften (Wirkfelder) die theoretische Anzahl von Fahrzeugen berechnet werden kann, welche bei einem Stauereignis durch die Gefahrenwarnung einer SBA nicht mehr rechtzeitig gewarnt werden können.

6.2 Beschreibung und Funktionsweise

Das Modell enthält folgende sieben Eingangsparameter:

- Mittlerer AQ-Abstand Δs_{AQ}
- Mittlerer MQ-Abstand Δs_{AQ}
- Mittlere Stauausbreitungsgeschwindigkeit (entgegen der Fahrtrichtung) v_{Stau}
- Mittlere Kfz-Geschwindigkeit v_{Kfz}
- Mittlere Kfz-Verkehrsstärke q_{Kfz}
- SBA-Messintervall MI
- SBA-Verarbeitungszeit VZ

Der mittlere AQ-Abstand beschreibt die durchschnittliche Distanz zwischen zwei AQ entlang der SBA, der mittlere MQ-Abstand analog dazu die Distanz zwischen zwei MQ. Eine Modellvoraussetzung ist, dass der mittlere MQ-Abstand den mittleren AQ-Abstand nicht übersteigt. Dieser Einschränkung liegt die Annahme zugrunde, dass jeder AQ gleichzeitig immer auch über mindestens einen zugehörigen MQ verfügt. Das SBA-Messintervall ist die Zeiteinheit, über die in einer SBA MQ-Daten aggregiert werden, um anschließend ausgewertet zu werden. Gängige Messintervalle sind 1-Minuten-Intervalle, welche auch die Grundlage für die im MARZ

(2018) empfohlenen Steuerungsalgorithmen für SBA darstellen, sowie 15-Sekunden-Intervalle in einigen modernen Anlagen. Die Verarbeitungszeit beschreibt die Dauer im Anschluss an ein Messintervall, welche benötigt wird, um die Daten an die Unterzentrale zu übermitteln (erste Signalverzögerung), dort zu sammeln (sog. Timeout), die Berechnungen der verwendeten Schaltalgorithmen durchzuführen, die Priorisierung zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Schaltalgorithmen durchzuführen (Berechnungsdauer) und das Ergebnis der Berechnung – ggf. in Form eines Schaltsignals – an den oder die betreffenden AQ zu übermitteln (zweite Signalverzögerung).

Eine schematische Darstellung der Funktionsweise des Modells ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Das Modell unterteilt den Zustand der Stauwarnung mittels SBA in die Phasen 0 bis 6.

6.2.1 Phase 0 und Phase 1

Phase 0 beschreibt den Zulauf zum späteren Stauende, bevor der Stau entstanden ist. Phase 1 beginnt mit dem ersten Fahrzeug, welches im Verlauf seiner Fahrt auf das Stauende treffen wird. Im Verlauf von Phase 1 beginnt die Stauentstehung. Der erste Phasenübergang zwischen Phase 0 und Phase 1 kann je nach vorherrschendem Verkehrszustand vor der Stauentstehung unterschiedlich verlaufen, im Wesentlichen können zwei Szenarien unterschieden werden:

1. Eine vorherrschende moderate Verkehrsbelastung unterhalb der Kapazitätsgrenze während Phase 0: Die Stauentstehung ist plötzlich (singuläres Stauereignis), der Beginn des Stauereignisses ist eindeutig definierbar, der Phasenübergang zwischen Phase 0 und Phase 1 ist trennscharf.
   Ein Beispiel für die beschriebene Situation ist die Entstehung eines Staus infolge eines Unfalls oder eines starken Bremsvorganges.
2. Eine vorherrschende hohe Verkehrsbelastung nahe der Kapazitätsgrenze während Phase 0: Der Stau entsteht über einen zusammenhängenden Streckenabschnitt, der genaue Zeitpunkt der Entstehung ist nicht ermittelbar, der Übergang zwischen Phase 0 und Phase 1 ist unscharf.
   Ein Beispiel für die genannte Situation ist der morgendliche Berufsverkehr im Zulauf zu einem Streckenengpass.

Zur Berücksichtigung diffuser Verkehrszustandsübergänge zwischen fließendem und gestautem Verkehr gilt es, mithilfe eines trennscharfen Staukriteriums – beispielsweise durch die Festlegung einer Grenzgeschwindigkeit – einen für den Phasenübergang im Modell eindeutigen Zeitpunkt t der Stauentstehung festzulegen. In Phase 1 nähern sich alle Fahrzeuge ungewarnt dem Stauende, weil der Stau bislang keinen MQ erreicht und folglich nicht detektiert werden konnte.

6.2.2 Phase 2

Phase 2 beginnt mit Erreichen des ersten, stromaufwärts der Stauentstehung gelegenen MQ durch das Stauende. Mit dem Zeitpunkt des Erreichens des MQ beginnt die Möglichkeit, innerhalb eines vollständig durchlaufenen Messintervalls das Stauende zu detektieren. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, ein bewegliches Stauende am MQ zu detektieren, wenn bereits ein Teil des aktuellen Messintervalls durchlaufen ist, sodass kein vollständiger Durchlauf

erforderlich ist. Umgekehrt besteht die Möglichkeit, dass ein bewegliches Stauende bei Erreichen des MQ nicht mehr über die übrige Zeit des Messintervalls detektiert werden kann, wodurch zur nächstmöglichen Detektion mehr Zeit vergeht als für das Durchlaufen eines einzigen Messintervalls. Unter Annahme einer Gleichverteilung der Zeitpunkte innerhalb eines laufenden Messintervalls, in denen ein Stauende den MQ erreicht, wird als Länge der Phase 2 die an der SBA verwendete Messintervalldauer angesetzt. In Phase 2 nähern sich alle Fahrzeuge ungewarnt dem Stauende, weil der Stau zwar den MQ erreicht hat, aber das Messintervall mit den zur Staudetektion erforderlichen Daten noch nicht vollständig durchlaufen ist. Die Phase 2 endet nach dem abgeschlossenen Messintervall.

6.2.3 Phase 3 und Phasenübergang zu Phase 4

Phase 3 beginnt mit dem Abschluss des Messintervalls, in dem Verkehrsdaten erfasst und aggregiert wurden, die die Kriterien für die Detektion eines Staus erfüllen. Die Phase 3 umfasst die Dauer, welche benötigt wird, um die über das Messintervall aggregierten Daten an die Unterzentrale zu übermitteln, dort zu sammeln, zu glätten sowie Berechnungen und Priorisierungen der verwendeten Schaltalgorithmen durchzuführen und das Ergebnis der Berechnung in Form eines Schaltsignals an den stromaufwärts gelegenen AQ zu übermitteln, um dort die Stauwarnung anzuzeigen. In Phase 3 nähern sich alle Fahrzeuge ungewarnt dem Stauende, weil die zur Detektion des Staus erforderlichen Daten zwar bereits an der Streckenstation vorliegen, der Schaltvorgang zur Stauwarnung aufgrund der Datenverarbeitungsdauer aber noch nicht durchgeführt wurde.

Der Phasenübergang zwischen Phase 3 und Phase 4 muss räumlich-zeitlich definiert werden. Auf Höhe des AQ_{n-1} endet die Phase 3 kurz vor dem ersten Schaltvorgang infolge der Staudetektion, gleichzeitig beginnt die Phase 4. Die Phase 4 betrachtet alle Fahrzeuge, welche ungewarnt auf das Stauende zufahren, weil sie sich entweder zeitlich nach der Anzeige der Stauwarnung am AQ_{n-1} bereits räumlich hinter dem AQ_{n-1} mit der angezeigten Warnung befinden oder weil sie sich zum Zeitpunkt der Anzeige räumlich hinter dem AQ_{n-1} befinden werden und die Warnung somit nicht mehr sehen. Die Phase 4 endet mit dem Erreichen des Stauendes durch das letzte ungewarnte Fahrzeug.

6.2.4 Phase 5

Mit Beginn der Phase 5 fahren keine Fahrzeuge mehr ungewarnt auf das Stauende zu. Die Phase 5 endet mit der Auflösung des Staus.

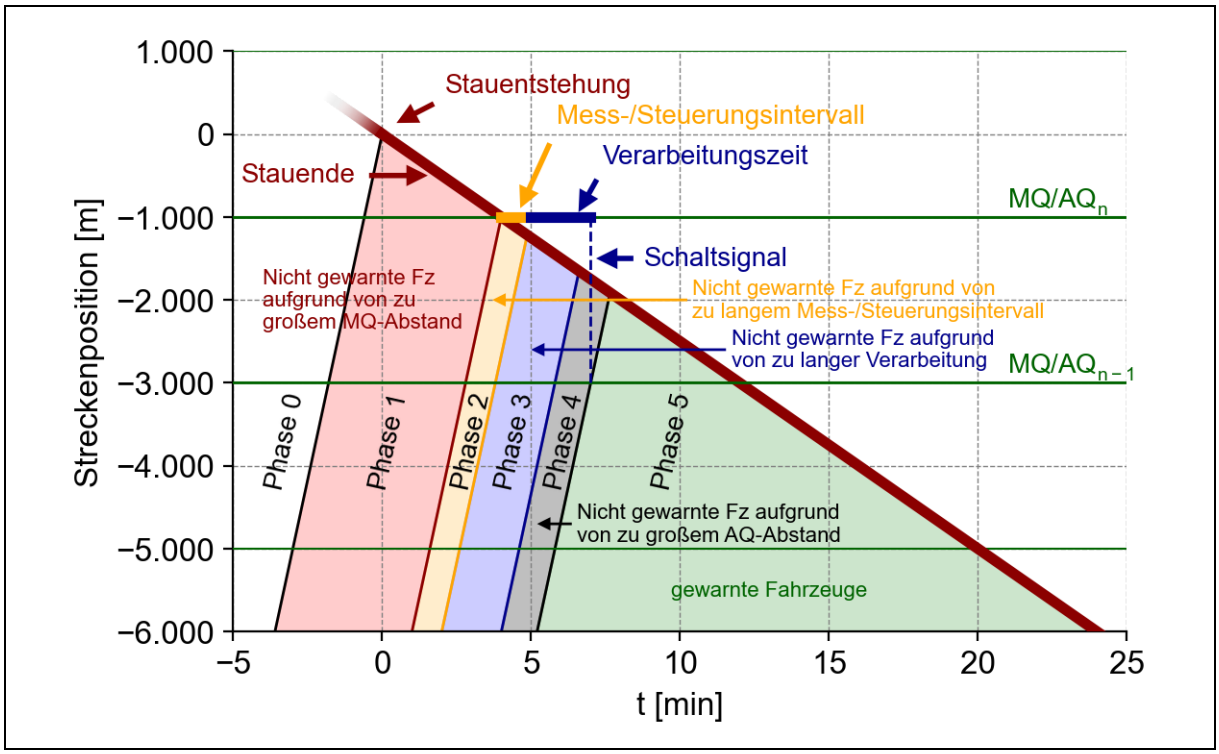


Abbildung 6-1: Schematische Darstellung des Stauwarnungsmodells

6.3 Verkehrsflusstheoretische Herleitung

Eine Modellvoraussetzung ist, dass der mittlere MQ-Abstand den mittleren AQ-Abstand nicht übersteigt. Dieser Einschränkung liegt die Annahme zugrunde, dass jeder AQ gleichzeitig immer auch über mindestens einen zugehörigen MQ verfügt. Bei der Position der Entstehung des Staus wird eine Gleichverteilung der Unfallentstehung zwischen zwei MQ/AQ angenommen. Der Versatz vom Stau bei Entstehung zum stromaufwärts folgenden AQ entspricht daher dem halben MQ-Abstand nach Gl. (6-1).

$$\Delta s_{Stau,AQn} = \frac{\Delta s_{MQ}}{2} \tag{6-1}$$

mit:

$\Delta s_{Stau,AQn}$ = Versatz des Staubeginns zum AQ_n [m]

Δs_{MQ} = Mittlerer MQ-Abstand [m]

Die Position des ersten und zweiten, stromaufwärts des Staubeginns befindlichen AQ ergibt sich anhand von Gl. (6-2) und Gl. (6-3).

$$s_{AQn} = s_{Stau} - \Delta s_{Stau,AQn} \tag{6-2}$$

mit:

s_{AQn} = Position des AQ_n [m]

s_{Stau} = Position des Staubeginns (s_{Stau} = 0) [m]

$$s_{AQn-1} = \Delta s_{Stau,AQn} - \Delta s_{AQ} \tag{6-3}$$

mit:

s_{AQn-1}	=	Position des AQ_{n-1}	[m]
Δs_{AQ}	=	Mittlerer AQ-Abstand	[m]

Der Zeitpunkt, zu dem das Stauende den ersten AQ (oder MQ) erreicht, wird mithilfe von Gl. (6-4) berechnet. Der Zeitpunkt markiert das Ende der Phase 1.

$$t_{Stau,AQn} = \frac{s_{AQn}}{-v_{Stau} \cdot \frac{60}{3,6}} \tag{6-4}$$

mit:

$t_{Stau,AQn}$	=	Zeitpunkt, zu dem das Stauende den AQn erreicht	[min]
s_{AQn}	=	Position des AQn	[m]
v_{Stau}	=	Geschwindigkeit der Stauausbreitung	[km/h]

Mithilfe von Gl. (6-5) wird der Zeitpunkt bestimmt, an dem das erste Messintervall abgeschossen ist (Ende der Phase 2).

$$t_{Mess,E} = \frac{s_{AQn}}{-v_{Stau} \cdot \frac{60}{3,6}} + MI \tag{6-5}$$

mit:

$t_{Mess,E}$	=	Zeitpunkt, zu dem das Messintervall abgeschlossen ist	[min]
MI	=	Messintervall	[min]

Nach Abschluss des Messintervalls folgt die Verarbeitungszeit durch die SBA. Der Zeitpunkt des Abschlusses der Verarbeitungszeit und der Moment der ersten angezeigten Stauwarnung ergibt sich nach Gl. (6-6).

$$t_{Verarb,E} = \frac{s_{AQn}}{-v_{Stau} \cdot \frac{60}{3,6}} + MI + VZ \tag{6-6}$$

mit:

$t_{Verarb,E}$	=	Zeitpunkt des Abschlusses der Signalverarbeitung	[min]
VZ	=	Durchschnittliche Dauer der Datenverarbeitungszeit	[min]

Mit den zuvor bestimmten Zeitpunkten nach Entstehung des Staus können zusammen mit der Weg-Zeit-Funktion der Kfz die Zeitpunkte von fünf theoretischen Fahrzeugen ermittelt werden, welche sich in den Phasenübergängen 0–5 auf der Höhe des AQ_{n-1} befanden. (vgl. Abbildung 6-1). Die Zeitpunkte berechnen sich nach Gl. (6-7) bis Gl. (6-11).

$$t_{FZ1,AQn-1} = \frac{s_{AQn-1}}{v_{Kfz} \cdot \frac{60}{3,6}} \tag{6-7}$$

mit:

$t_{FZ1,AQn-1}$ = Zeitpunkt, zu dem das erste theoretische Fahrzeug den AQ_{n-1} passiert [min]

v_{Kfz} = Mittlere Kfz-Geschwindigkeit [km/h]

$$t_{FZ2,AQn-1} = \frac{3,6}{60} \cdot \left(\frac{s_{AQn-1} + \Delta s_{Stau,AQn}}{v_{Kfz}} - \frac{s_{AQn}}{v_{Stau}} \right) \tag{6-8}$$

mit:

$t_{FZ2,AQn-1}$ = Zeitpunkt, zu dem das zweite theoretische Fahrzeug den AQ_{n-1} passiert [min]

$$t_{FZ3,AQn-1} = \frac{3,6}{60} \cdot \left(\frac{s_{AQn-1} + \Delta s_{Stau,AQn}}{v_{Kfz}} - \frac{s_{AQn}}{v_{Stau}} \right) + MI \tag{6-9}$$

mit:

$t_{FZ3,AQn-1}$ = Zeitpunkt, zu dem das dritte theoretische Fahrzeug den AQ_{n-1} passiert [min]

$$t_{FZ4,AQn-1} = \frac{3,6}{60} \cdot \left(\frac{s_{AQn-1} + \Delta s_{Stau,AQn}}{v_{Kfz}} - \frac{s_{AQn}}{v_{Stau}} \right) + MI + VZ \tag{6-10}$$

mit:

$t_{FZ4,AQn-1}$ = Zeitpunkt, zu dem das vierte theoretische Fahrzeug den AQ_{n-1} passiert [min]

$$t_{FZ5,AQn-1} = \frac{s_{AQn}}{-v_{Stau} \cdot \frac{60}{3,6}} + MI + VZ \tag{6-11}$$

mit:

$t_{FZ5,AQn-1}$ = Zeitpunkt, zu dem das fünfte und letzte theoretische Fahrzeug den AQ_{n-1} passiert [min]

Mittels Gl. (6-12) bis Gl. (6-15) wird anhand der durchschnittlichen Verkehrsstärke die Anzahl der Fahrzeuge berechnet, welche zwischen den zuvor in Gl. (6-7) bis Gl. (6-11) berechneten Zeitpunkten den AQ_{n-1} passiert haben und ohne Warnung auf das Stauende zufahren.

$$n_{FZ,ng,\Delta MQ} = (t_{FZ2,AQn} - t_{FZ1,AQn}) \cdot \frac{q_{Kfz}}{60} \tag{6-12}$$

mit:

$n_{FZ,ng,\Delta MQ}$ = Anzahl nicht gewarnter Fahrzeuge aufgrund des MQ-Abstands [-]

q_{Kfz} = Mittlere Kfz-Verkehrsstärke [Kfz/h]

$$n_{FZ,ng,Mess} = (t_{FZ3,AQn-1} - t_{FZ2,AQn-1}) \cdot \frac{q_{Kfz}}{60} \quad (6\text{-}13)$$

mit:

$n_{FZ,ng,Mess}$ = Anzahl nicht gewarnter Fahrzeuge über die Dauer des Messintervalls [-]

$$n_{FZ,ng,Verarb} = (t_{FZ4,AQn} - t_{FZ3,AQn}) \cdot \frac{q_{Kfz}}{60} \quad (6\text{-}14)$$

mit:

$n_{FZ,ng,Verarb}$ = Anzahl nicht gewarnter Fahrzeuge über die Dauer der Verarbeitungszeit [-]

$$n_{FZ,ng,\Delta AQ} = (t_{FZ5,AQn} - t_{FZ4,AQn}) \cdot \frac{q_{Kfz}}{60} \quad (6\text{-}15)$$

mit:

$n_{FZ,ng,\Delta AQ}$ = Anzahl nicht gewarnter Fahrzeuge aufgrund des AQ-Abstands [-]

Die Gesamtanzahl nicht gewarnter Fahrzeuge ergibt sich als Summe der über die jeweilige Phase nicht gewarnten Fahrzeuge nach Gl. (6-16).

$$n_{FZ,ng,ges} = \sum_i n_{FZ,ng,i} = n_{FZ,ng\Delta MQ} + n_{FZ,ng,Mess} + n_{FZ,ng,Verarb} + n_{FZ,ng,\Delta AQ} \quad (6\text{-}16)$$

mit:

$n_{FZ,ng,ges}$ = Gesamtanzahl nicht gewarnter Fahrzeuge [-]

Soll lediglich die Gesamtanzahl nicht gewarnter Fahrzeuge ermittelt werden, dann kann zur Berechnung die Kurzform der Gl. (6-16) entsprechend Gl. (6-17) verwendet werden:

$$n_{FZ,ng,ges} = \left(\frac{3,6}{60} \cdot \left(\frac{s_{AQn}}{-v_{Stau}} - \frac{s_{AQn-1}}{v_{Kfz}} \right) + MI + VZ \right) \cdot \frac{q_{Kfz}}{60} \quad (6\text{-}17)$$

6.4 Beispielergebnisse

6.4.1 Anwendungsbeispiele

Abbildung 6-2 zeigt die Anwendung des in Kapitel 6 vorgestellten Modells zur Wirkfeldanalyse von Stauwarnungen am Beispiel eines theoretischen Staus mit schneller Ausbreitungsgeschwindigkeit, z. B. infolge eines Unfallereignisses. Dargestellt sind variierende MQ- sowie AQ-Abstände bei ansonsten gleichbleibenden Modellparametern. Für die Ausgangskonfiguration mit je 2.500 m MQ- und AQ-Abstand (Abbildung 6-2 oben links) ist ein breiter Zeitraum bis zur möglichen Detektion des Staus erkennbar, in dem die Fahrzeuge ungewarnt mit einer mittleren Geschwindigkeit von 100 km/h auf das Stauende zufahren (roter Bereich). Der graue Bereich stellt den Zeitraum dar, über den der Stau bereits detektiert ist, einige Fahrzeuge aufgrund des AQ-Abstands jedoch nicht mehr rechtzeitig gewarnt werden können. Mit Verringerung der MQ/AQ-Abstände ist insbesondere eine deutliche Verkürzung des roten Bereichs zu erkennen. Eine Verkürzung des MQ- und des AQ-Abstands von jeweils 2.500 m auf 1.500 m reduziert die Anzahl der nicht vor dem Stau gewarnten Fahrzeuge in diesem theoretischen Szenario um 193 Fz. Ein fast identischer Effekt kann durch die Halbierung des MQ-Abstands von 2.500 auf 1.250 m bei gleichbleibendem AQ-Abstand von 2.500 m erreicht werden (191 Fz). Wird der MQ-Abstand von 2.500 m auf 500 m verkürzt, reduziert sich – bei gleichbleibend großem AQ-Abstand von 2.500 m – die Anzahl der nicht gewarnten Fahrzeuge um 306 Fz.

Die Ergebnisse deuten auf einen Effekt hin, der in Abbildung 6-3 sichtbarer wird: Die Anzahl der nicht gewarnten Fahrzeuge hängt in größerem Maße mit dem mittleren MQ-Abstand als mit dem mittleren AQ-Abstand zusammen.

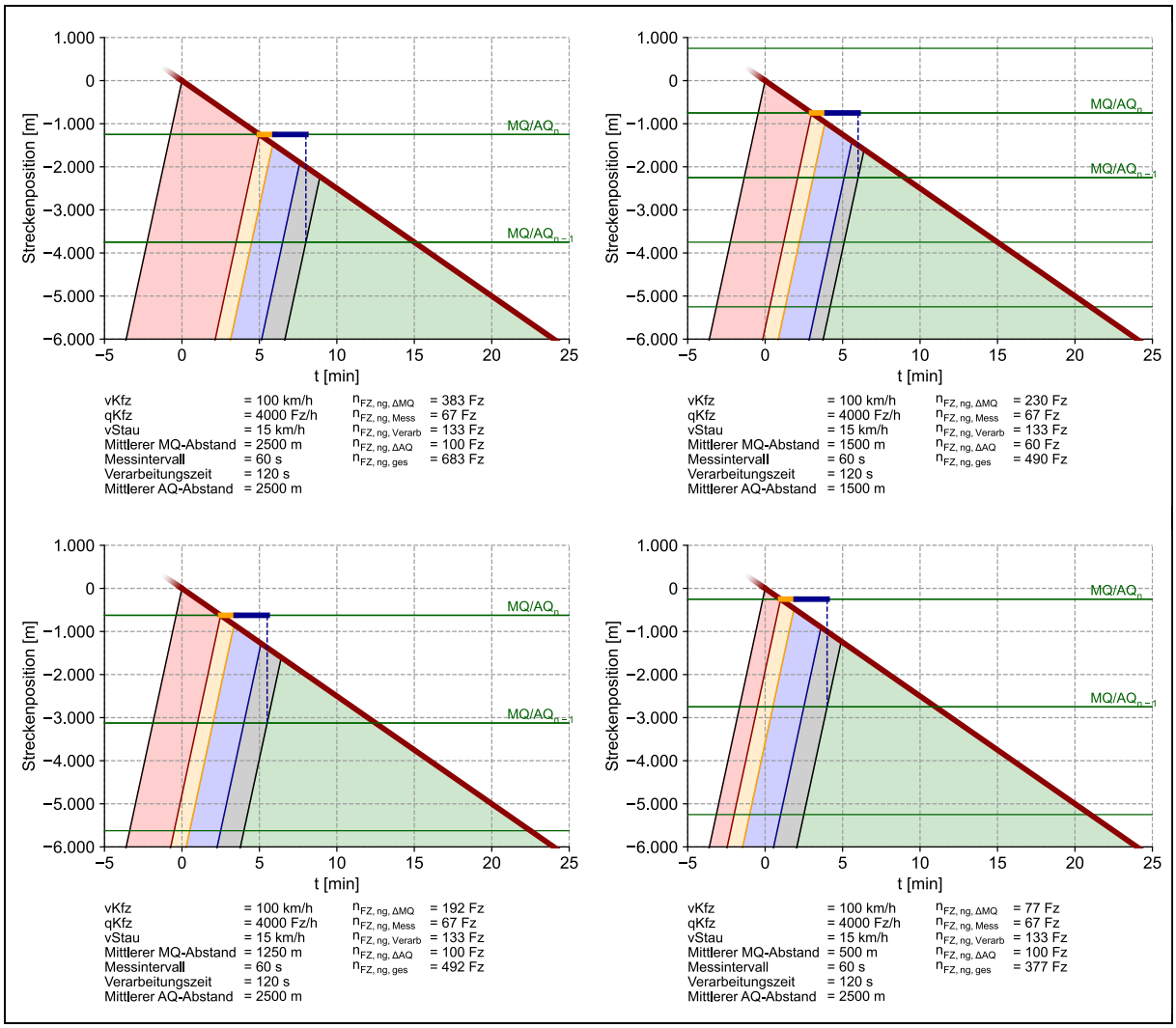


Abbildung 6-2: Modell eines plötzlichen Staus mit zügiger Ausbreitungsgeschwindigkeit

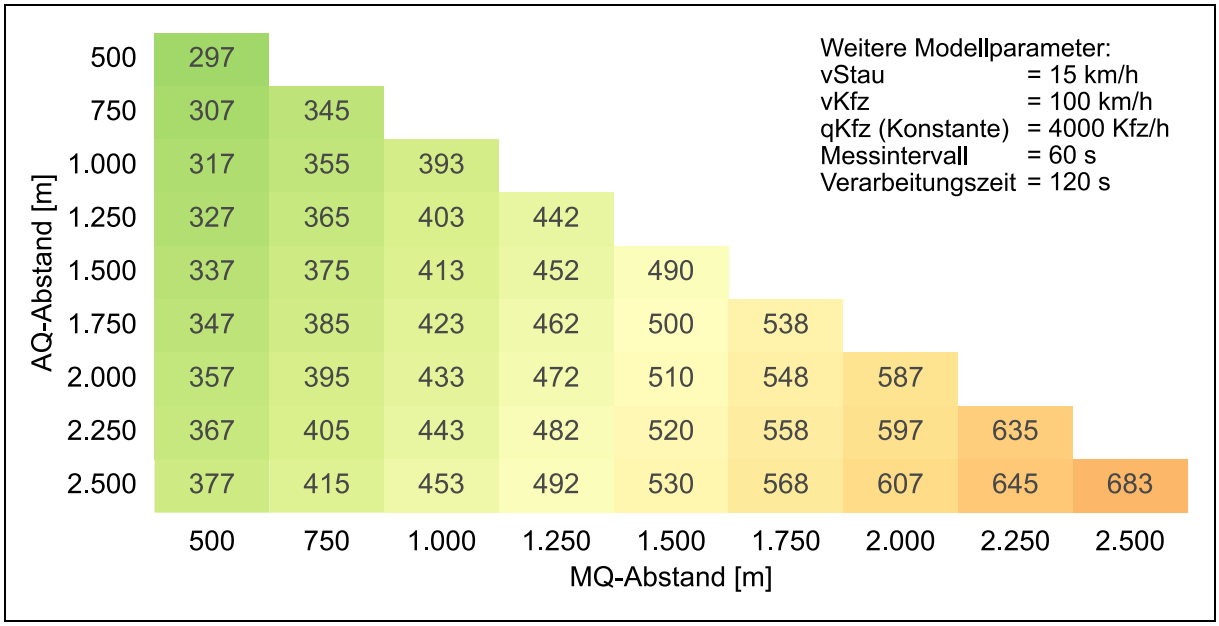


Abbildung 6-3: Modellbasiert ermittelte Anzahl nicht gewarnter Fahrzeuge in Abhängigkeit vom AQ- und MQ-Abstand

Abbildung 6-4 stellt eine weitere beispielhafte Anwendung des in Kapitel 6 vorgestellten Modells zur Wirkfeldanalyse von Stauwarnungen für den theoretischen Fall eines infolge von dichtem Verkehr entstehenden Staus mit langsamen Kfz-Geschwindigkeiten und niedriger Ausbreitungsgeschwindigkeit dar. Es handelt sich in der Anwendung des Modells um eine besonders ungünstige Modellparametrierung im Hinblick auf die Anzahl der nicht gewarnten Fahrzeuge. Unter der Annahme einer gleichverteilten Lage der Stauentstehung zwischen zwei im Mittel je 2.500 m voneinander entfernten MQ und AQ werden aufgrund der späten Detektion 1.388 Fz, die sich mit 80 km/h dem Stauende nähern, nicht vor dem Stau gewarnt (roter Bereich, oben links). Werden in der SBA-Konfiguration sowohl der MQ- als auch der AQ-Abstand auf je 1.500 m verkürzt, reduziert sich die Anzahl der nicht gewarnten Fahrzeuge um 476 Fz. Wird nur der MQ-Abstand mit 1.250 m auf die Hälfte der ursprünglichen Länge verkürzt, während der AQ-Abstand mit 2.500 m gleich groß bleibt, dann verringert sich die Anzahl der nicht gewarnten Fahrzeuge um 532 Fz. Das Ergebnis macht deutlich, dass sich die Anzahl der nicht gewarnten Fahrzeuge maßgeblich mit kleiner werdendem MQ-Abstand reduziert, wohingegen der Einfluss eines kurzen AQ-Abstands im Vergleich dazu gering ist. Eine Verkürzung des MQ-Abstands auf 500 m bei gleichbleibendem AQ-Abstand von 2.500 m verringert die Anzahl der nicht gewarnten Fahrzeuge um 850 Fz.

In Abbildung 6-5 ist zu erkennen, dass eine deutliche Verringerung der Anzahl nicht gewarnter Fahrzeuge insbesondere durch eine Verkürzung des MQ-Abstands erreicht wird.

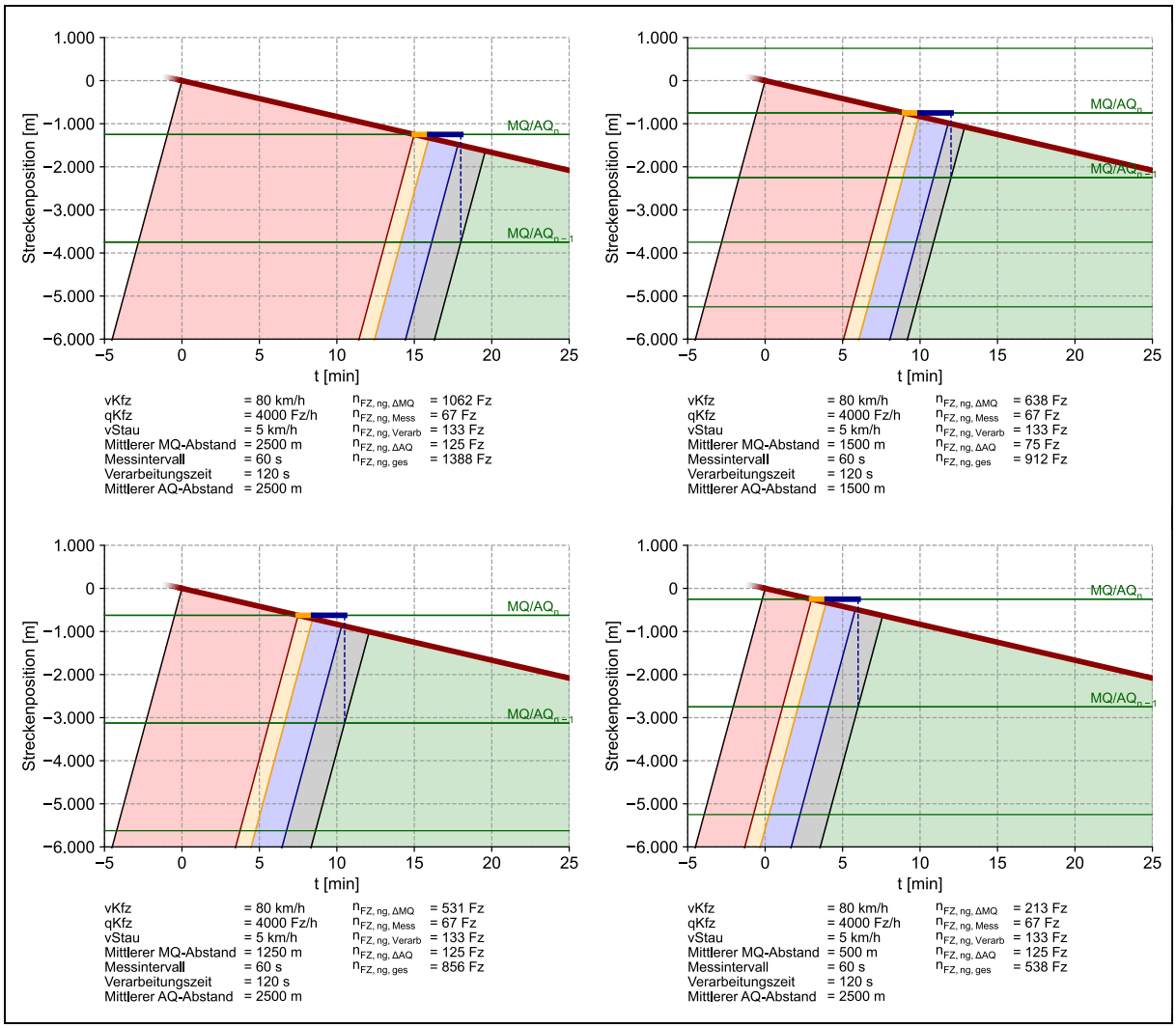


Abbildung 6-4: Dichter Verkehr mit niedriger Stauausbreitungsgeschwindigkeit

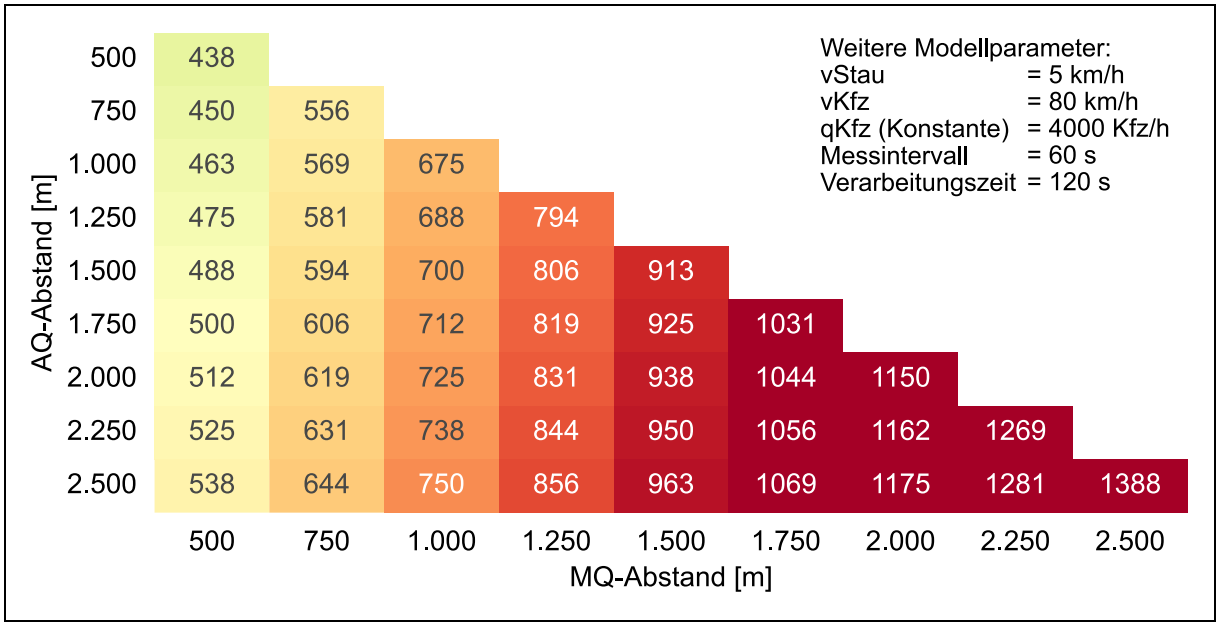


Abbildung 6-5: Modellbasiert ermittelte Anzahl nicht gewarnter Fahrzeuge in Abhängigkeit vom AQ- und MQ-Abstand

6.4.2 Sensitivitätsanalyse

Das Modell zur Wirkfeldanalyse von Stauwarnungen ist anhand von sieben numerischen Parametern frei konfigurierbar. In den zuvor dargestellten Anwendungsbeispielen wurden jeweils die MQ- und AQ-Abstände variiert, um Ergebnisse bei ansonsten gleichbleibenden Modellparametern zu vergleichen. Eine Darstellung sämtlicher Ergebnisräume ist aufgrund der Komplexität des Modells nicht möglich.

Mithilfe einer Sensitivitätsanalyse kann der Einfluss einzelner Modellparameter (Eingangsvariablen) auf das Ergebnis eines mathematischen Modells untersucht werden. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde das Modell zur Wirkfeldanalyse von Stauwarnungen mithilfe der Sobol-Methode untersucht. Bei der Sobol-Methode handelt es sich um eine varianzbasierte Sensitivitätsanalyse nach SOBOL (2001), mit der für komplexe mathematische Modelle ein bestimmter Einfluss einer Eingangsvariable (X_i) auf die Varianz des Ergebnisses (Y) gemessen wird. Die Methode wurde später von SALTELLI (2002) erweitert. Zunächst erfolgt die Ziehung einer Stichprobe aus vorab festgelegten Wertebereichen der Systemparameter. Nach Anwendung des zu untersuchenden Modells auf die Stichprobe folgt die eigentliche Sensitivitätsanalyse. Mithilfe der Fixierung einer einzelnen Variable X_i wird geprüft, ob die Varianz im Ergebnis Y durch die Veränderung der übrigen Variablen sinkt. Sinkt die Varianz deutlich, dann ist X_i für einen großen Teil der Varianz des Ergebnisses Y verantwortlich und wird folglich als gewichtige Variable betrachtet (CATHERINE 2022). Die Analyse wurde softwaregestützt mithilfe der SALib in Python (IWANAGA et al. 2022; HERMAN & USHER 2017) durchgeführt. Tabelle 6-1 enthält die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse untersuchten Wertebereiche der einzelnen Modellparameter.

Modellparameter	**Wertebereich**
vKfz	60–130 km/h
qKfz	2.000–6.000 Kfz/h
vStau	5–15 km/h
Mittlerer MQ-Abstand	500–2.500 m
Mittlerer AQ-Abstand	500–2.500 m
SBA-Messintervall	30–60 s
SBA-Verarbeitungszeit	15–180 s

Tabelle 6-1: Wertebereiche der Modellparameter für die Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der Sobol-Sensitivitätsanalyse lassen sich in First-Order Indizes, Second-Order Indizes und Total-Order Indizes unterteilen. Die First-Order Indizes beschreiben das Gewicht, welches eine Variable allein auf das Ergebnis eines mathematischen Modells hat, die Second-Order Indizes beschreiben das Gewicht, welches durch die Interaktion zwischen zwei Variablen auf das Ergebnis entsteht, und die Total-Order Indizes stellen die Wirkung aus First- und Second-Order kombiniert dar. Das Ergebnis alles Indizes variiert zwischen 0 (kein Einfluss auf das Ergebnis) und 1 (großer Einfluss auf das Ergebnis).

Abbildung 6-6 zeigt das Ergebnis der Total-Order Indizes für das Stauwarnungsmodell bei Betrachtung der in Tabelle 6-1 genannten Wertebereiche der Modellparameter. Die Verkehrsstärke zwischen 2.000 und 6.000 Kfz/h hat den größten Einfluss auf das Ergebnis, gefolgt vom mittleren MQ-Abstand zwischen 500 m und 2.500 m. Der mittlere AQ-Abstand zwischen 500 m

und 2.500 m, die Kfz-Geschwindigkeit zwischen 60 km/h und 130 km/h sowie das Messintervall zwischen 30 s und 60 s haben einen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis. Es sei hier darauf hingewiesen, dass die beschriebenen Ergebnisse lediglich den Einfluss des AQ-Abstandes auf die Anzahl der nicht durch die SBA vor einem Stauende gewarnten Fahrzeuge modelltheoretisch darstellen. In der Praxis der Verkehrssicherheitsbewertung können für das Modellergebnis unwesentliche Faktoren, wie die Geschwindigkeit der sich dem Stauende nähernden Fahrzeuge, eine deutlich größere Bedeutung haben. Im Rahmen der umfangreichen empirischen Untersuchung zeigten sich jedoch im Mittel sehr große Überschreitungen von Geschwindigkeitsbeschränkungen während Stautrichter-Schaltungen auch bei kurzen Abständen zwischen den AQ (vgl. Kapitel 4.3.1).

Die First-Order Indizes (Abbildung 6-7) unterscheiden sich nur geringfügig von den Total-Order Indizes, was ein Hinweis darauf ist, dass die Modellparameter einen eher isolierten Einfluss auf das Ergebnis haben. Die größte Interaktion zwischen zwei Eingangsvariablen ist in den Second-Order Indizes in Abbildung 6-8 zwischen dem mittleren MQ-Abstand und der Stauausbreitungsgeschwindigkeit bzw. der Verkehrsstärke zu erkennen.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bestätigen den Eindruck der Anwendungsbeispiele. Der mittlere Abstand zwischen zwei MQ hat einen deutlich größeren Einfluss auf die Anzahl der mithilfe von WVZ gewarnten Fahrzeuge vor einem Stauende als der AQ-Abstand. Erwartungsgemäß ist die Anzahl darüber hinaus maßgeblich von der Verkehrsstärke abhängig.

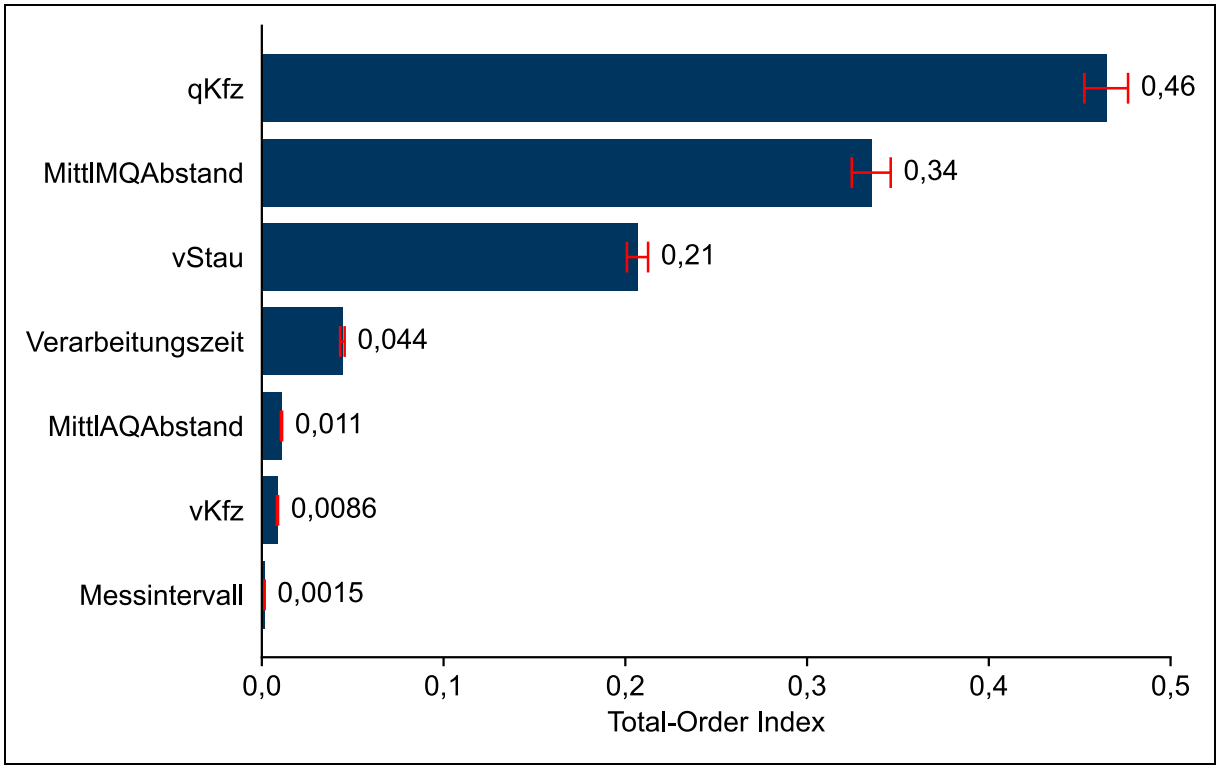


Abbildung 6-6: Total-Order Index der Sobol-Sensitivitätsanalyse des Stauwarnungsmodells (Rot = Konfidenzintervall bei einem Konfidenzniveau von 95 %)

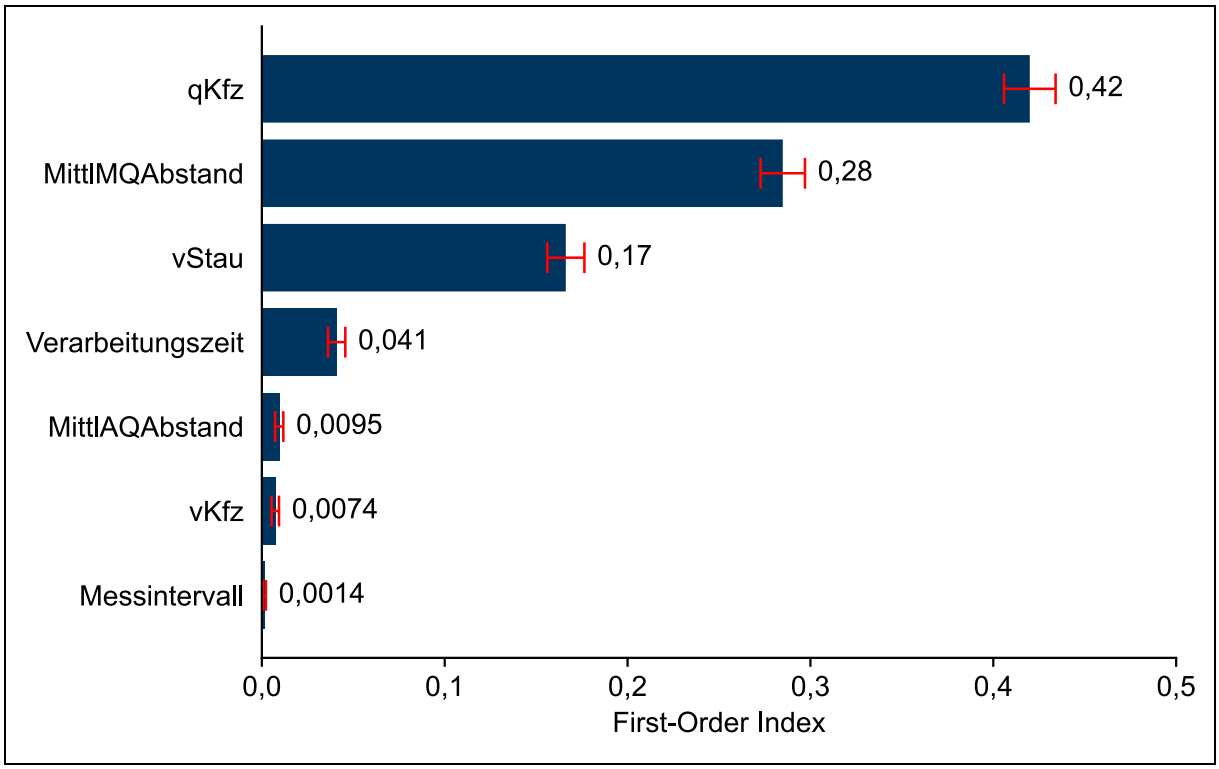


Abbildung 6-7: First-Order Index der Sobol-Sensitivitätsanalyse des Stauwarnungsmodells (Rot = Konfidenzintervall bei einem Konfidenzniveau von 95 %)

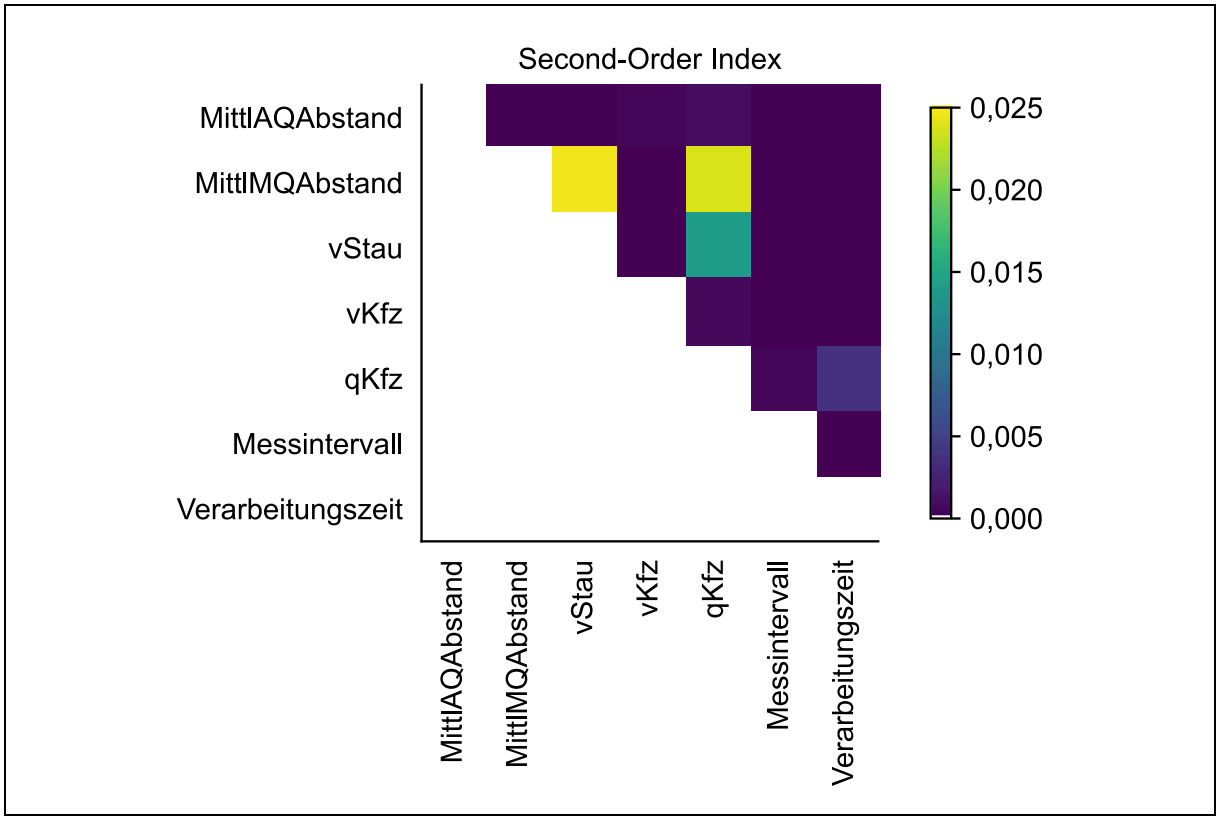


Abbildung 6-8: Second-Order Index der Sobol-Sensitivitätsanalyse des Stauwarnungsmodells

7 Zusammenfassung und Empfehlungen

7.1 FCD-basierte Analysen

Im Rahmen der FCD-basierten Analyse der Befolgung von dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen wurden Einzelfahrzeugdaten aus dem Jahr 2019 für sechs verschiedene SBA auf einer Streckenlänge von 129 km ausgewertet. Die AQ-Abstände variieren zwischen 467 und 2.544 m und sind damit in ihrer Verteilung weitgehend repräsentativ für die in Deutschland gebauten SBA. Die AQ-Standorte und -Abstände ergeben sich dabei nicht nur aus steuerungstechnischen Erwägungen, sondern auch aus den Sichtbeziehungen in Abhängigkeit von der Streckengeometrie und ggf. vorhandenen Überführungsbauwerken sowie der verkehrsrechtlichen Erfordernis, dem an Einfahrten zufließenden Verkehr die für den vorausliegenden Streckenabschnitt geltenden Vorschriftzeichen anzuzeigen.

Insgesamt wurden moderate bis gute Befolgungen der Geschwindigkeitsbeschränkungen während Harmonisierungsschaltungen ermittelt, wobei hohe zulässige Höchstgeschwindigkeiten tendenziell besser befolgt werden als niedrige zulässige Höchstgeschwindigkeiten. Die Überschreitungen streuen folglich stark. Im Mittel lag die Überschreitung der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkung für Harmonisierungsschaltungen bei 10,5 km/h mit einer Standardabweichung von 15,1 km/h. Stautrichterschaltungen wurden im Untersuchungskollektiv deutlich schlechter befolgt. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit in Stautrichtern wurde durch Pkw im Mittel um 36,7 km/h überschritten. Ein Einfluss des AQ-Abstands auf die Geschwindigkeitswahl oder die Befolgung von Geschwindigkeitsbeschränkungen durch Pkw konnte weder für Harmonisierungsschaltungen noch – auf der Grundlage einer deutlich kleineren Stichprobe – für Stautrichter-Schaltungen festgestellt werden.

Die Ergebnisse der FCD-basierten Analyse wurden anhand von qualitativen Analysen räumlich-zeitlicher Fahrzeugtrajektorien aus den Drohnenaufnahmen für einen von wechselnden Verkehrszuständen betroffenen Streckenabschnitt bestätigt.

7.2 Verkehrsflusssimulationen

Mithilfe der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation wurden die Schaltprogramme „Harmonisierung“ und „Stauwarnung“ nach dem MARZ (2018) nachgebildet. Die Ergebnisse der Simulation bestätigten im Wesentlichen die Ergebnisse der empirischen Datenanalysen. Es konnten geringfügige Auswirkungen unterschiedlicher AQ-Abstände auf die Geschwindigkeiten und deren Standardabweichung festgestellt werden. Unter Variation der MQ-AQ-Zuordnung zeigte sich, dass im Fall einer Stauwarnung eine Lage des MQ stromabwärts des AQ sinnvoll ist, um die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten deutlich und die Anzahl von Situationen mit einer TTC < 2 s geringfügig zu reduzieren. Für das Harmonisierungsszenario ist die Lage des MQ zum AQ von geringerer Bedeutung. Eine Positionierung des MQ stromaufwärts des AQ führte jedoch auf zweistreifigen Strecken zu einzelnen Ausreißern, bei denen die Standardabweichung der Geschwindigkeiten deutlich zunahm und der Verkehr unruhiger wurde.

Die Verringerung des Steuerungsintervalls von 1 min auf 30 s oder 15 s führte in der Simulation zu einer erheblichen Verschlechterung der Verkehrszustände für die untersuchte Harmo-

nisierungsschaltung nach dem MARZ (2018). Die im MARZ empfohlenen Basisschaltalgorithmen wurden im Kontext einer SBA-Steuerung anhand von Daten in 1-Minuten-Intervallen konfiguriert. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine Übertragbarkeit der Harmonisierungsalgorithmen einschließlich der Standardparametrisierung auf verkürzte Mess- und Steuerungsintervalle nicht zielführend ist. Im Gegensatz dazu zeigten sich im Falle eines sich ausbreitenden Stauendes gute Ergebnisse für den Stauwarnungsalgorithmus auch bei verkürzten Mess- und Steuerungsintervallen. Steuerungsintervalle über 1 min wirkten sich für beide Algorithmen nicht negativ auf den Verkehrsablauf in den Simulationsergebnissen aus. Aufgrund des idealisierten Befolgungsverhaltens und der Verwendung von Standard-Parametersätzen haben die Simulationsergebnisse – insbesondere für die Stauwarnung – allerdings einen eher indikativen Charakter.

7.3 Wirkfeldanalyse von Stauwarnungen

Die MQ- und AQ-Abstände einer SBA auf einer von regelmäßigen Staus betroffenen Strecke beeinflussen, wie schnell und ortspräzise ein Stauereignis detektiert und angezeigt werden kann, um Verkehrsteilnehmende im Zulauf zum Stauende zu warnen. Dabei ist davon auszugehen, dass eine angezeigte Warnung unabhängig von der Befolgung der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkungen eine Wirkung beim gewarnten Verkehrsteilnehmenden erreicht, z. B. in Form von gesteigerter Aufmerksamkeit oder Bremsbereitschaft. Zur Ermittlung des Wirkfelds von Stauendewarnungen wurde ein theoretisches Modell entwickelt, mit dem die Anzahl der vor einem Stauende gewarnten Fahrzeuge in Abhängigkeit vom AQ- und MQ-Abstand sowie der Verkehrsbelastung geschätzt werden kann. Dies stellt ein ergänzendes Verfahren zur Beurteilung der Verkehrssicherheitswirkung von SBA dar, da neben der reinen Warnwirkung z. B. auch die Geschwindigkeit, mit der sich ein Fahrzeug auf das Stauende zubewegt, von großer Bedeutung für das Unfallrisiko und damit den Wirkgrad einer SBA ist.

Das entwickelte Modell zur Wirkfeldanalyse von Stauwarnungen basiert auf verkehrsflusstheoretischen Ansätzen, welche mit der grundsätzlichen Funktionsweise einer SBA kombiniert werden. Das Modell geht dabei von einer idealisierten Gleichverteilung der Stauentstehung zwischen zwei MQ aus. Es kann auch durch die Annahme einer weitgehend gleichmäßigen Verteilung von MQ und AQ von der Praxis abweichen, weil an Abschnitten mit einer hohen Knotenpunktdichte und/oder streckengeometrischen Zwangspunkten die MQ/AQ-Abstände in der Praxis mitunter deutlich variieren.

Bei Anwendung des Modells zeigte sich, dass die Anzahl der nicht gewarnten Fahrzeuge in größerem Maße vom MQ-Abstand als vom AQ-Abstand abhängt. Die Anzahl nicht gewarnter Fahrzeuge kann demnach vor allem durch die Reduktion der MQ-Abstände verringert werden. Eine durchgeführte varianzbasierte Sensitivitätsanalyse bestätigte dies: Während die Variation der Verkehrsstärke zwischen 2.000 und 6.000 Kfz/h erwartungsgemäß den größten Einfluss auf die Anzahl nicht gewarnter Fahrzeuge hat, wurde für MQ-Abstände zwischen 500 und 2.500 m ein deutlich größerer Einfluss auf das Modellergebnis festgestellt als für AQ-Abstände zwischen 500 und 2.500 m. Auch die Variation der Datenverarbeitungszeit der SBA zwischen 15 s und 3 min hat einen viermal so großen Einfluss auf die Anzahl der nicht vor dem Stau gewarnten Fahrzeuge wie die Variation des AQ-Abstandes zwischen 500 und 2.500 m.

7.4 Fazit und Empfehlungen

Insgesamt liefern die empirischen Analysen der Befolgung von angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkungen keine Indizien für einen zusätzlichen Nutzen geringer AQ-Abstände für den Verkehrsablauf. Aus den Ergebnissen lassen sich daher keine von den bereits geltenden Vorgaben der RWVA (1997) abweichenden Empfehlungen für einen verkehrstechnisch sinnvollen AQ-Abstand ableiten.

Bislang sind keine Angaben zum empfohlenen Abstand zwischen AQ und MQ in Regelwerken verankert. Für den Fall der Standardparametrisierung der SBA nach dem MARZ (2018) stellte sich im Rahmen der Simulation eine Lage des MQ stromabwärts des zugehörigen AQ hinsichtlich der untersuchten Indikatoren als verkehrstechnisch günstiger heraus als eine Lage des MQ auf gleicher Höhe oder stromaufwärts des AQ. Die Anordnung eines MQ wenige hundert Meter stromabwärts des zugehörigen AQ war früher gängige Praxis, als zur Verkehrsdetektion in der Regel Induktionsschleifen eingesetzt wurden. Der Einsatz von Überkopfsensoren ermöglicht diesen räumlichen Versatz jedoch nicht und erfordert in der Praxis eine entsprechende Berücksichtigung in der Konfiguration der SBA. Eine pauschale Empfehlung zum optimalen Abstand zwischen AQ und MQ in Regelwerken lässt sich somit nicht geben.

Das im Rahmen der Untersuchung entwickelte Modell zur Wirkfeldanalyse von Stauwarnungen deutet auf einen deutlich größeren Nutzen von geringen MQ-Abständen im Vergleich zu geringen AQ-Abständen hin. Es wird empfohlen, beim Neuentwurf oder Ausbau bestehender SBA den Fokus auf die Verdichtung von MQ zu legen. Bei größeren AQ-Abständen wird in den RWVZ (FGSV, 1997) bereits geraten, eine Verdichtung der MQ zu prüfen.

Ob ein kürzeres Messintervall die Reaktionszeit einer SBA verbessern kann, wurde nicht empirisch untersucht. Im Rahmen der Simulation wurde jedoch deutlich, dass die Konfiguration einer SBA für kleine Erfassungsintervalle angepasst werden muss. So müssen zur Erhaltung der Qualität der Verkehrszustandsbestimmung durch die verkürzten Intervalle entsprechende Glättungsmethoden angewendet werden. In der Praxis werden bereits 15 s-Intervalle ausgewertet, welche durch gleitende Mittelwertbildung geglättet werden.

7.5 Ausblick

Eine Analyse der Verkehrssicherheitswirkung von SBA war nicht Gegenstand der Untersuchung. Da eine Sicherheitswirkung durch Gefahrenwarnungen durch erhöhte Aufmerksamkeit oder Bremsbereitschaft der Verkehrsteilnehmenden zu vermuten ist, auch wenn angezeigte Geschwindigkeitsbeschränkungen durch die Verkehrsteilnehmenden nicht ausreichend befolgt werden, werden weitergehende Untersuchungen zur Verkehrssicherheitswirkung von SBA empfohlen.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden erhebliche Überschreitungen von Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 60 km/h in Stautrichterschaltungen festgestellt. Inwieweit solche Geschwindigkeitsbeschränkungen trotz der geringen Befolgung positive Wirkungen auf die Bremsbereitschaft der Verkehrsteilnehmenden haben und damit die Verkehrssicherheit im Zulauf auf ein Stauende erhöhen, sollte dabei durch die Analyse des Zusammenhangs zwischen der SBA-Konfiguration einschließlich der AQ-Abstände und den Unfallkenngrößen von Streckenabschnitten mit SBA untersucht werden. Zudem stellt sich die Frage, ob aktuelle

Steuerungsstrategien zur Stautrichterung noch Potenziale für Optimierungen bieten, mit denen eine bessere Befolgung von Geschwindigkeitsbeschränkungen in Stautrichtern und damit eine bestmögliche Warnwirkung erreicht werden kann.

Steuerungsstrategien von SBA umfassen eine Vielzahl von zu berücksichtigenden Einflussfaktoren, welche in kurzen Zeitintervallen erfasst, bewertet und priorisiert werden müssen. Die Nachbildung eines solch komplexen Systems in einer Simulation ist mit einem erheblichen Modellierungsaufwand verbunden. Eine vertiefende Evaluierung der Modellierung und Simulation von SBA kann Erkenntnisse liefern, inwieweit die vollständige Nachbildung einer SBA in einem Simulationsmodell im Vergleich zu einfachen Modellen zweckmäßig und auf SBA mit abweichenden Steuerungsstrategien übertragbar ist.

Für die weitere Entwicklung der Planung und Steuerung von SBA können fahrzeugseitig generierte Daten sowie Assistenzsysteme unter Nutzung der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation die Funktionen der kollektiven Verkehrssteuerung ergänzen. Es empfiehlt sich daher die Untersuchung, ob und wie die Einbindung von FCD in die Verkehrszustandsdetektion möglich ist und ob damit ein vergleichbarer Effekt wie bei einer Verdichtung von MQ erreicht werden könnte. Mit zunehmender Ausstattung der Fahrzeuge sollte untersucht werden, ob die Übertragung der WVZ-Anzeigen von SBA in die Fahrzeuge die Wirkung von SBA verbessern kann.

Literatur

ABARGHOOIE, M. (2020): Analyse des zeitlich-räumlichen Zusammenhangs zwischen Verkehrssituation und Anzeigezustand bezüglich der Geschwindigkeiten von Fahrzeugpulks im Rahmen von Streckenbeeinflussungsanlagen. Masterarbeit am Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen, RWTH Aachen.

Autobahn GmbH (2023): Definition von Unfallhäufungsstellen auf Bundesautobahnen als Grundlage für die Anwendung von Verkehrssicherheitsmaßnahmen, unveröffentlicht.

AKVS (2014): Anweisung zur Kostenermittlung und zur Veranschlagung von Straßenbaumaßnahmen. Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI), Bonn.

ASFINAG (2006): Verkehrstechnische Grundsätze zur Planung von Verkehrstelematikanlagen. Wien. Online verfügbar unter: https://docplayer.org/80329877-Verkehrstechnische-grundsaetze-zur-planung-von-verkehrstelematikanlagen.html (abgerufen am 25.08.2021)

ASTRA 15016 (2015): Geschwindigkeitsharmonisierung und Gefahrenwarnung (GHGW). Ausgabe 2015 V1.01. Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern, Schweiz.

ASTRA 15019 (2018): Richtlinie Verkehrstechnische Regelungslogik - Funktionale Minimalanforderungen für Planung und Betrieb der Regelung von Verkehrsmanagement-Systemen zur Verflüssigung des Verkehrs. Ausgabe 2018 V1.04. Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern, Schweiz.

BALMBERGER, M.; MAIBACH, W.; SCHÜLLER, H.; DAHL, A.; SCHÄFER, T. (2014): Nutzen und Kosten von Verkehrsbeeinflussungs-anlagen über den gesamten Lebenszyklus. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 243, Bergisch Gladbach.

BALZ, W.; ERMER, P. (1998): Field studies into the impact of various combinations of variable traffic signs. Straßenverkehrstechnik 12/1998, Kirschbaum Verlag, Bonn.

BAST (2016): Autobahnverzeichnis 2016. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 273, Bergisch Gladbach.

BAST (2022): Volkswirtschaftliche Kosten von Straßenverkehrsunfällen in Deutschland. Jährliche Reihe der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

BAST (2023): Straßenverkehrszählung 2021 – Ergebnisse auf Bundesautobahnen. https://www.bast.de/DE/Statistik/Verkehrsdaten/Manuelle-Zaehlung.html. Zugriffsdatum: 18.04.2023 Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

BHO: Bundeshaushaltsordnung (BHO). Bundesgesetz der Bundesrepublik Deutschland.

BMF (2011): Arbeitsanleitung Einführung in Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen. RdSchr. vom 12. Januar 2011, in der Fassung der Änderung durch RdSchr. vom 07.05.2021, Bundesministerium der Finanzen, Berlin.

BMVI (2010): Muster-AKS-Tool zur Abschätzung von Kosten und Wirtschaftlichkeit von VBA gemäß den „Anweisungen zur Kostenberechnung für Straßenbauvorhaben (AKS). Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI), Bonn (nicht veröffentlicht).

CATHERINE, V. (2022): Sobol Indices to Measure Feature Importance. Towards Data Science (Article).

BOGENBERGER, K.; BERTINI, R.; BOICE, S. (2006): Analytische Methoden zur Interpretation von Verkehrsdaten. Straßenverkehrstechnik 09/2006, Kirschbaum Verlag, Bonn.

BOGENBERGER, K.; KARL, B.; KESSLER, L. (2020): Automatische Klassifikation verschiedener Stautypen. Tagungsdokumentation zur HEUREKA 2021 – Optimierung in Verkehr und Transport, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

BUSCH, F.; GROSANIC, S.; DINKEL, A.; SCHIEFERSTEIN, A.; STADLER, M. (2009): Begleitforschung und Ergänzung des Merkblatts 'Ermittlung der Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen'. Schlussbericht zu FE 03.0425/2007/IGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, München.

DAGANZO, C.F. (1997): Fundamentals of transportation and traffic operations. Verlag Emerald.

FÄRBER, BE.; FÄRBER, BR. (2002): Akzeptanz von Wechselverkehrszeichen im Einsatz von SBA. Institut für Arbeitswissenschaft, Universität der Bundeswehr München.

FGSV (1997): Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen – Aktualisierung der RAS-W 86. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.

FGSV (2003a): Hinweise zur Datenvervollständigung und Datenaufbereitung in verkehrstechnischen Anwendungen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.

FGSV (2003b): Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.

FGSV (2006): Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.

FGSV (2007): Hinweise zur Wirksamkeitsschätzung und Wirksamkeitsberechnung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.

FGSV (2012): Empfehlungen für Verkehrserhebungen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.

FGSV (2015): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen – Teil A Autobahnen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.

FGSV (2017): Hinweise zu Unfallkostensätzen (H Uks). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.

FGSV (2019a): Hinweise zu Detektionstechnologien. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.

FGSV (2019b): Hinweise zum Qualitätsmanagement in der Verkehrsbeeinflussung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.

GEISTEFELDT, J. (2007): Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit auf Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen. Dissertation, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum.

GEISTEFELDT, J. (2009): Überprüfung der verkehrstechnischen Bemessungswerte des HBS für Autobahnen. Straßenverkehrstechnik 10/2009, Kirschbaum Verlag. Bonn.

GEISTEFELDT, J.; GIULIANI, S.; BUSCH, F.; SCHENDZIELORZ, T.; HAUG, A.; VORTISCH, P.; LEYN, U.; TRAPP, R. (2017): HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 279, Bergisch Gladbach.

GEISTEFELDT, J.; MARNACH, H.; LEERKAMP, B.; HOLTHAUS, T. (2022): Einsatzempfehlungen für Lkw-Überholverbote an Bundesautobahnen. Forschungsauftrag FE 03.0577/2019/IRB der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, unveröffentlicht.

HALL, F.L.; AGYEMANG-DUAH, K. (1991): Freeway Capacity Drop and the Definition of Capacity. Transportation Research Record No. 1320, Transportation Research Board, Washington D.C.

HEGEWALD, J. (2021): Bewertung von Streckenbeeinflussungsanlagen mittels agentenbasierter Simulation. Tagungsdokumentation zur HEUREKA 2021 – Optimierung in Verkehr und Transport, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

HERMAN, J. AND USHER, W. (2017) SALib: An open-source Python library for sensitivity analysis. Journal of Open Source Software, 2(9).

HILGERS, T.; KRABBE, A.; HAUG, A.; GRIMM, J.; KUTTER, S.; TEMPELHAHN, C.; SCHWIETERING, C.; FÜG, J. (2021): Simulation des hochautomatisierten Fahrens und die-der Auswirkungen auf die kollektive Streckenbeeinflussung auf Autobahnen. Schlussbericht zu FE 03.0538/2015/IGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Aachen.

IWANAGA, T., USHER, W., & HERMAN, J. (2022). Toward SALib 2.0: Advancing the accessibility and interpretability of global sensitivity analyses. Socio-Environmental Systems Modelling, 4, 18155.

KAPPICH, G.; WESTERMANN, C.; SCHMITZ, R. (2010): Echtzeitbeurteilung und -optimierung der Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1040, Bonn.

KARLBERG, N.O. (2002). Road, weather, action. Traffic Technology International, Surrey, United Kingdom.

KERNER, B. (2017): Breakdown in traffic networks. Fundamentals of transportation science, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg.

KESSLER, L; BOGENBERGER, K (2021): Empfehlungen für die Ausstattung von lokaler, mobiler und streckenbezogener Detektion für Störungs- und Verkehrslageerkennung (iRoute2). Technische Universität München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, München.

LIGHTHILL, M.J.; WHITHAM, F.R.S.; WHITHAM, G.B. (1955): On kinematic waves I. Flood movement in long rivers. Proc. R. Soc. Lond. A 229 (1178).

LÖBBERING, D. (2018): Handlungsempfehlungen zur Optimierung von Streckenbeeinflussungsanlagen mit komplexen Knotenpunktsituationen am Beispiel der SBA A 1 Hamburg. Masterarbeit am Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen, RWTH Aachen.

MANGOLD, M.; TRÄGER, K.; LINDENBACH, A. (1996): Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Umfelddatenerfassung. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 729, Bonn.

MARNACH, H. (2018): Analyse der Akzeptanz von SBA-Schaltungen in Abhängigkeit von Verkehrs- und Umfeldeinflüssen. Masterarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum.

MARZ (1999): Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

MARZ (2018): Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

MAY, A.D.; KELLER, H.E.M. (1967): Non-integer car-following models. Highway Research Record, No. 199 (1), pp. 19-32.

NAGL, P.; KUMMER, S.; DEWEIS, N. (2008): Ökonomische Aspekte von Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) am Beispiel der VBA Tirol der ASFINAG. Straßenverkehrstechnik Heft 03/2008, Kirschbaum Verlag, Bonn.

PISCHNER, T.; HANGLEITER, S.; LAMBACHER, U.; TRUPAT, S.; KÜHNE, R.; SCHICK, P. (2003): Ermittlung und Bewertung der Nutzenkomponenten von Streckenbeeinflussungsanlagen im Hinblick auf den Verkehrsablauf. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 866, Bonn.

RICHARDS, P. I. (1956): Shock waves on the highways. Operations Research, 4, pp. 42-51.

RIEGELHUTH, G.; GLATZ, M. (2015): Zuverlässiger Betrieb von Streckenbeeinflussungsanlagen auf Basis einer antizipierenden. regelbasierten Steuerung. Straßenverkehrstechnik, Heft 04/2015, Kirschbaum Verlag, Bonn.

RWVA (1997): Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen. Bundesministerium für Verkehr (BMV), Bonn.

RWVZ (1997): Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen. Bundesministerium für Verkehr (BMV). Bonn.

SALTELLI, A. (2002): Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices. Computer Physics Communications, Volume 145, Issue 2 (Journal).

SCHICK, P. (2003): Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses. Dissertation, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart.

SCHWIETERING, C.; SCOTTI, C.; BENEZEDER, G. (2017): Fachmandat Steuerungsalgorithmen & fachliche Koredaktion im Auftrag des Bundesamts für Strassen ASTRA. Aachen (nicht veröffentlicht).

SCHWIETERING, C.; LÖBBERING, D. (2018): Optimierung der SBA A 1 – Optimierung der Streckenbeeinflussungsanlage auf der A 1 zwischen der Landesgrenze Niedersachsen und der AS HH-Moorfleet. Aachen (nicht veröffentlicht).

SCHWIETERING, C.; MAIER, F.; HAKENBERG, M.; PYTA, L.; ABEL, D. (2019): Ermittlung von Optimierungspotenzialen bestehender und zukünftiger Streckenbeeinflussungsanlagen. Schlussbericht zu FE 03.0523/2014/IGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Aachen.

SCHWIETERING, C.; LÖBBERING, D.; GROSANIC, S.; HANNES, H.-D.; LISTL, G. (2020): Optimierung des Nutzens von Streckenbeeinflussungsanlagen am Beispiel SBA A 81. Straßenverkehrstechnik 07/2020, Kirschbaum Verlag, Bonn.

SCHWIETERING, C., LÖBBERING, D., WEINREIS, C., MAIER, F., FELDGES, M. (2022): Hochaufgelöste Multisensorielle Verkehrsdaten in der Streckenbeeinflussung; Schlussbericht zum Forschungsauftrag FE 03.0521/2014/IRB der Bundesanstalt für Straßenwesen, Aachen.

SIEGENER, W.; TRÄGER, K.; MARTIN, K.; BECK, T. (2000): Unfallgeschehen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Verkehrsbelastung. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 787, Bonn.

SOBOL, I.M. (2001): Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. Mathematics and Computers in Simulation, Volume 55, Issues 1–3 (Journal).

STEINAUER, B.; BÖLLING, F.; WIENERT, A. (1999): Wirksamkeitsanalyse der Streckenbeeinflussungsanlage A8 (Ost) zwischen AK München/Brunnenthal und AS Bad Aibling. Autobahndirektion Südbayern, Aachen.

STEINHOFF, C.; KATES, R.; KELLER, H.; FÄRBER, BE.; FÄRBER, BR. (2002): Problematik präventiver Schaltungen von Streckenbeeinflussungsanlagen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 853, Bonn.

STEINHOFF, C. (2003): Online-Bewertung der Akzeptanz und der Wirksamkeit präventiver Maßnahmen durch Streckenbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen. Dissertation, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technischen Universität München.

TLS (2012): Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

TREIBER, M.; KESTING, A. (2010a): Verkehrsdynamik und -simulation – Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik. Springer-Verlag. Berlin.

TREIBER, M.; KESTING, A. (2010b): Datengestützte Analyse der Stauentstehung und -ausbreitung auf Autobahnen. Straßenverkehrstechnik 01/2010, Kirschbaum Verlag, Bonn.

VwV-StVO: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO) Vom 26. Januar 2001. In der Fassung vom 8. November 2021 (BAnz AT 15.11.2021 B1)

Bilder

Abbildung 2-1: Wirksamkeit von VBA nach FGSV (2007)

Abbildung 2-2: Untersuchung zur Qualität der Kurzzeitprognose nach MARZ (1999) und Vergleich mit Messdaten am MQ (SCHICK, 2003)

Abbildung 2-3: Räumliche Entwicklung der relativen Akzeptanz auf der SBA A 3 (STEINHOFF et al., 2002)

Abbildung 2-4: Ausstattungsempfehlung für Verkehrsinformation je Detektorabstand (km), Quelle: KESSLER und BOGENBERGER, 2021

Abbildung 2-5: Ausstattungsempfehlung für Verkehrssteuerung je Detektorabstand (km), Quelle: KESSLER und BOGENBERGER, 2021

Abbildung 3-1: Trajektorienanalyse zur Untersuchung der Wirkungen sowie der Befolgung in Abhängigkeit vom AQ-Abstand

Abbildung 3-2: Häufigkeitsverteilung und prozentualen Summenhäufigkeit des Verhältnisses von MQ- zu AQ-Anzahl je SBA in Deutschland nach BISStra (Stand März 2022)

Abbildung 3-3: Gegenüberstellung des AQ-Abstands und des mittleren DTV je Fahrstreifen für 812 AQ-Abschnitte in den Bundesländern BW , RP, SL, HE, NW, NI, HH, HB, SH und BE.

Abbildung 3-4: Schematische Darstellung des Messkonzepts

Abbildung 3-5: Beeinflussungsfaktoren für die Wirksamkeit von SBA

Abbildung 3-6: Vergleich der Verteilung der AQ-Abstände des Untersuchungskollektivs mit mittleren AQ-Abständen der bundesweiten SBA (ohne Berlin, Bremen, NRW, Sachsen-Anhalt)

Abbildung 3-7: Lage der Untersuchungsstrecken (Erstellt mit Kartenmaterial von OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Abbildung 3-8: Lage der Untersuchungsstrecke der A 44, von der AS Soest bis zum AK Dortmund/Unna (Erstellt mit Kartenmaterial von OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Abbildung 3-9: Lage der beiden Untersuchungsstrecken der A 57, zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch (Erstellt mit Kartenmaterial von OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Abbildung 3-10: Lage der beiden Untersuchungsstrecke der A 5, zwischen dem Gambacher Kreuz und der AS Friedberg (Erstellt mit Kartenmaterial von OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Abbildung 3-11: Lage der Untersuchungsstrecke der A 5, von der AS Reiskirchen bis zur Landesstraße L3146 (Erstellt mit Kartenmaterial von OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Abbildung 3-12: Lage der Untersuchungsstrecke der A 2, zwischen der AS Lauenau und der AS Bad Nenndorf (Erstellt mit Kartenmaterial von OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Abbildung 3-13: Lage der Untersuchungsstrecke der A 81, hinter der AS Pleidelsheim in Richtung AS Mundelsheim (Erstellt mit Kartenmaterial von OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Abbildung 4-1: Schemadarstellung AQ-Variante 1: A-, B- und C-Zeichen überkopf

Abbildung 4-2: Schemadarstellung AQ-Variante 2: A-Zeichen überkopf, B- und C-Zeichen seitlich der Richtungsfahrbahn

Abbildung 4-3: Schemadarstellung AQ-Variante 3: A-, B- und C-Zeichen seitlich der Richtungsfahrbahn

Abbildung 4-4: Aktivitätsdiagramm zur Ermittlung des resultierenden A-Zeicheninhalts (analog B- und C-Zeichen)

Abbildung 4-5: Segmentlängen der gemittelten BAB-Längsneigungsinformationen

Abbildung 4-6: Anzahl der Klassen bei Einteilung der AQ-Abschnitte nach AQ-Abstand in 250 m-(links) und 500 m-Klassen (rechts)

Abbildung 4-7: Beispieldarstellung eines Tube-Diagrammes zur kontinuierlichen Darstellung von Lagemaßen der Geschwindigkeitsverteilung

Abbildung 4-8: Anteile der dargestellten WVZ-Inhalte nach AQ (dunkelblau ≙ 100 %)

Abbildung 4-9: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Harmonisierungsschaltungen aus FCD (TLimit = 60,80,100,120 km/h)

Abbildung 4-10: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Stauwarnungsschaltungen aus FCD (TLimit = 60,80,100,120 km/h)

Abbildung 4-11: Vergleich der Geschwindigkeiten an drei aufeinanderfolgenden AQ-Abschnitten entlang der Strecke der A 44 Soest – Unna-Ost

Abbildung 4-12: Vergleich der Geschwindigkeiten während unterschiedlicher Schaltbilder an drei aufeinanderfolgenden AQ-Abschnitten entlang der A 57 Moers – Meerbusch

Abbildung 4-13: Weg-Zeit-Diagramme mit Fahrzeugtrajektorien und Schaltzuständen

Abbildung 4-14: Detaildarstellungen des Weg-Zeit-Diagrammes mit Fahrzeugtrajektorien und Schaltzuständen für die A 5, zwischen der AS Homberg (Ohm) und der L 3146

Abbildung 5-1: Darstellung der zweistreifigen Modellstrecke „Harmonisierung“ in VISSIM

Abbildung 5-2: Leere Trajektorienfelder und vereinzelte, kurze Zusammenbrüche durch nebeneinanderfahrende Lkw

Abbildung 5-3: Längenverteilung von Lkw auf Autobahnen im Jahr 2017 nach GEISTEFELDT et al. (2022)

Abbildung 5-4: Vergleich der FFE-Trajektorien aus der Simulation (oben) mit den empirischen Daten am Beispiel der zweistreifigen A 44 zwischen dem AK Werl und der RS Haar- strang (unten)

Abbildung 5-5: Vergleich der FFE-Trajektorien aus der Simulation (oben) mit den empirischen Daten am Beispiel der dreistreifigen A 2 zwischen der AS Bad Nenndorf und der AS Lauenau (unten)

Abbildung 5-6: Vergleich der FFE-Trajektorien aus der Simulation (oben) mit den empirischen Daten am Beispiel der zweistreifigen A 5 zwischen der AS Homberg (Ohm) und der L 3146 (unten)

Abbildung 5-7: Beispieltrajektorien aus der Simulation einer großflächigen Stauwelle

Abbildung 5-8: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Harmonisierung“ mit 2 Fahrstreifen nach AQ-Abstand

Abbildung 5-9: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Harmonisierung“ mit 3 Fahrstreifen nach AQ-Abstand

Abbildung 5-10: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Harmonisierung“ mit 2 Fahrstreifen nach Steuerungsintervall
Abbildung 5-11: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Harmonisierung“ mit 3 Fahrstreifen nach Steuerungsintervall
Abbildung 5-12: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Harmonisierung“ mit 2 Fahrstreifen nach MQ-AQ-Abstand
Abbildung 5-13: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Harmonisierung“ mit 3 Fahrstreifen nach MQ-AQ-Abstand
Abbildung 5-14: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Stauwarnung“ mit 2 Fahrstreifen nach AQ-Abstand
Abbildung 5-15: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Stauwarnung“ mit 3 Fahrstreifen nach AQ-Abstand
Abbildung 5-16: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Stauwarnung“ mit 2 Fahrstreifen nach Steuerungsintervall
Abbildung 5-17: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Stauwarnung“ mit 3 Fahrstreifen nach Steuerungsintervall
Abbildung 5-18: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Stauwarnung“ mit 2 Fahrstreifen in Abhängigkeit vom MQ-AQ-Abstand
Abbildung 5-19: Ergebnisse der Simulation für die Modellstrecke „Stauwarnung“ mit 3 Fahrstreifen in Abhängigkeit vom MQ-AQ-Abstand
Abbildung 6-1: Schematische Darstellung des Stauwarnungsmodells
Abbildung 6-2: Plötzlicher Stau mit zügiger Ausbreitungsgeschwindigkeit
Abbildung 6-3: Anzahl nicht gewarnter Fahrzeuge in Abhängigkeit vom AQ- und MQ-Abstand
Abbildung 6-4: Dichter Verkehr mit niedriger Stauausbreitungsgeschwindigkeit
Abbildung 6-5: Anzahl nicht gewarnter Fahrzeuge in Abhängigkeit vom AQ- und MQ-Abstand
Abbildung 6-6: Total-Order Index der Sobol-Sensitivitätsanalyse des Stauwarnungsmodells (Rot = Konfidenzintervall bei einem Konfidenzniveau von 95 %)
Abbildung 6-7: First-Order Index der Sobol-Sensitivitätsanalyse des Stauwarnungsmodells (Rot = Konfidenzintervall bei einem Konfidenzniveau von 95 %)
Abbildung 6-8: Second-Order Index der Sobol-Sensitivitätsanalyse des Stauwarnungsmodells
Abbildung A-1: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Harmonisierungsschaltungen aus FCD (TLimit = 60 km/h)
Abbildung A-2: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Harmonisierungsschaltungen aus FCD (TLimit = 80 km/h)
Abbildung A-3: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Harmonisierungsschaltungen aus FCD (TLimit = 100 km/h)
Abbildung A-4: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Harmonisierungsschaltungen aus FCD (TLimit = 120 km/h)
Abbildung A-5: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Stauwarnungsschaltungen aus FCD (TLimit = 60 km/h)

Abbildung A-6: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Stauwarnungsschaltungen aus FCD (TLimit = 80 km/h)

Abbildung A-7: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Stauwarnungsschaltungen aus FCD (TLimit = 100 km/h)

Abbildung A-8: A 44, zwischen der AS Soest und dem AK Dortmund/Unna, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 60 km/h

Abbildung A-9: A 44, zwischen der AS Soest und dem AK Dortmund/Unna, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 80 km/h

Abbildung A-10: A 44, zwischen der AS Soest und dem AK Dortmund/Unna, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 100 km/h

Abbildung A-11: A 44, zwischen der AS Soest und dem AK Dortmund/Unna, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 120 km/h

Abbildung A-12: A 44, zwischen der AS Soest und dem AK Dortmund/Unna, Stautrichterschaltung, TLimit = 60 km/h

Abbildung A-13: A 44, zwischen der AS Soest und dem AK Dortmund/Unna, Stautrichterschaltung, TLimit = 80 km/h

Abbildung A-14: A 57 zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 60 km/h

Abbildung A-15: A 57 zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 80 km/h

Abbildung A-16: A 57 zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 100 km/h

Abbildung A-17: A 57 zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 120 km/h

Abbildung A-18: A 57 zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch, Stautrichterschaltung, TLimit = 60 km/h

Abbildung A-19: A 57 zwischen dem AK Meerbusch und dem AK Moers, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 60 km/h

Abbildung A-20: A 57 zwischen dem AK Meerbusch und dem AK Moers, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 80 km/h

Abbildung A-21: A 57 zwischen dem AK Meerbusch und dem AK Moers, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 100 km/h

Abbildung A-22: A 57 zwischen dem AK Meerbusch und dem AK Moers, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 120 km/h

Abbildung A-23: A 57 zwischen dem AK Meerbusch und dem AK Moers, Stautrichterschaltung, TLimit = 60 km/h

Abbildung A-24: A 57 zwischen dem AK Meerbusch und dem AK Moers, Stautrichterschaltung, TLimit = 100 km/h

Abbildung A-25: A 5 zwischen dem Gambacher Kreuz und der AS Friedberg, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 80 km/h

Abbildung A-26: A 5 zwischen dem Gambacher Kreuz und der AS Friedberg, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 100 km/h

Abbildung A-27: A 5 zwischen dem Gambacher Kreuz und der AS Friedberg, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 120 km/h

Abbildung A-28: A 5 zwischen dem Gambacher Kreuz und der AS Friedberg, Stautrichterschaltung, TLimit = 60 km/h

Abbildung A-29: A 5 zwischen dem Gambacher Kreuz und der AS Friedberg, Stautrichterschaltung, TLimit = 80 km/h

Abbildung A-30: A 5 zwischen der AS Friedberg und dem Gambacher Kreuz, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 80 km/h

Abbildung A-31: A 5 zwischen der AS Friedberg und dem Gambacher Kreuz, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 100 km/h

Abbildung A-32: A 5 zwischen der AS Friedberg und dem Gambacher Kreuz, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 120 km/h

Abbildung A-33: A 5 zwischen der AS Friedberg und dem Gambacher Kreuz, Stautrichterschaltung, TLimit = 60 km/h

Abbildung A-34: A 5 zwischen der AS Friedberg und dem Gambacher Kreuz, Stautrichterschaltung, TLimit = 80 km/h

Abbildung A-35: A 5 von der AS Reiskirchen bis zur L3146, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 60 km/h

Abbildung A-36: A 5 von der AS Reiskirchen bis zur L3146, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 80 km/h

Abbildung A-37: A 5 von der AS Reiskirchen bis zur L3146, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 100 km/h

Abbildung A-38: A 5 von der AS Reiskirchen bis zur L3146, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 120 km/h

Abbildung A-39: A 5 von der AS Reiskirchen bis zur L3146, Stautrichterschaltung, TLimit = 60 km/h

Abbildung A-40: A 5 von der AS Reiskirchen bis zur L3146, Stautrichterschaltung, TLimit = 80 km/h

Abbildung A-41: Weg-Zeit-Diagramm mit Fahrzeugtrajektorien (vKfz) und Schaltzuständen für die A 44, zwischen dem AK Werl und der RS Haarstrang am 18.05.2022

Abbildung A-42: Weg-Zeit-Diagramm mit Fahrzeugtrajektorien (vKfz) und Schaltzuständen für die A 2, zwischen der AS Lauenau und der AS Bad Nenndorf am 12.08.2022

Abbildung A-43: Weg-Zeit-Diagramm mit Fahrzeugtrajektorien (vKfz) und Schaltzuständen für die A 2, zwischen der AS Bad Nenndorf und der AS Lauenau am 12.08.2022

Abbildung A-44: Weg-Zeit-Diagramm mit Fahrzeugtrajektorien (vKfz) und Schaltzuständen für die A 81, zwischen der AS Pleidelsheim und der AS Mundelsheim am 31.05.2022

Abbildung A-45: Weg-Zeit-Diagramm mit Fahrzeugtrajektorien (vKfz) und Schaltzuständen für die A 5, zwischen der AS Obermoerlen und der RS Wetterau am 08.06.2022

Abbildung A-46: Weg-Zeit-Diagramm mit Fahrzeugtrajektorien (vKfz) und Schaltzuständen für die A 5, zwischen der RS Wetterau und der AS Obermoerlen am 08.06.2022

Abbildung A-47: Weg-Zeit-Diagramm mit Fahrzeugtrajektorien (vKfz) und Schaltzuständen für die A 5, zwischen der AS Homberg (Ohm) und der L 3146 am 30.06.2022

Tabellen

Tabelle 3-1: Umfang Luftbildanalyse und Trajektoriendaten

Tabelle 3-2: Schritt 0 der Untersuchungsstreckenauswahl

Tabelle 3-3: Schritte 1 bis 5 der Auswahl der Untersuchungsabschnitte

Tabelle 3-4: Vorauswahl der Untersuchungsstrecken nach der GIS-Auswertung

Tabelle 3-5: Übersicht der Strecken für die Analyse der Daten aus Drohnenerhebungen

Tabelle 3-6: Übersicht der Strecken und ausgewerteten Daten für die Analyse der FCD

Tabelle 4-1: Informationen aus den FCD-Fahrzeugmeldungen

Tabelle 4-2: Beispieldatensatz für die Zuordnung von Bkm-Abschnitten zu den beeinflussenden AQ

Tabelle 4-3: Beispieldatensatz für die Zuordnung von Knotenpunktbereichen zu den beeinflussenden AQ (NKB = Netzknotenbereich)

Tabelle 4-4: Informationen aus den MQ-Daten

Tabelle 4-5: Informationen aus den Schaltdaten

Tabelle 4-6: Standardisierte Bezeichnung und Darstellung der Zeicheninhalte aus Schaltdaten

Tabelle 4-7: Ausgewertete Zeichenkombinationen mit Zuordnung zum Schaltprogramm

Tabelle 4-8: 15-Minuten-Auszug aus einem Jahresdatensatz der aufbereiteten Schaltdaten des AQ A44_1335

Tabelle 4-9: Informationen aus den Umfelddaten

Tabelle 4-10: 10-Minuten-Auszug aus einem Jahresdatensatz der aufbereiteten Umfelddaten an dem AQ A44_1409

Tabelle 4-11: Datenmodell der Trajektoriendaten

Tabelle 4-12: Vergleich der Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (std) von Pkw-Geschwindigkeiten zwischen Daten aus allen MQ entlang einer Strecke und den entsprechenden FCD der Strecke (Ganzjahresdaten aus 2019, alle Angaben in km/h)

Tabelle 4-13: Zuordnung von Verkehrsstufen bei Erstversorgung nach dem MARZ (2018)

Tabelle 4-14: Inhalte des Gesamtdatensatzes der FCD-Analyse

Tabelle 4-15: Mittlere Zeitanteile der dargestellten WVZ-Inhalte an den 93 untersuchten AQ (ab einem Anteil von 0,1 %)

Tabelle 4-16: Anteile der dargestellten WVZ-Inhalte an den 93 untersuchten AQ nach Schaltprogramm

Tabelle 4-17: Exemplarische FCD-Geschwindigkeitsverläufe in Abhängigkeit vom Abstand zum vorausgegangenen und folgenden AQ (T120-Schaltungen)

Tabelle 4-18: Exemplarische FCD-Geschwindigkeitsverläufe in Abhängigkeit vom Abstand zum vorausgegangenen und folgenden AQ (T100-Schaltungen)

Tabelle 4-19: Exemplarische FCD-Geschwindigkeitsverläufe in Abhängigkeit vom Abstand zum vorausgegangenen und folgenden AQ (T80-Schaltungen)

Tabelle 4-20: Exemplarische FCD-Geschwindigkeitsverläufe in Abhängigkeit vom Abstand zum vorausgegangenen und folgenden AQ (T60-Schaltungen)

Tabelle 5-1: Zielgrößen der Simulation

Tabelle 5-2: In PTV Vissim implementierte Lkw-Typen mit Anteil am SV auf Autobahnen
Tabelle 5-3: Übersicht der im Rahmen der Simulation veränderten SBA-Parameter
Tabelle 5-4: Festgelegte Höchstwerte der Konfidenzintervalle im Rahmen der Simulation
Tabelle 6-1: Wertebereiche der Modellparameter für die Sensitivitätsanalyse
Tabelle A-1: Übersicht der in PTV Vissim verwendeten Parameterwerte

Anhang

A.1 Ergebnisse der Korrelationsanalyse

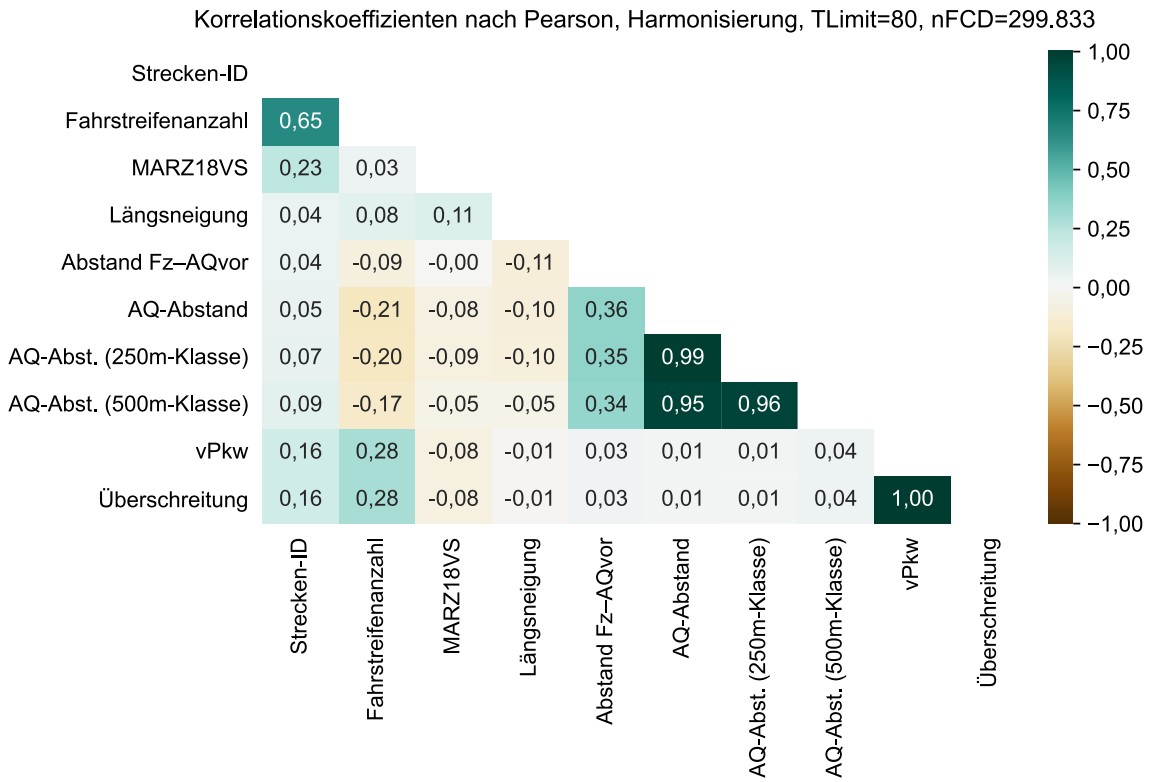
A.1.1 Harmonisierungsschaltungen

Korrelationskoeffizienten nach Pearson, Harmonisierung, TLimit=60, nFCD=53.381

	Strecken-ID	Fahrstreifenanzahl	MARZ18VS	Längsneigung	Abstand Fz–AQvor	AQ-Abstand	AQ-Abst. (250m-Klasse)	AQ-Abst. (500m-Klasse)	vPkw	Überschreitung
Strecken-ID										
Fahrstreifenanzahl	0,55									
MARZ18VS	-0,15	-0,32								
Längsneigung	-0,16	0,08	0,03							
Abstand Fz–AQvor	0,04	-0,02	-0,06	0,01						
AQ-Abstand	0,08	-0,07	-0,18	0,06	0,33					
AQ-Abst. (250m-Klasse)	0,05	-0,08	-0,20	0,06	0,32	0,99				
AQ-Abst. (500m-Klasse)	-0,08	-0,08	-0,20	0,10	0,31	0,96	0,97			
vPkw	-0,11	0,14	-0,25	-0,01	0,05	0,10	0,11	0,15		
Überschreitung	-0,11	0,14	-0,25	-0,01	0,05	0,10	0,11	0,15	1,00	

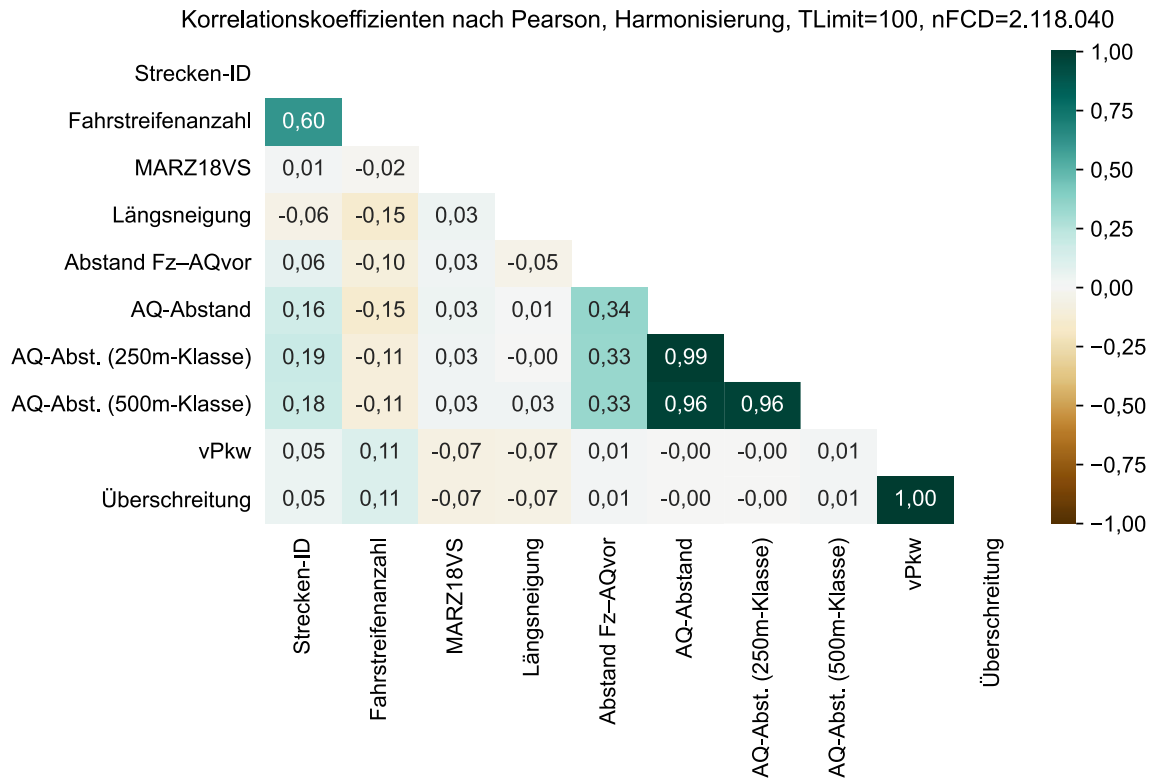
	n_{FCD}	Median	Mittelwert	Standardabw.
Fahrstreifenanzahl	52.912	2	2,0	0,2
MARZ18VS	49.517	3	3,0	0,9
Längsneigung [%]	53.036	0,1	0,2	0,8
Abstand Fz–AQvor [m]	53.381	698,8	733,1	463,0
AQ-Abstand [m]	52.568	1.418	1.467,3	319,5
AQ-Abst. (250m-Kl.) [m]	52.568	1.500	1.579,2	343,6
AQ-Abst. (500m-Kl.) [m]	52.568	1.500	1.690,2	418,9
vPkw [km/h]	53.381	90	89,9	21,7
Überschreitung [km/h]	53.381	30	29,9	21,7

Abbildung A-1: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Harmonisierungsschaltungen aus FCD (TLimit = 60 km/h)



	n_{FCD}	Median	Mittelwert	Standardabw.
Fahrstreifenanzahl	264.432	2	2,1	0,3
MARZ18VS	278.547	2	2,1	0,9
Längsneigung [%]	295.649	-0,1	-0,0	1,0
Abstand Fz–AQvor [m]	299.833	683,2	725,6	468,4
AQ-Abstand [m]	274.722	1.402	1.459,0	340,1
AQ-Abst. (250m-Kl.) [m]	274.722	1.500	1.567,6	360,5
AQ-Abst. (500m-Kl.) [m]	274.722	1.500	1.662,5	415,4
vPkw [km/h]	299.833	97	98,8	18,1
Überschreitung [km/h]	299.833	17	18,8	18,1

Abbildung A-2: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Harmonisierungs-schaltungen aus FCD (TLimit = 80 km/h)

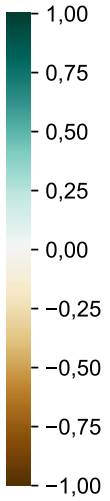


	n_{FCD}	Median	Mittelwert	Standardabw.
Fahrstreifenanzahl	1.911.984	2	2,1	0,3
MARZ18VS	2.007.241	1	1,2	0,5
Längsneigung [%]	2.096.595	0,0	-0,1	0,9
Abstand Fz–AQvor [m]	2.118.040	691,6	730,1	471,4
AQ-Abstand [m]	2.035.304	1.415	1.485,4	312,8
AQ-Abst. (250m-Kl.) [m]	2.035.304	1.500	1.598,0	327,2
AQ-Abst. (500m-Kl.) [m]	2.035.304	1.500	1.706,4	400,3
vPkw [km/h]	2.118.040	107	109,9	13,5
Überschreitung [km/h]	2.118.040	7	9,9	13,5

Abbildung A-3: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Harmonisierungsschaltungen aus FCD (TLimit = 100 km/h)

Korrelationskoeffizienten nach Pearson, Harmonisierung, TLimit=120, nFCD=2.324.112

	Strecken-ID	Fahrstreifenanzahl	MARZ18VS	Längsneigung	Abstand Fz–AQvor	AQ-Abstand	AQ-Abst. (250m-Klasse)	AQ-Abst. (500m-Klasse)	vPkw	Überschreitung
Strecken-ID										
Fahrstreifenanzahl	0,80									
MARZ18VS	0,08	0,12								
Längsneigung	-0,04	0,05	-0,00							
Abstand Fz–AQvor	-0,10	-0,11	-0,00	-0,03						
AQ-Abstand	-0,26	-0,24	-0,02	-0,03	0,41					
AQ-Abst. (250m-Klasse)	-0,24	-0,23	-0,02	-0,05	0,40	0,99				
AQ-Abst. (500m-Klasse)	-0,27	-0,28	-0,02	-0,01	0,39	0,95	0,96			
vPkw	0,13	0,12	-0,05	-0,04	-0,01	-0,02	-0,03	-0,04		
Überschreitung	0,13	0,12	-0,05	-0,04	-0,01	-0,02	-0,03	-0,04	1,00	



	n_{FCD}	Median	Mittelwert	Standardabw.
Fahrstreifenanzahl	2.323.847	3	2,5	0,5
MARZ18VS	2.224.111	1	1,2	0,4
Längsneigung [%]	2.285.863	-0,1	-0,1	1,7
Abstand Fz–AQvor [m]	2.324.112	676,9	733,2	483,6
AQ-Abstand [m]	2.302.966	1.365	1.478,8	402,0
AQ-Abst. (250m-Kl.) [m]	2.302.966	1.500	1.594,3	422,1
AQ-Abst. (500m-Kl.) [m]	2.302.966	1.500	1.740,1	458,7
vPkw [km/h]	2.324.112	126	129,7	15,2
Überschreitung [km/h]	2.324.112	6	9,7	15,2

Abbildung A-4: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Harmonisierungs-schaltungen aus FCD (TLimit = 120 km/h)

A.1.2 Stauwarnungsschaltungen

Korrelationskoeffizienten nach Pearson, Stauwarnung, TLimit=60, nFCD=144.959

	Strecken-ID	Fahrstreifenanzahl	MARZ18VS	Längsneigung	Abstand Fz–AQvor	AQ-Abstand	AQ-Abst. (250m-Klasse)	AQ-Abst. (500m-Klasse)	vPkw	Überschreitung
Strecken-ID										
Fahrstreifenanzahl	0,72									
MARZ18VS	0,17	0,20								
Längsneigung	-0,00	0,01	0,05							
Abstand Fz–AQvor	-0,03	-0,09	-0,11	-0,11						
AQ-Abstand	-0,11	-0,23	-0,30	-0,03	0,39					
AQ-Abst. (250m-Klasse)	-0,09	-0,21	-0,30	-0,03	0,38	0,99				
AQ-Abst. (500m-Klasse)	-0,09	-0,24	-0,28	-0,01	0,36	0,94	0,95			
vPkw	0,22	0,23	-0,12	-0,04	0,02	0,08	0,08	0,09		
Überschreitung	0,22	0,23	-0,12	-0,04	0,02	0,08	0,08	0,09	1,00	

1,00 0,75 0,50 0,25 0,00 −0,25 −0,50 −0,75 −1,00

	n_{FCD}	Median	Mittelwert	Standardabw.
Fahrstreifenanzahl	132.932	2	2,3	0,5
MARZ18VS	141.080	3	2,5	1,0
Längsneigung [%]	139.671	0,0	-0,0	1,3
Abstand Fz–AQvor [m]	144.959	669,0	716,8	470,4
AQ-Abstand [m]	144.813	1.402	1.446,6	365,3
AQ-Abst. (250m-Kl.) [m]	144.813	1.500	1.558,3	392,6
AQ-Abst. (500m-Kl.) [m]	144.813	1.500	1.668,1	413,1
vPkw [km/h]	144.959	98	98,6	25,6
Überschreitung [km/h]	144.959	38	38,6	25,6

Abbildung A-5: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Stauwarnungsschaltungen aus FCD (TLimit = 60 km/h)

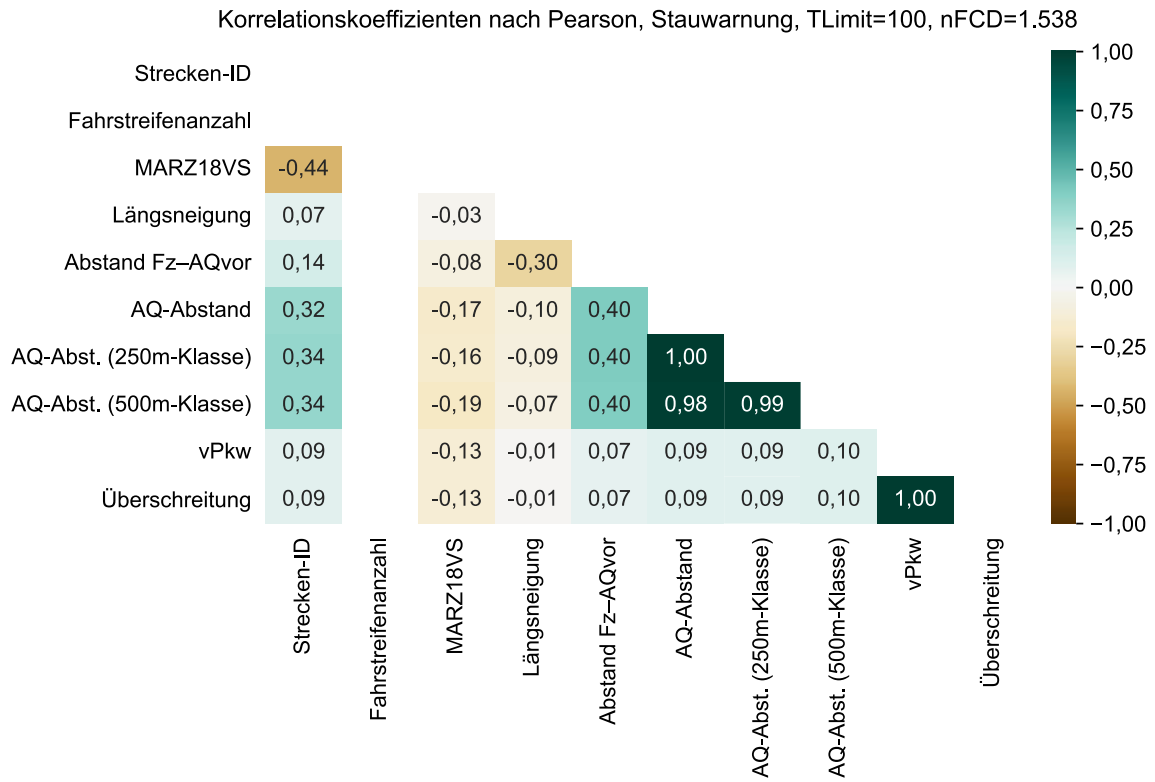
Korrelationskoeffizienten nach Pearson, Stauwarnung, TLimit=80, nFCD=55.199

	Strecken-ID	Fahrstreifenanzahl	MARZ18VS	Längsneigung	Abstand Fz–AQvor	AQ-Abstand	AQ-Abst. (250m-Klasse)	AQ-Abst. (500m-Klasse)	vPkw	Überschreitung
Strecken-ID										
Fahrstreifenanzahl	0,80									
MARZ18VS	0,16	0,22								
Längsneigung	-0,10	-0,01	0,01							
Abstand Fz–AQvor	-0,08	-0,06	-0,01	-0,11						
AQ-Abstand	-0,23	-0,18	-0,02	-0,06	0,36					
AQ-Abst. (250m-Klasse)	-0,16	-0,11	-0,01	-0,08	0,35	0,98				
AQ-Abst. (500m-Klasse)	-0,14	-0,15	-0,03	-0,08	0,33	0,93	0,94			
vPkw	0,24	0,18	-0,08	-0,04	-0,06	-0,07	-0,06	-0,02		
Überschreitung	0,24	0,18	-0,08	-0,04	-0,06	-0,07	-0,06	-0,02	1,00	

1,00 0,75 0,50 0,25 0,00 −0,25 −0,50 −0,75 −1,00

	n_{FCD}	Median	Mittelwert	Standardabw.
Fahrstreifenanzahl	52.387	3	2,5	0,5
MARZ18VS	53.579	1	1,6	0,8
Längsneigung [%]	52.999	-0,3	-0,1	1,6
Abstand Fz–AQvor [m]	55.199	607,6	643,0	414,5
AQ-Abstand [m]	55.192	1.246	1.296,4	304,3
AQ-Abst. (250m-Kl.) [m]	55.192	1.250	1.383,9	326,8
AQ-Abst. (500m-Kl.) [m]	55.192	1.500	1.491,9	362,0
vPkw [km/h]	55.199	111	112,1	22,8
Überschreitung [km/h]	55.199	31	32,1	22,8

Abbildung A-6: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Stauwarnungsschaltungen aus FCD (TLimit = 80 km/h)



	n_{FCD}	Median	Mittelwert	Standardabw.
Fahrstreifenanzahl	1.538	2	2,0	0,0
MARZ18VS	1.457	1	1,1	0,5
Längsneigung [%]	1.520	0,0	0,1	0,6
Abstand Fz–AQvor [m]	1.538	893,8	951,8	613,8
AQ-Abstand [m]	1.538	1.866	1.900,0	473,9
AQ-Abst. (250m-Kl.) [m]	1.538	2.000	2.046,7	512,7
AQ-Abst. (500m-Kl.) [m]	1.538	2.000	2.220,1	590,4
vPkw [km/h]	1.538	111	113,6	16,4
Überschreitung [km/h]	1.538	11	13,6	16,4

Abbildung A-7: Korrelationsmatrix und deskriptive Statistik der Attribute für die Stauwarnungsschaltungen aus FCD (TLimit = 100 km/h)

A.2 Ergebnisse der Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens zwischen zwei AQ

A.2.1 A 44 von der AS Soest bis zum AK Dortmund/Unna

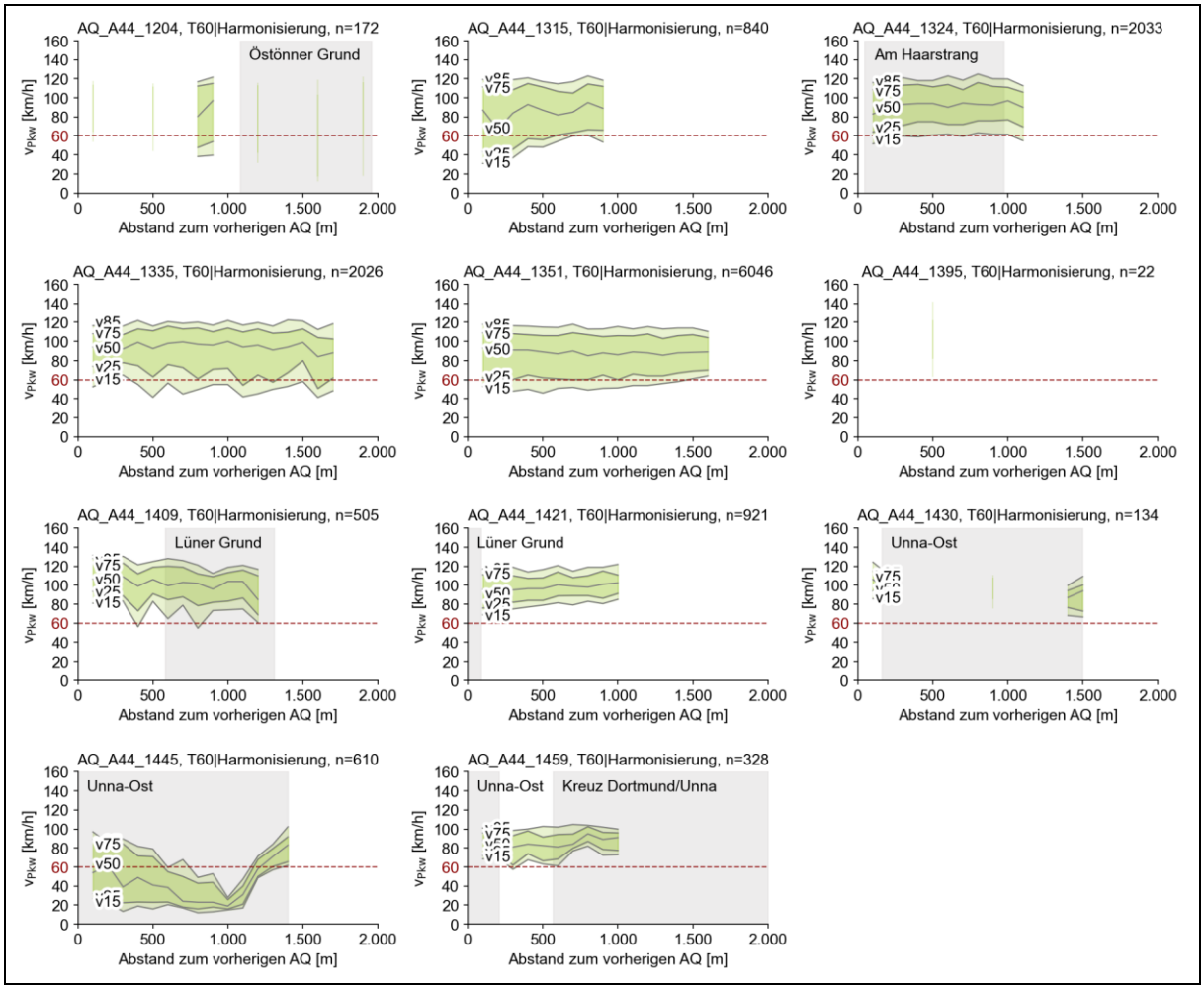


Abbildung A-8: A 44, zwischen der AS Soest und dem AK Dortmund/Unna, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 60 km/h

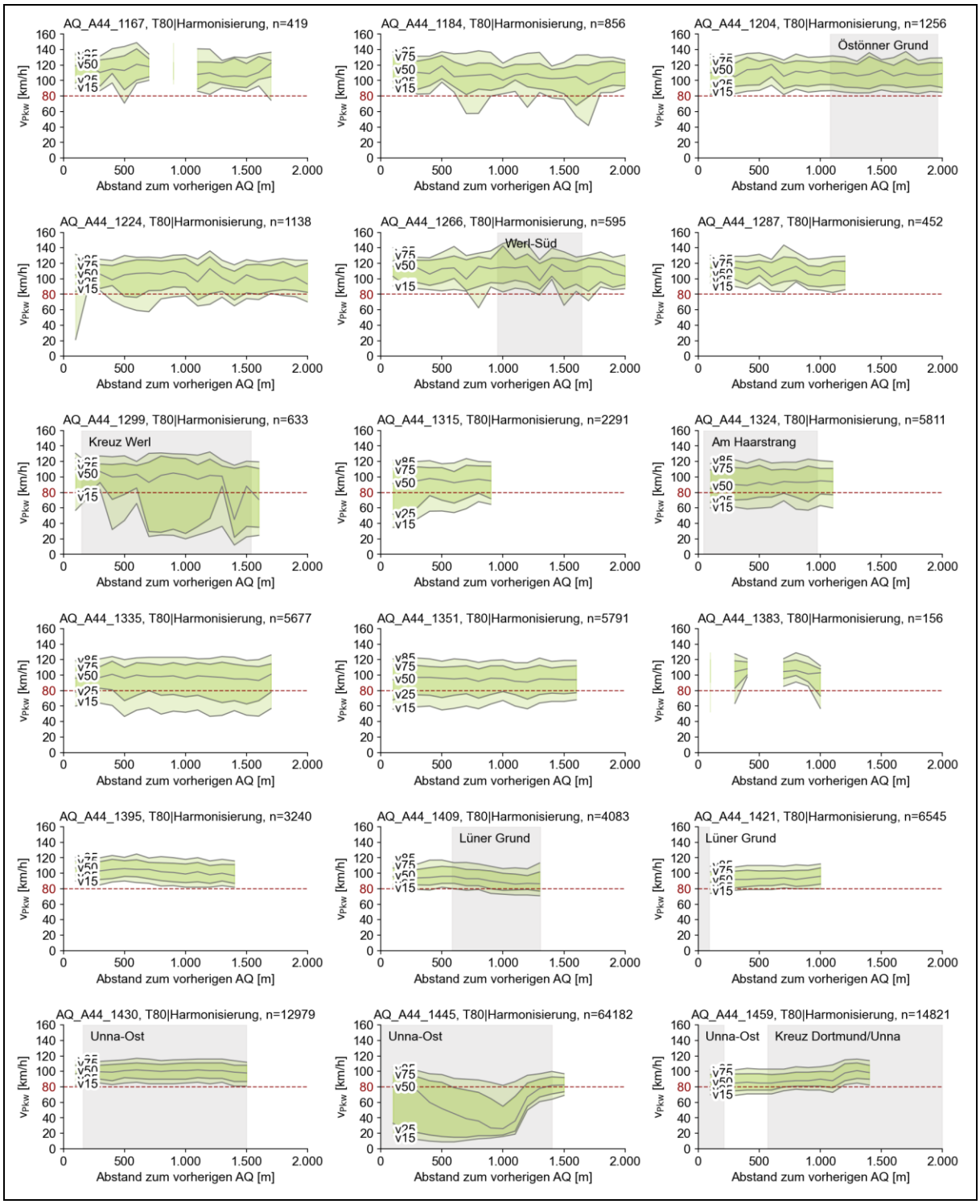


Abbildung A-9: A 44, zwischen der AS Soest und dem AK Dortmund/Unna, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 80 km/h

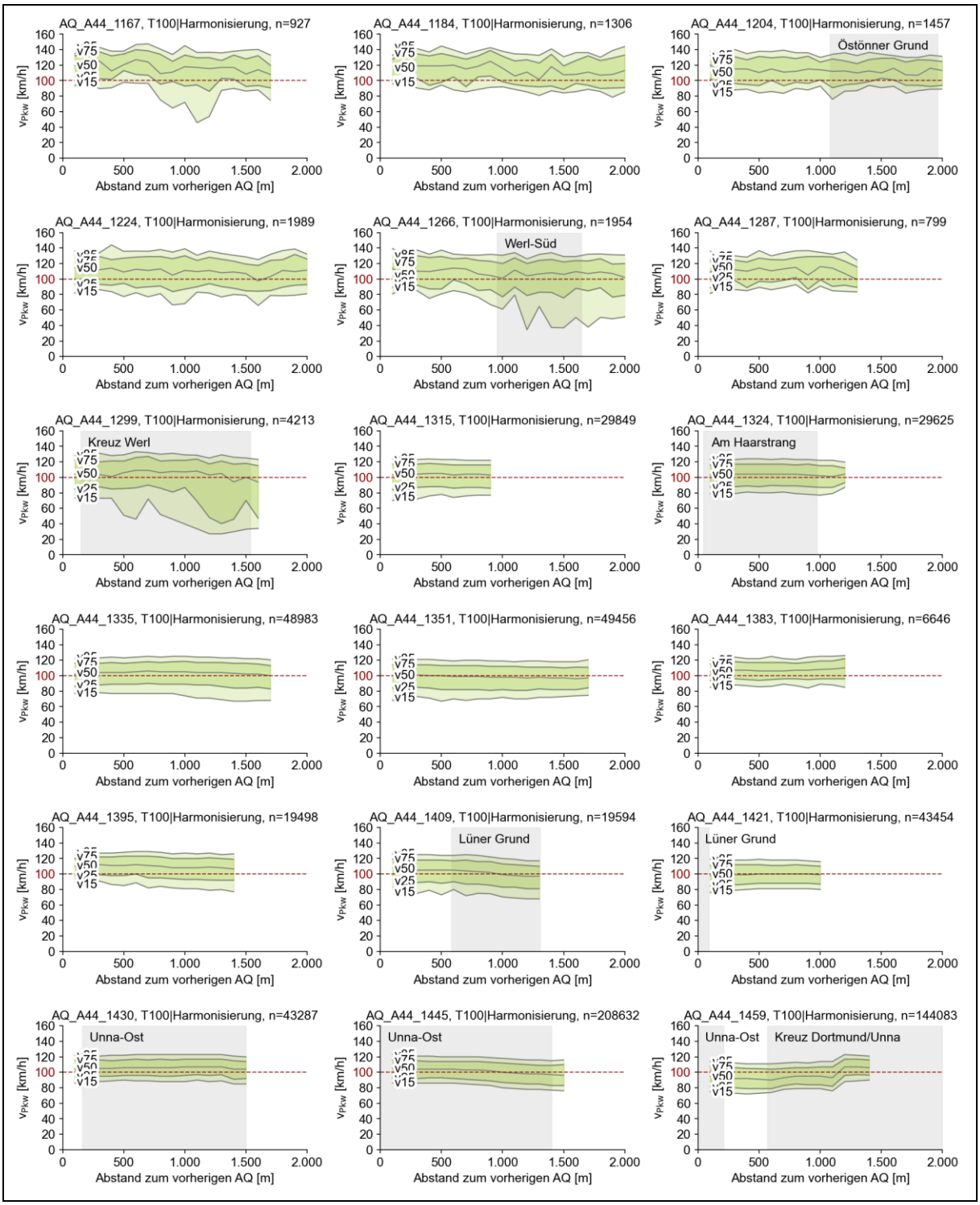


Abbildung A-10: A 44, zwischen der AS Soest und dem AK Dortmund/Unna, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 100 km/h

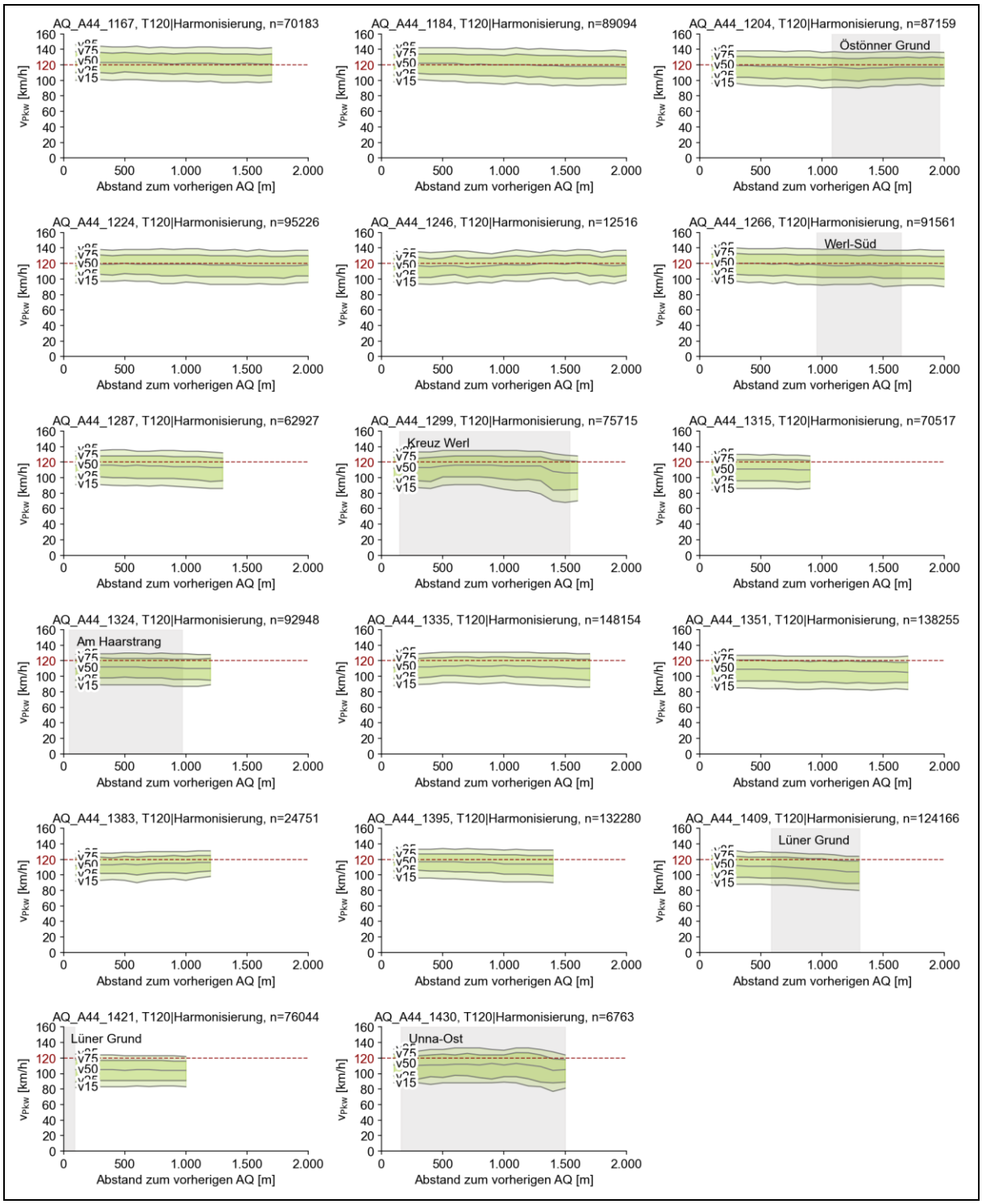


Abbildung A-11: A 44, zwischen der AS Soest und dem AK Dortmund/Unna, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 120 km/h

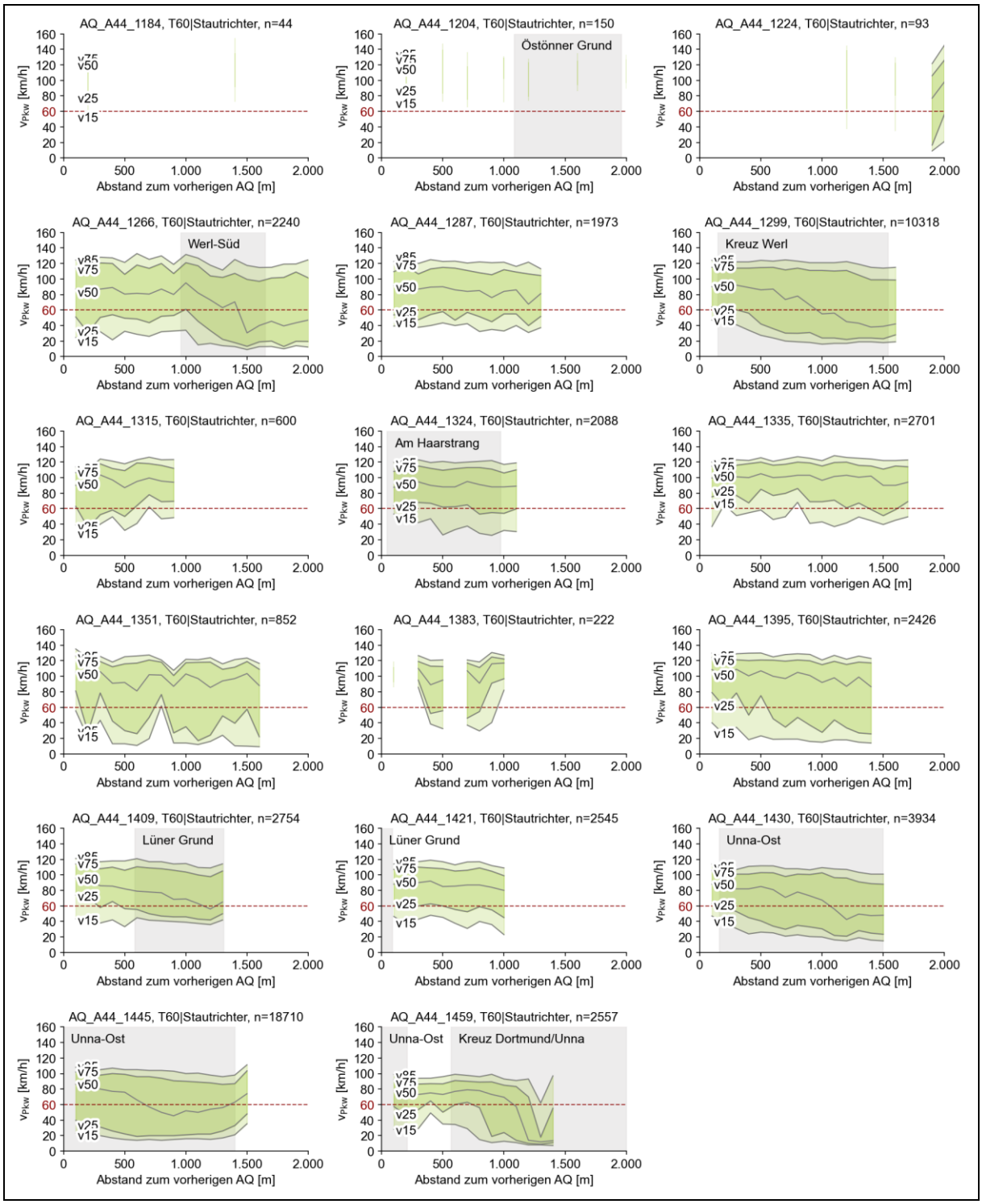


Abbildung A-12: A 44, zwischen der AS Soest und dem AK Dortmund/Unna, Stautrichterschaltung, TLimit = 60 km/h

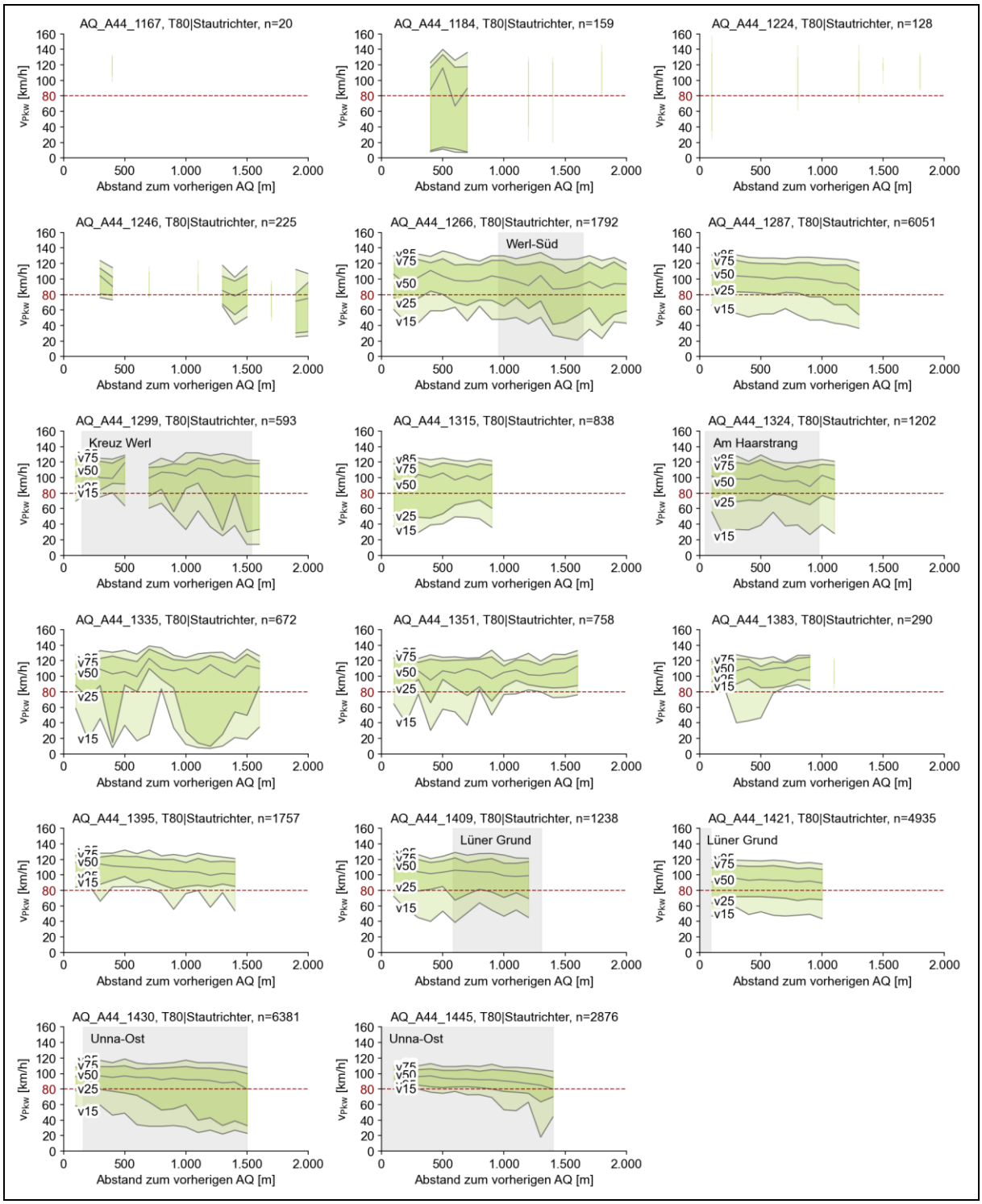


Abbildung A-13: A 44, zwischen der AS Soest und dem AK Dortmund/Unna, Stautrichterschaltung, TLimit = 80 km/h

A.2.2 A 57 zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch

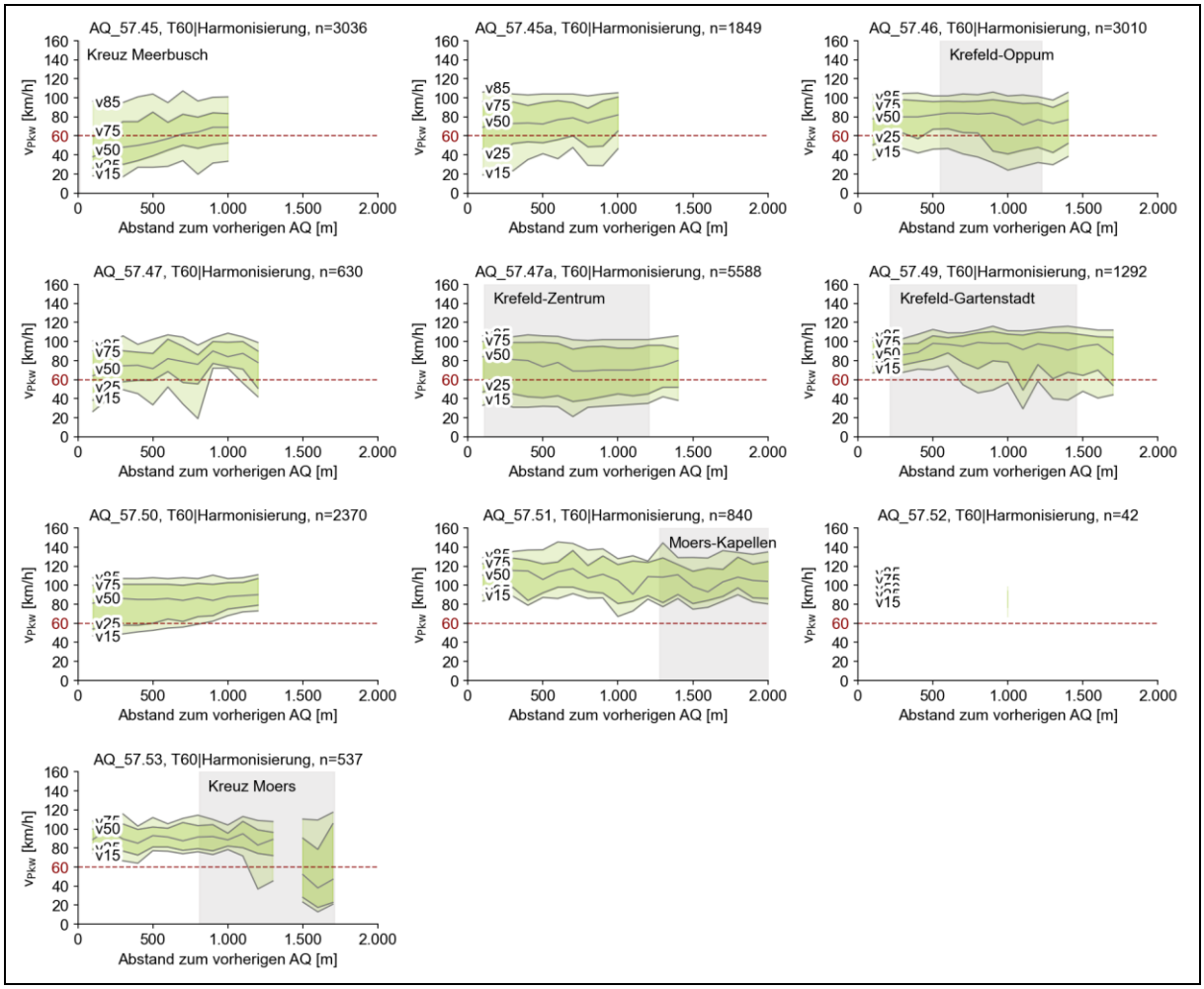


Abbildung A-14: A 57 zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 60 km/h

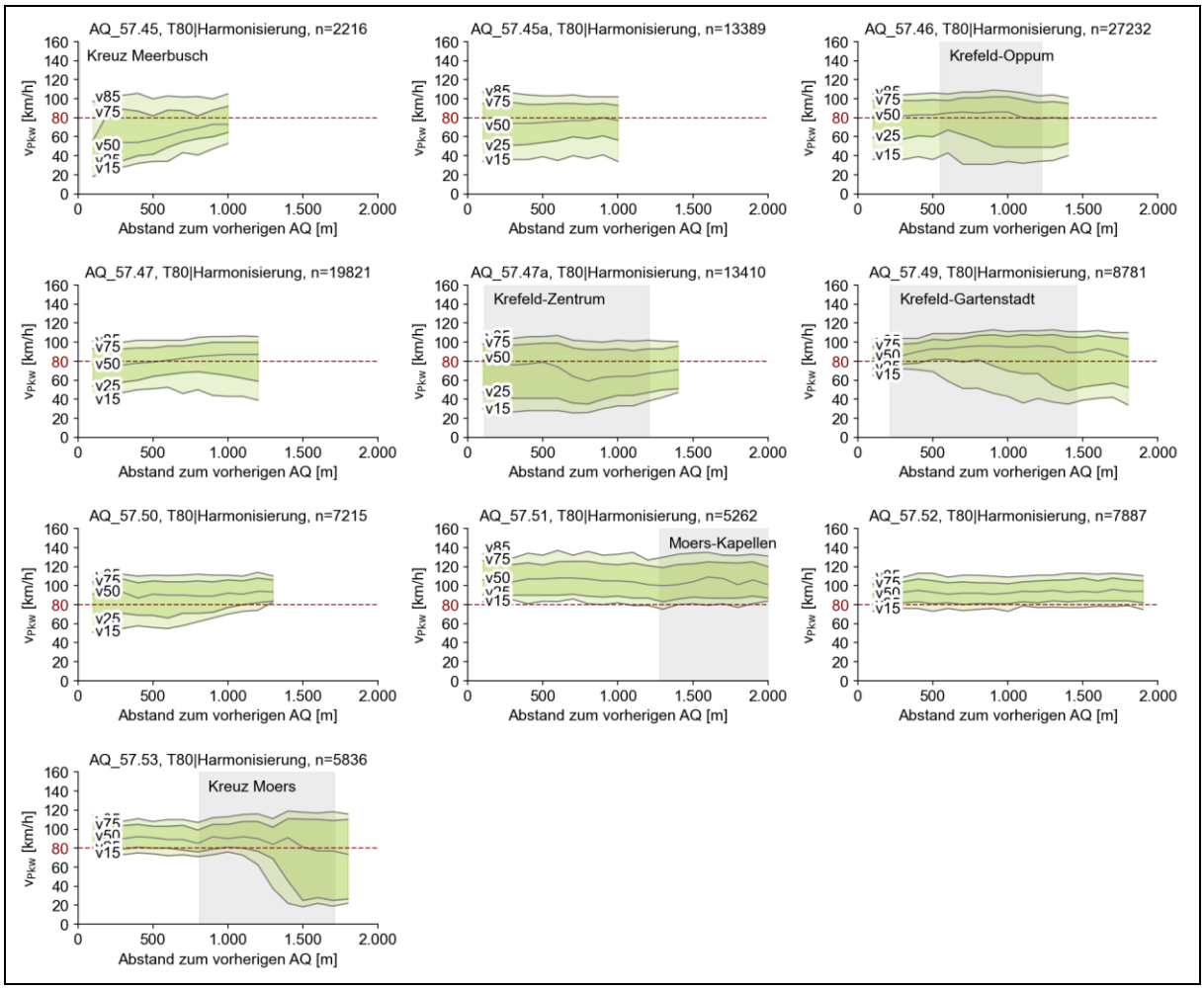


Abbildung A-15: A 57 zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 80 km/h

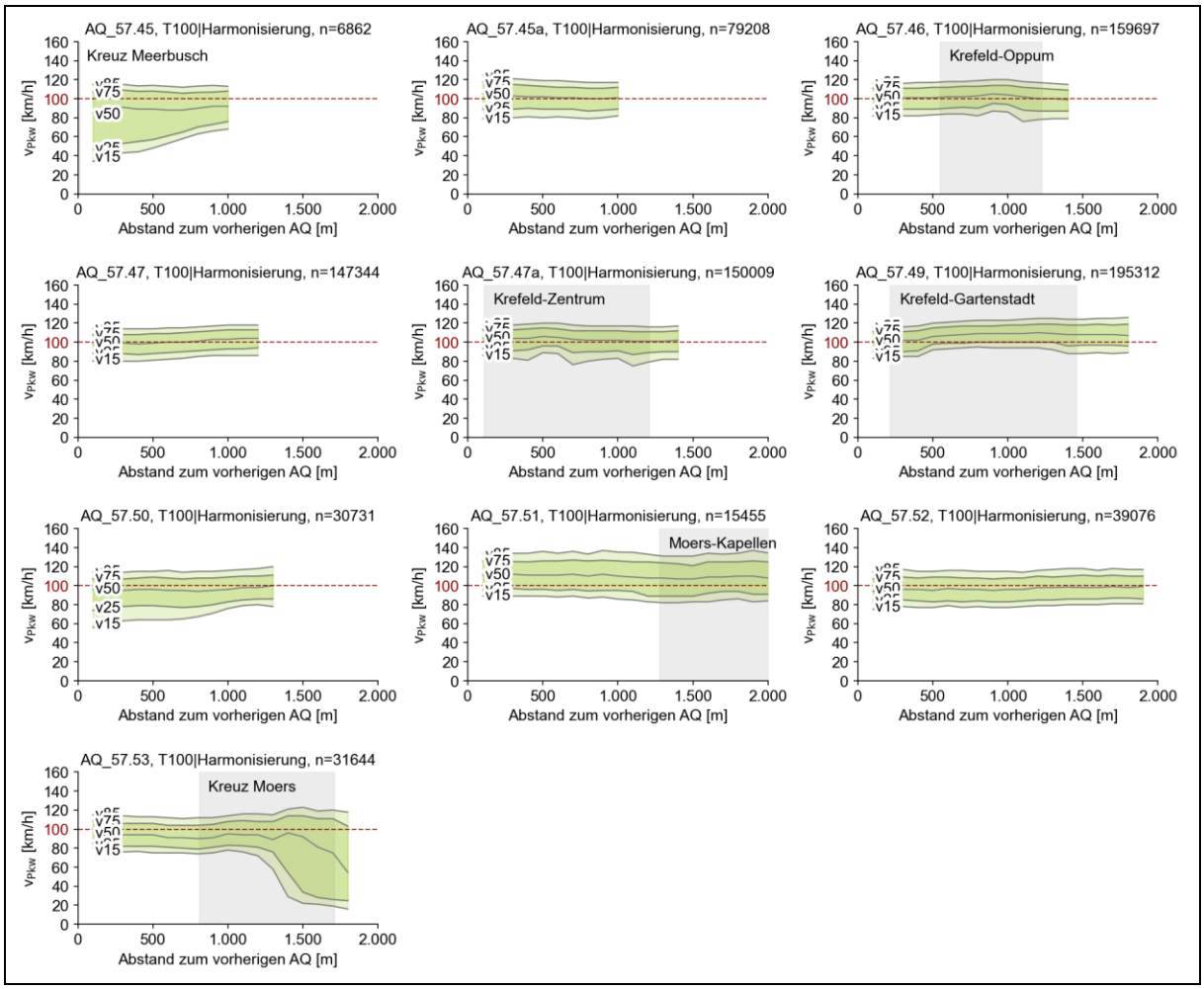


Abbildung A-16: A 57 zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 100 km/h

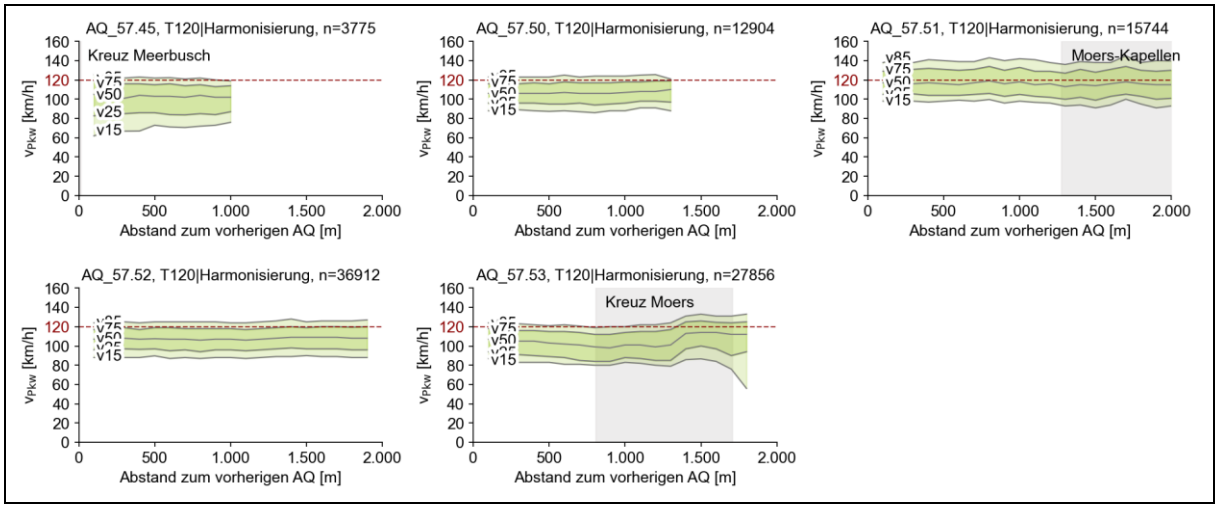


Abbildung A-17: A 57 zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 120 km/h

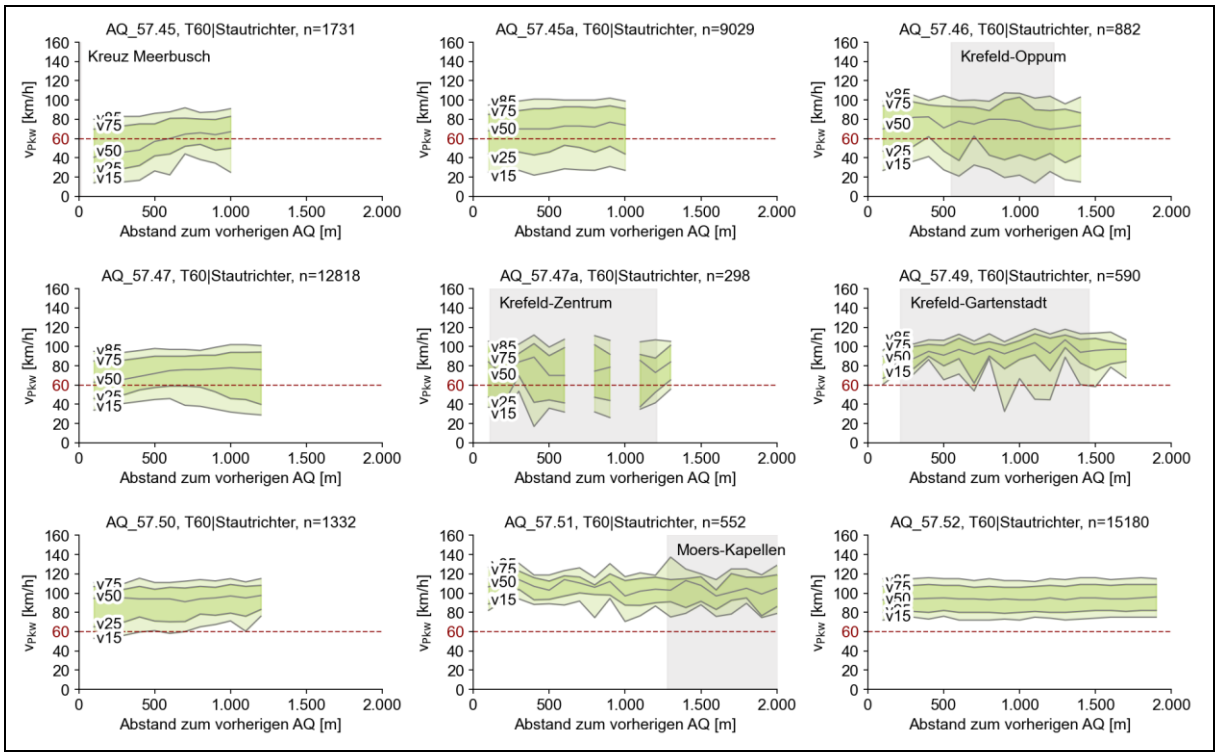


Abbildung A-18: A 57 zwischen dem AK Moers und dem AK Meerbusch, Stautrichterschaltung, TLimit = 60 km/h

A.2.3 A 57 zwischen dem AK Meerbusch und dem AK Moers

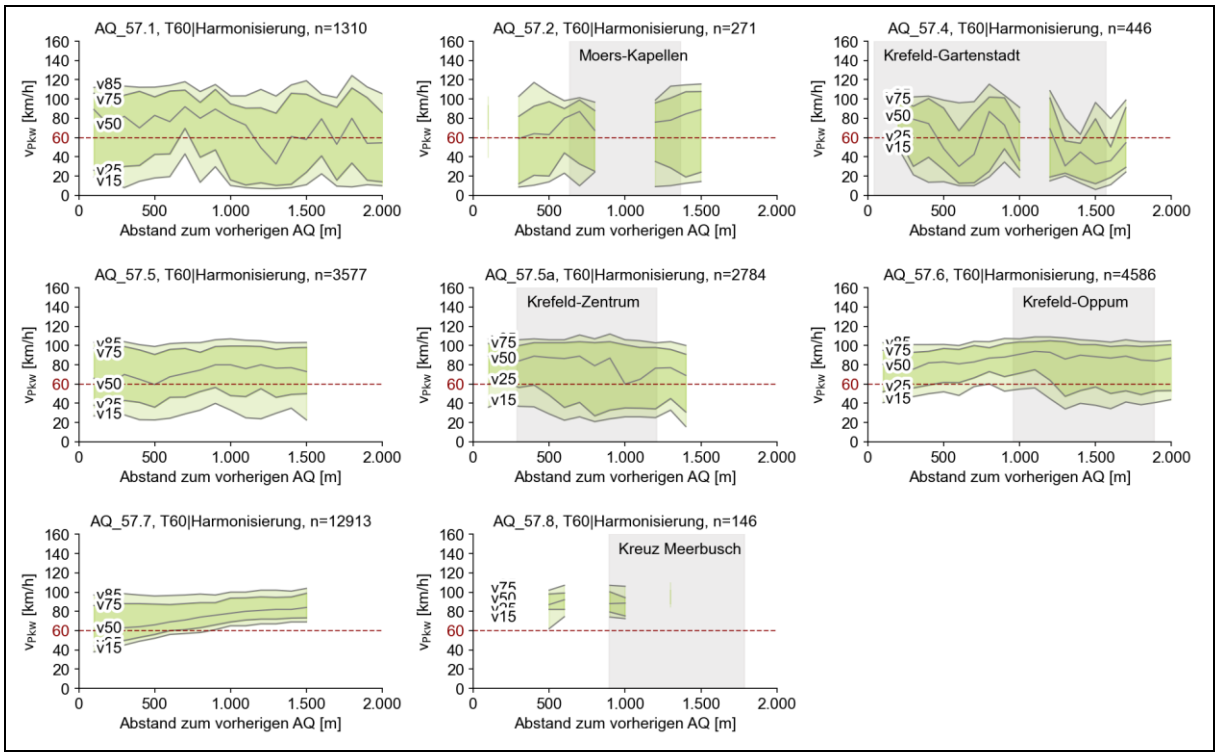


Abbildung A-19: A 57 zwischen dem AK Meerbusch und dem AK Moers, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 60 km/h

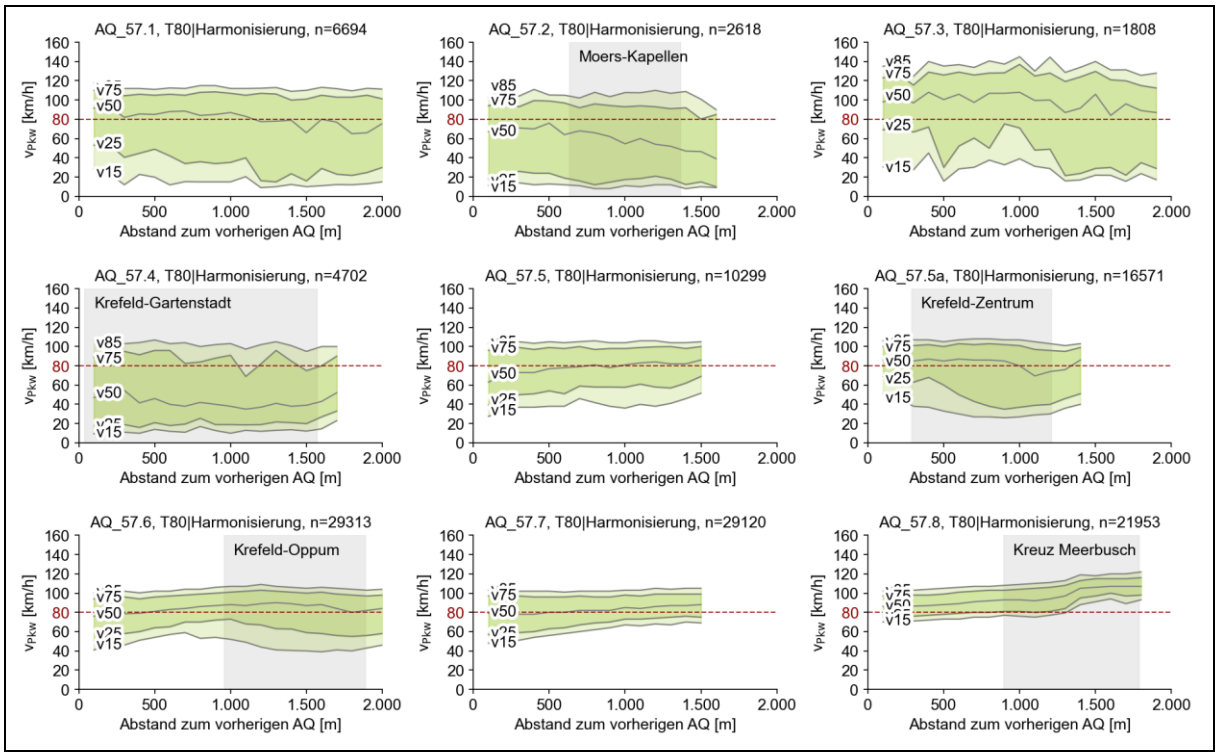


Abbildung A-20: A 57 zwischen dem AK Meerbusch und dem AK Moers, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 80 km/h

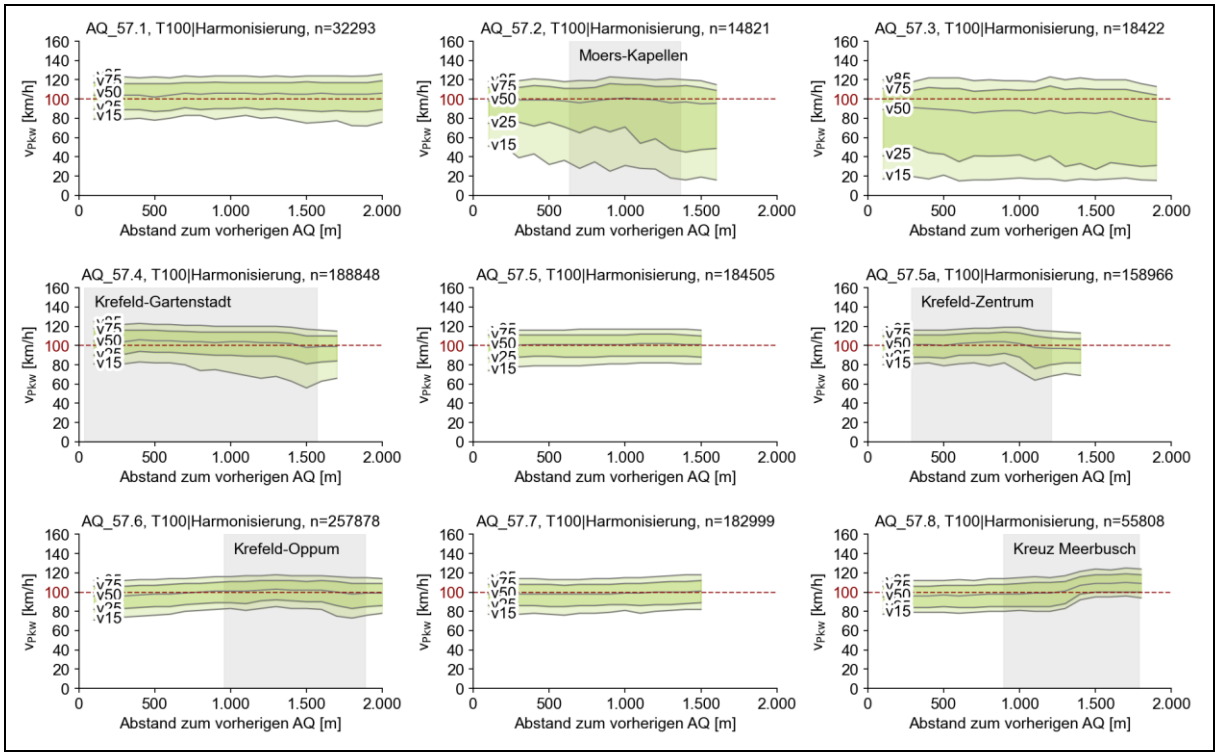


Abbildung A-21: A 57 zwischen dem AK Meerbusch und dem AK Moers, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 100 km/h

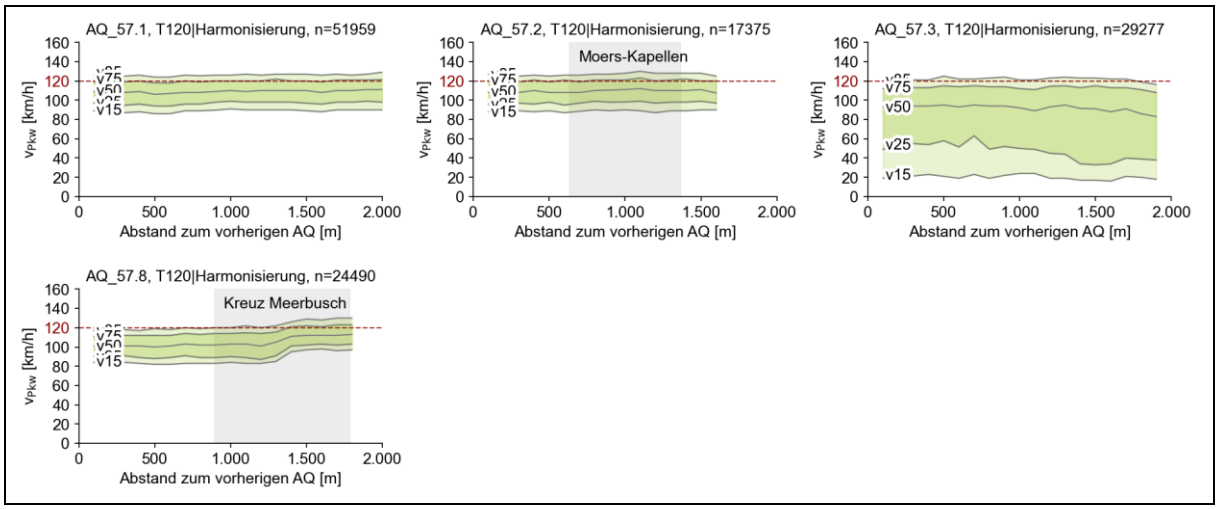


Abbildung A-22: A 57 zwischen dem AK Meerbusch und dem AK Moers, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 120 km/h

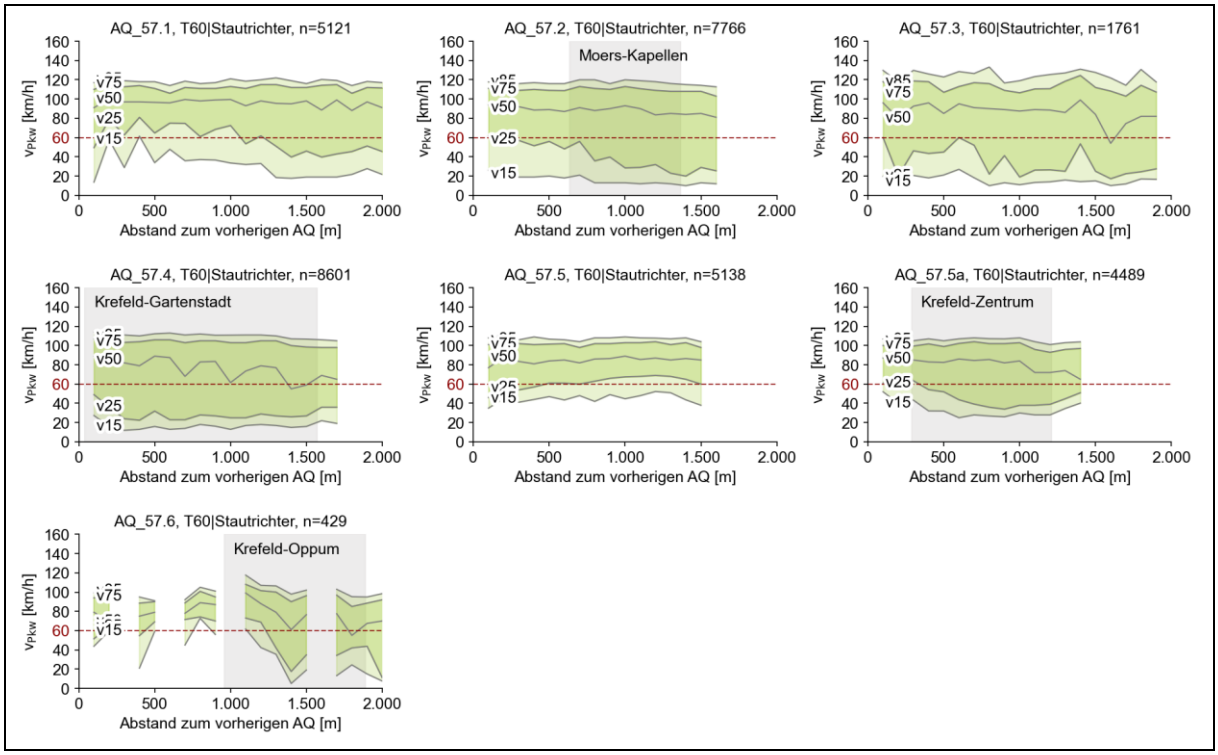


Abbildung A-23: A 57 zwischen dem AK Meerbusch und dem AK Moers, Stautrichterschaltung, TLimit = 60 km/h

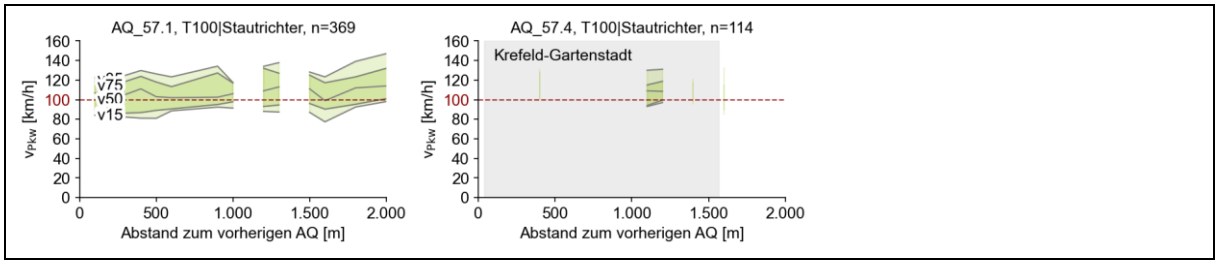


Abbildung A-24: A 57 zwischen dem AK Meerbusch und dem AK Moers, Stautrichterschaltung, TLimit = 100 km/h

A.2.4 A 5 zwischen dem Gambacher Kreuz und der AS Friedberg

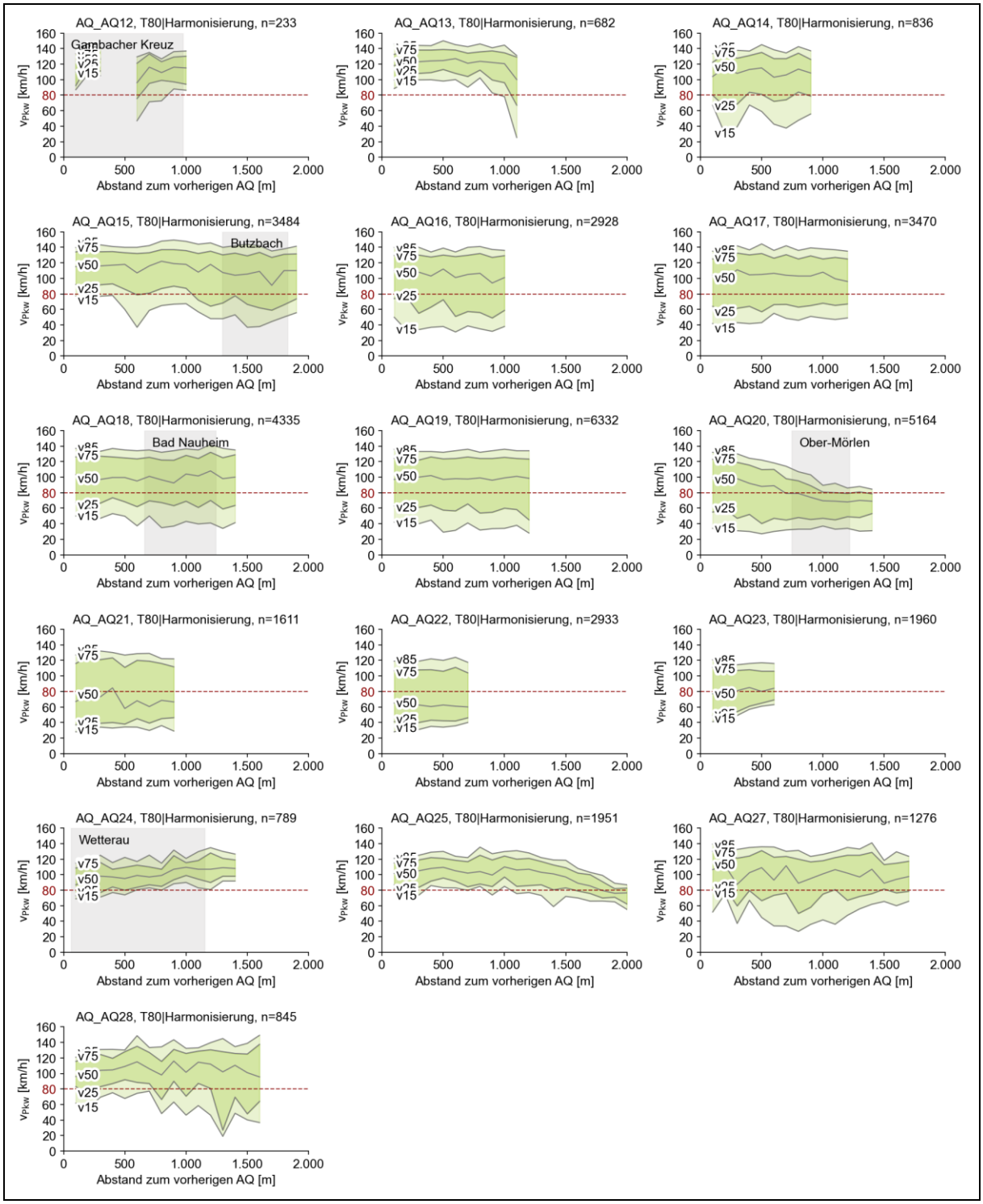


Abbildung A-25: A 5 zwischen dem Gambacher Kreuz und der AS Friedberg, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 80 km/h

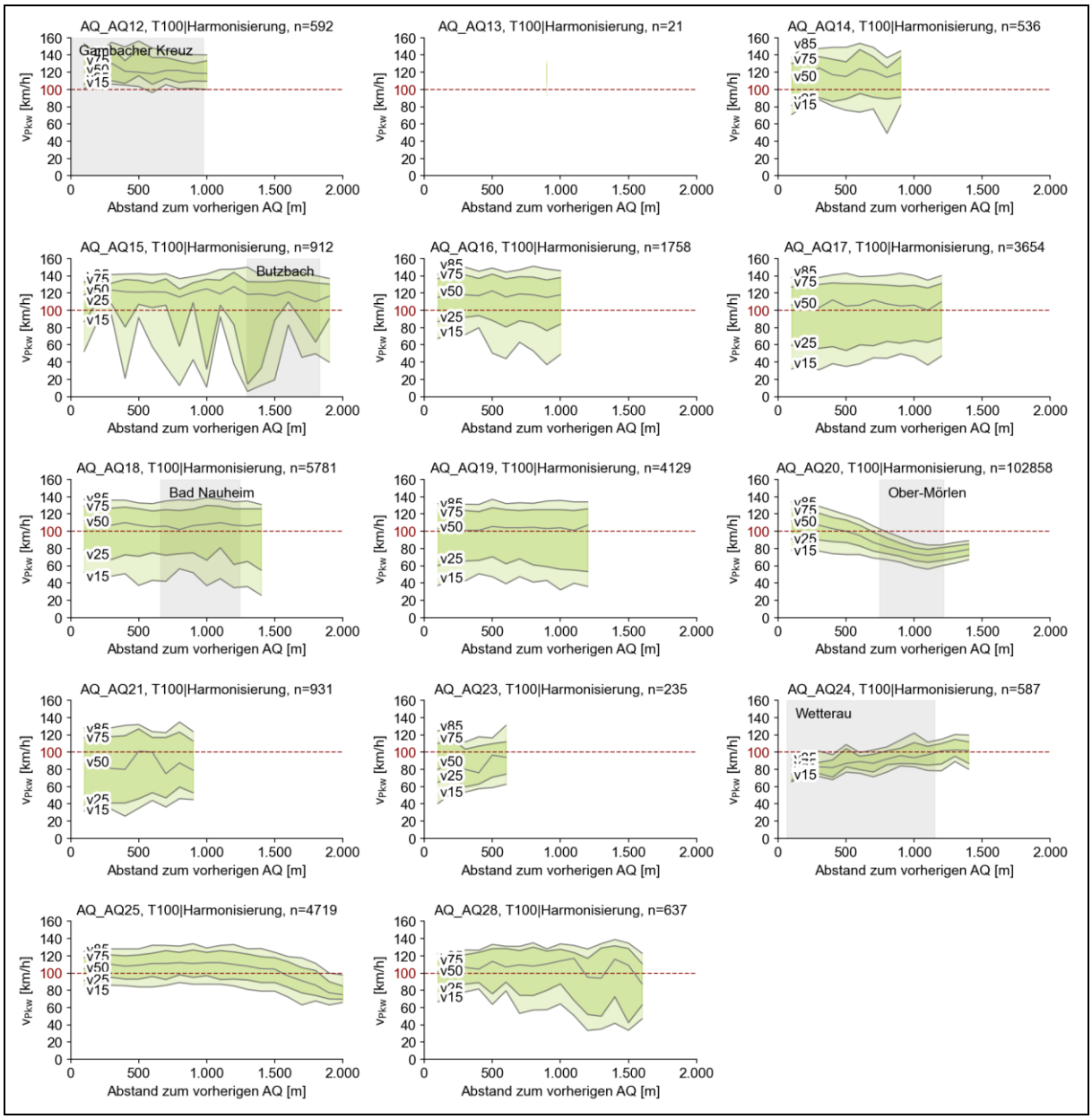


Abbildung A-26: A 5 zwischen dem Gambacher Kreuz und der AS Friedberg, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 100 km/h

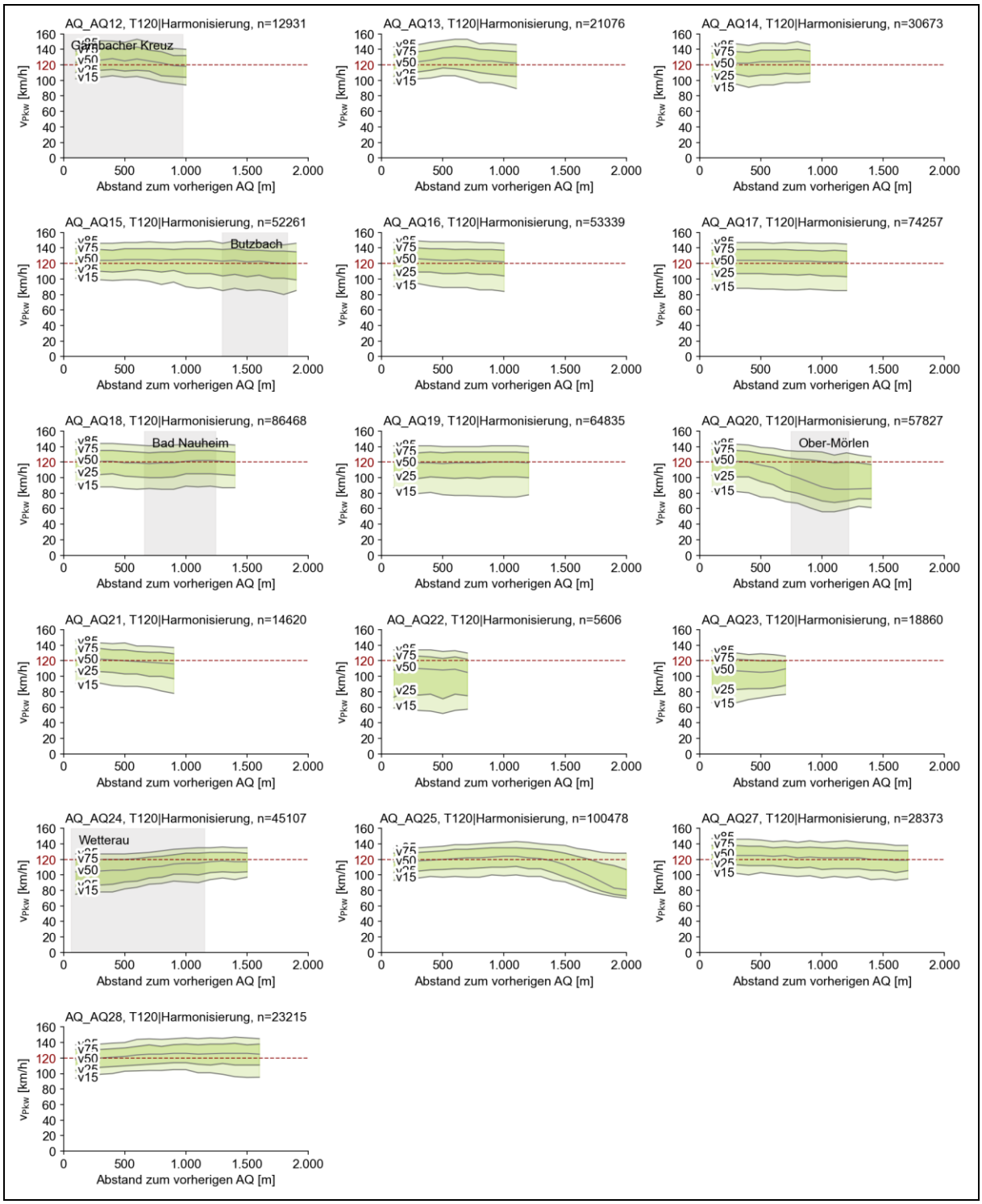


Abbildung A-27: A 5 zwischen dem Gambacher Kreuz und der AS Friedberg, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 120 km/h

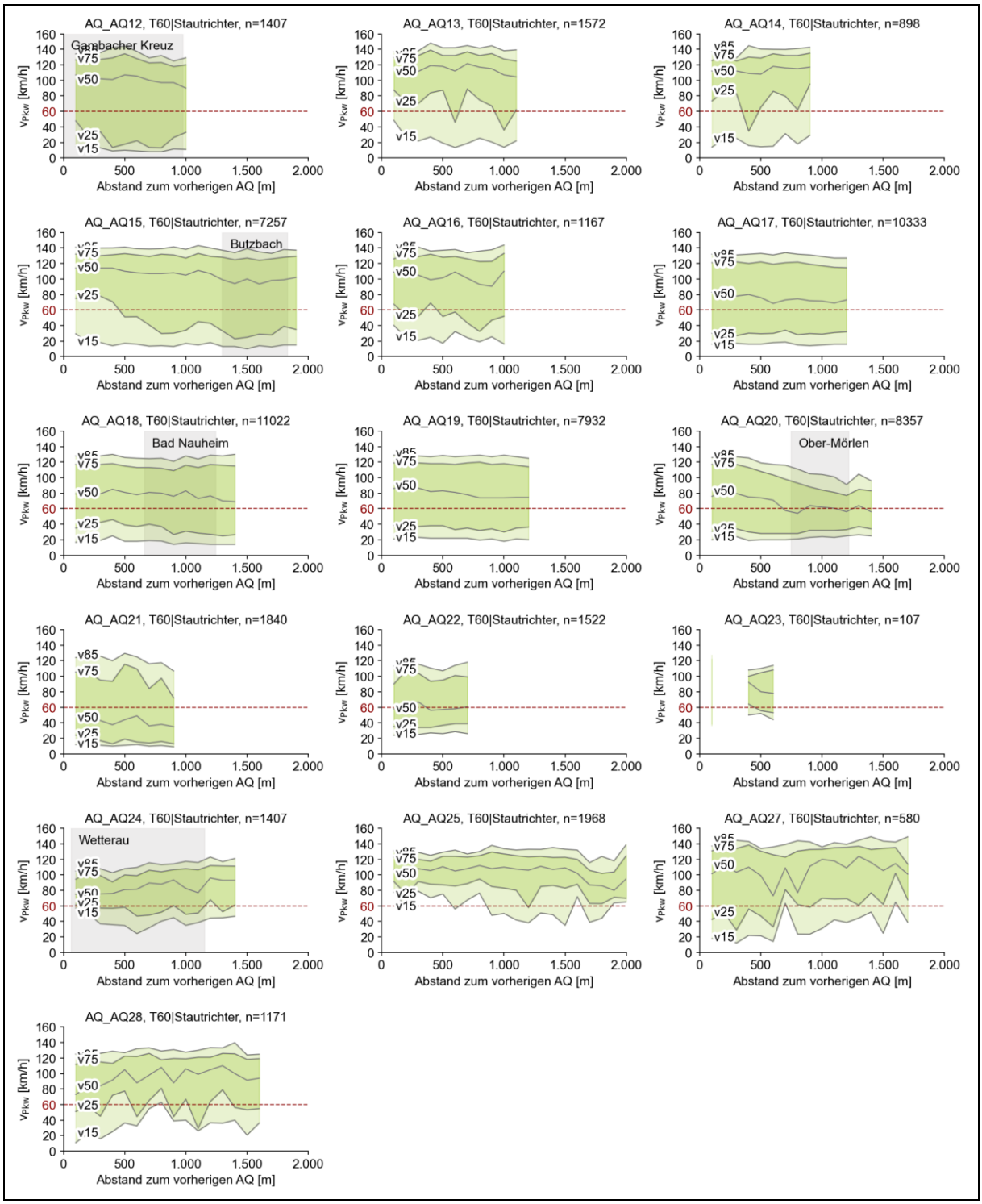


Abbildung A-28: A 5 zwischen dem Gambacher Kreuz und der AS Friedberg, Stautrichterschaltung, TLimit = 60 km/h

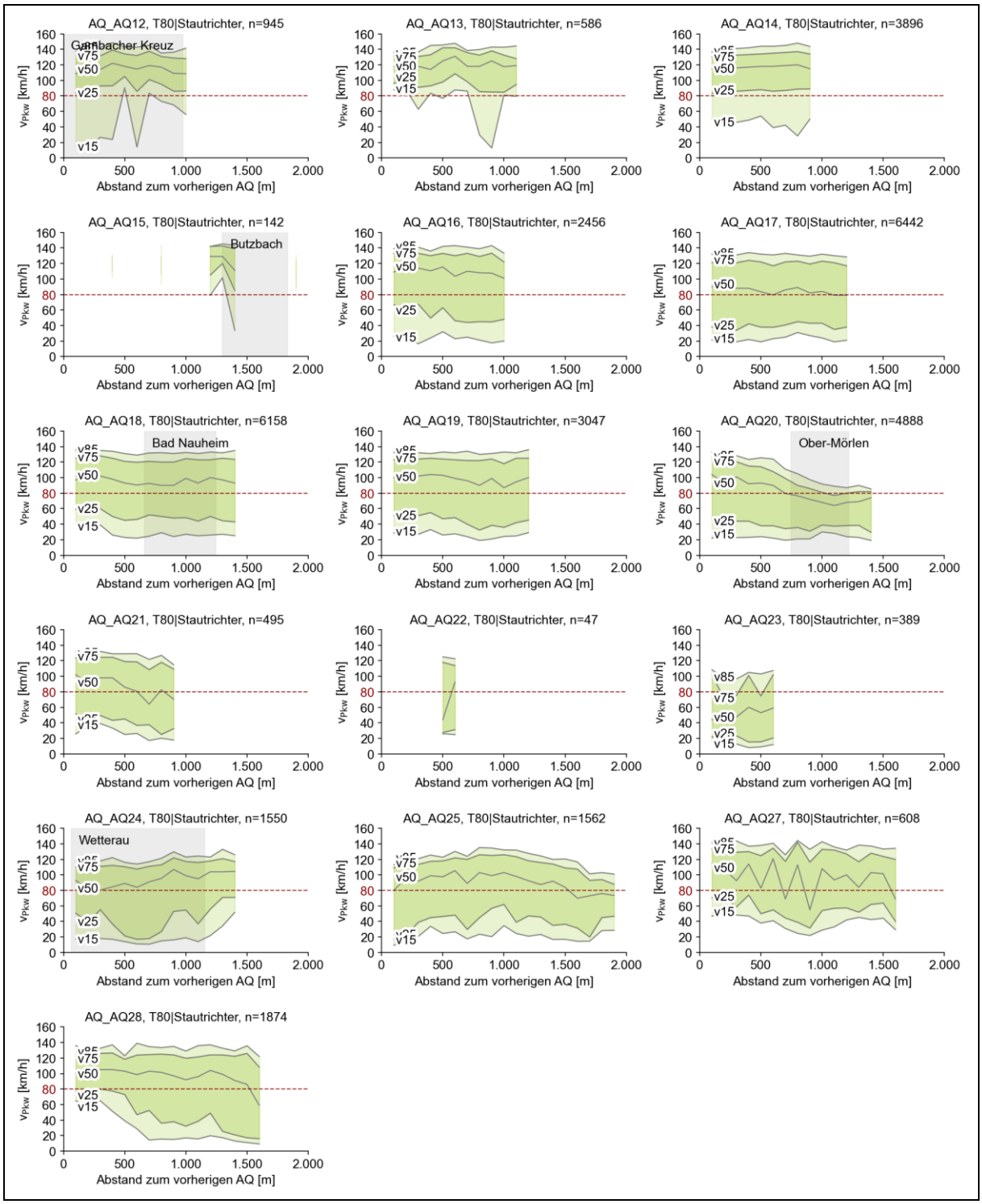


Abbildung A-29: A 5 zwischen dem Gambacher Kreuz und der AS Friedberg, Stautrichterschaltung, TLimit = 80 km/h

A.2.5 A 5 zwischen der AS Friedberg und dem Gambacher Kreuz

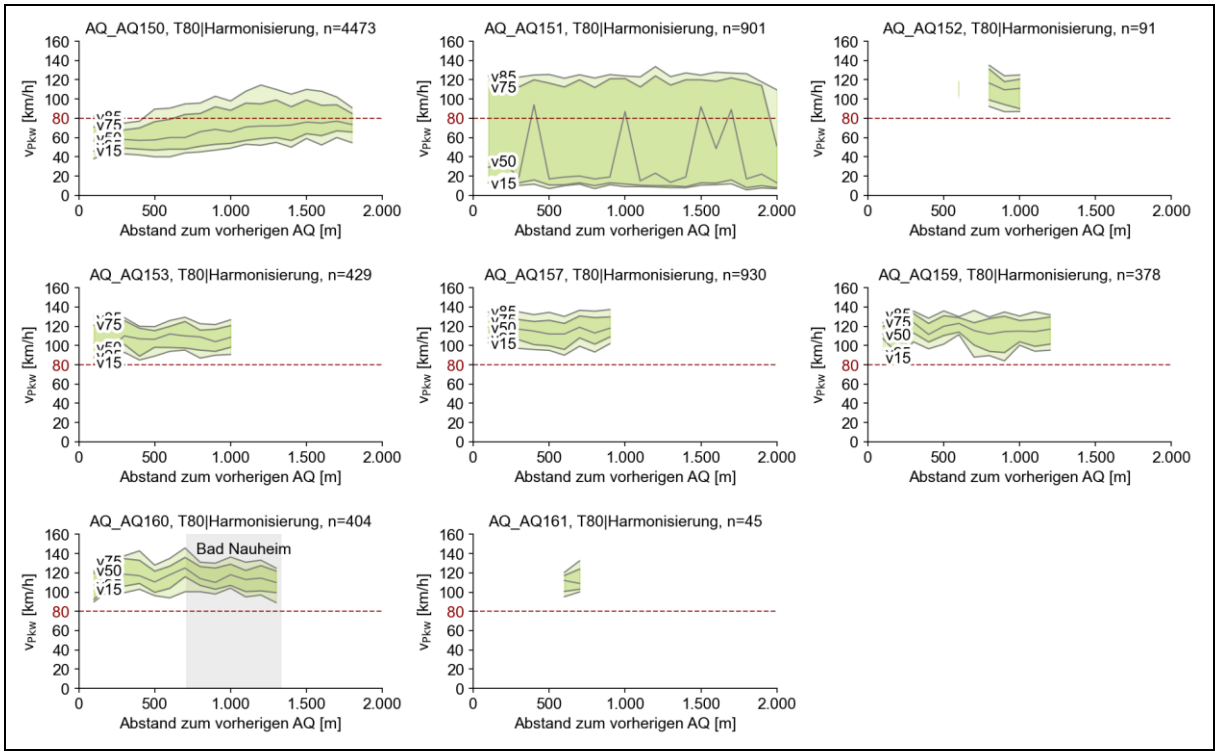


Abbildung A-30: A 5 zwischen der AS Friedberg und dem Gambacher Kreuz, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 80 km/h

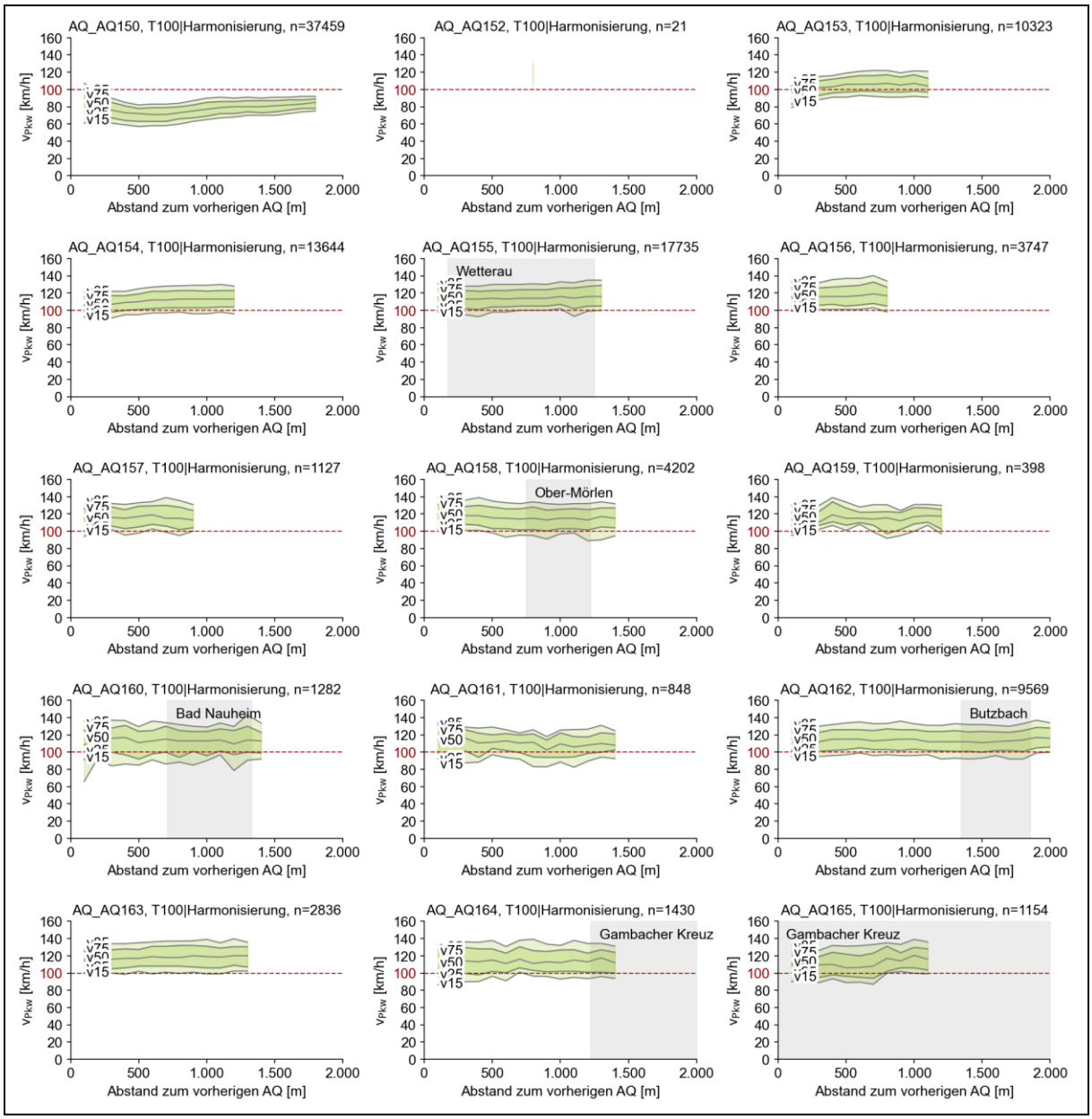


Abbildung A-31: A 5 zwischen der AS Friedberg und dem Gambacher Kreuz, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 100 km/h

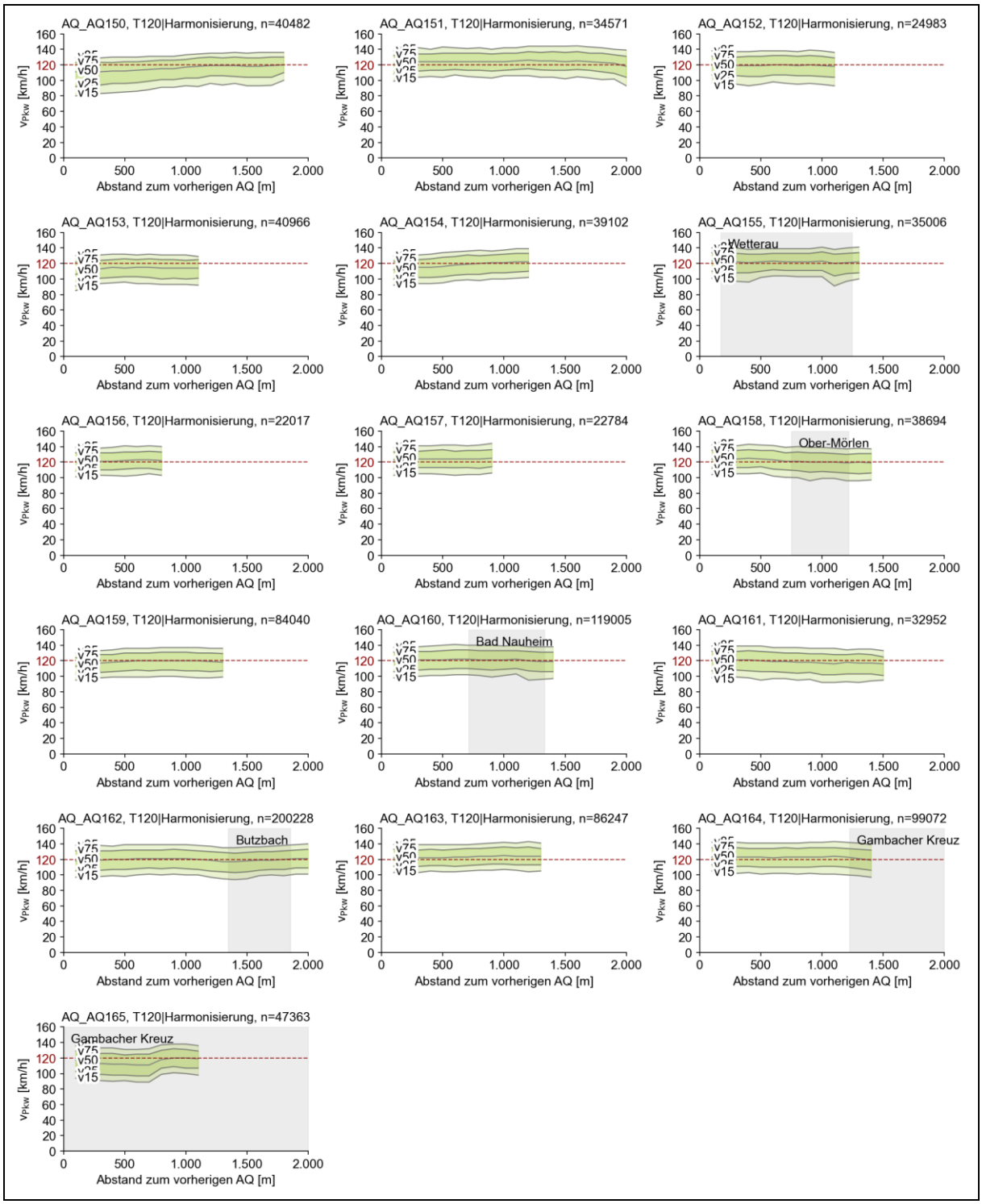


Abbildung A-32: A 5 zwischen der AS Friedberg und dem Gambacher Kreuz, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 120 km/h

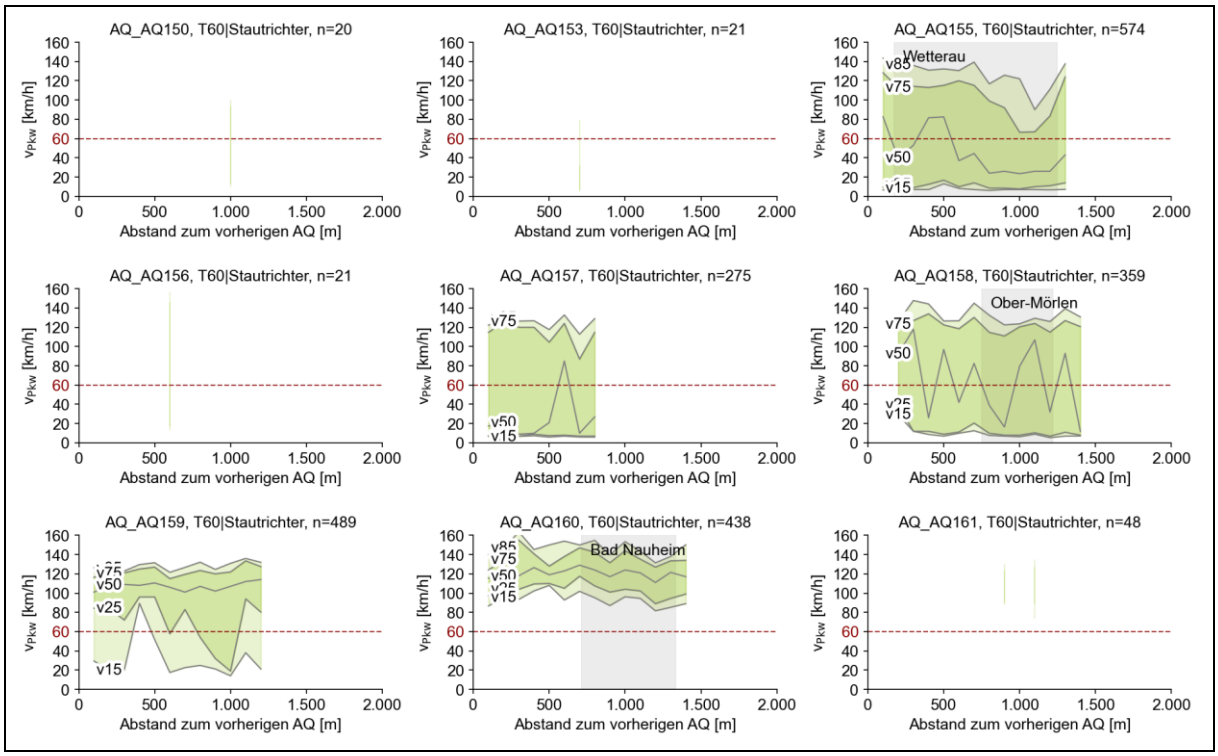


Abbildung A-33: A 5 zwischen der AS Friedberg und dem Gambacher Kreuz, Stautrichterschaltung, TLimit = 60 km/h

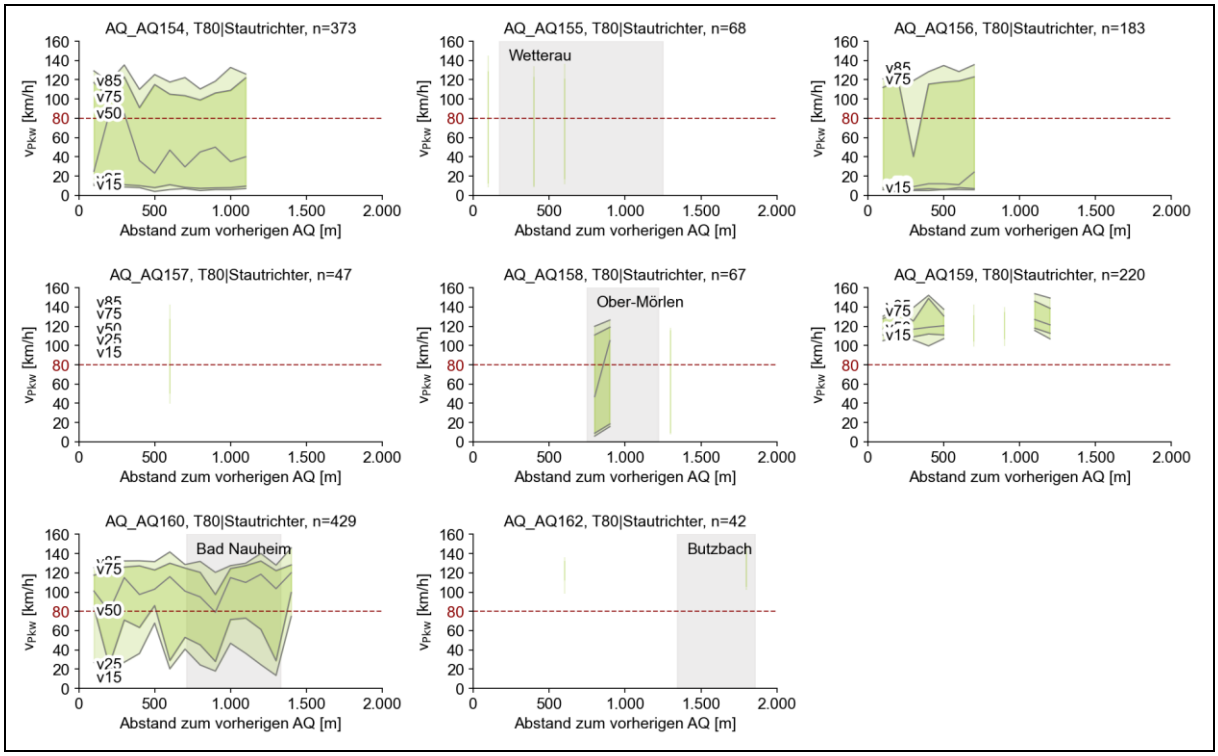


Abbildung A-34: A 5 zwischen der AS Friedberg und dem Gambacher Kreuz, Stautrichterschaltung, TLimit = 80 km/h

A.2.6 A 5 von der AS Reiskirchen bis zur L3146

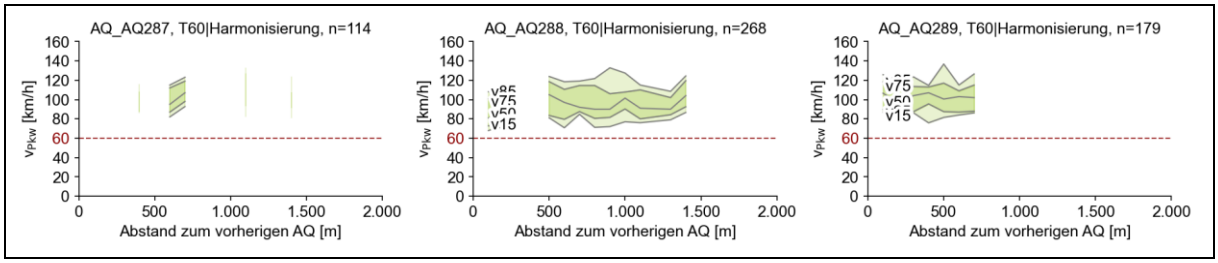


Abbildung A-35: A 5 von der AS Reiskirchen bis zur L3146, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 60 km/h

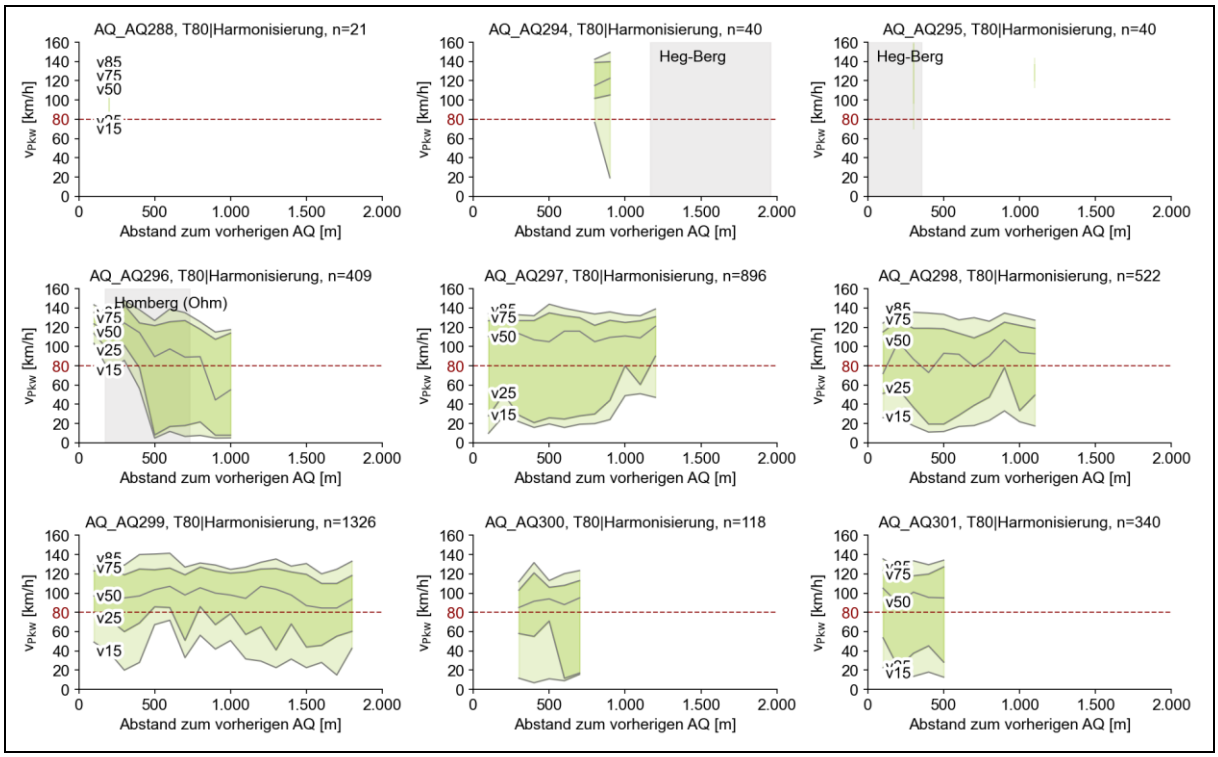


Abbildung A-36: A 5 von der AS Reiskirchen bis zur L3146, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 80 km/h

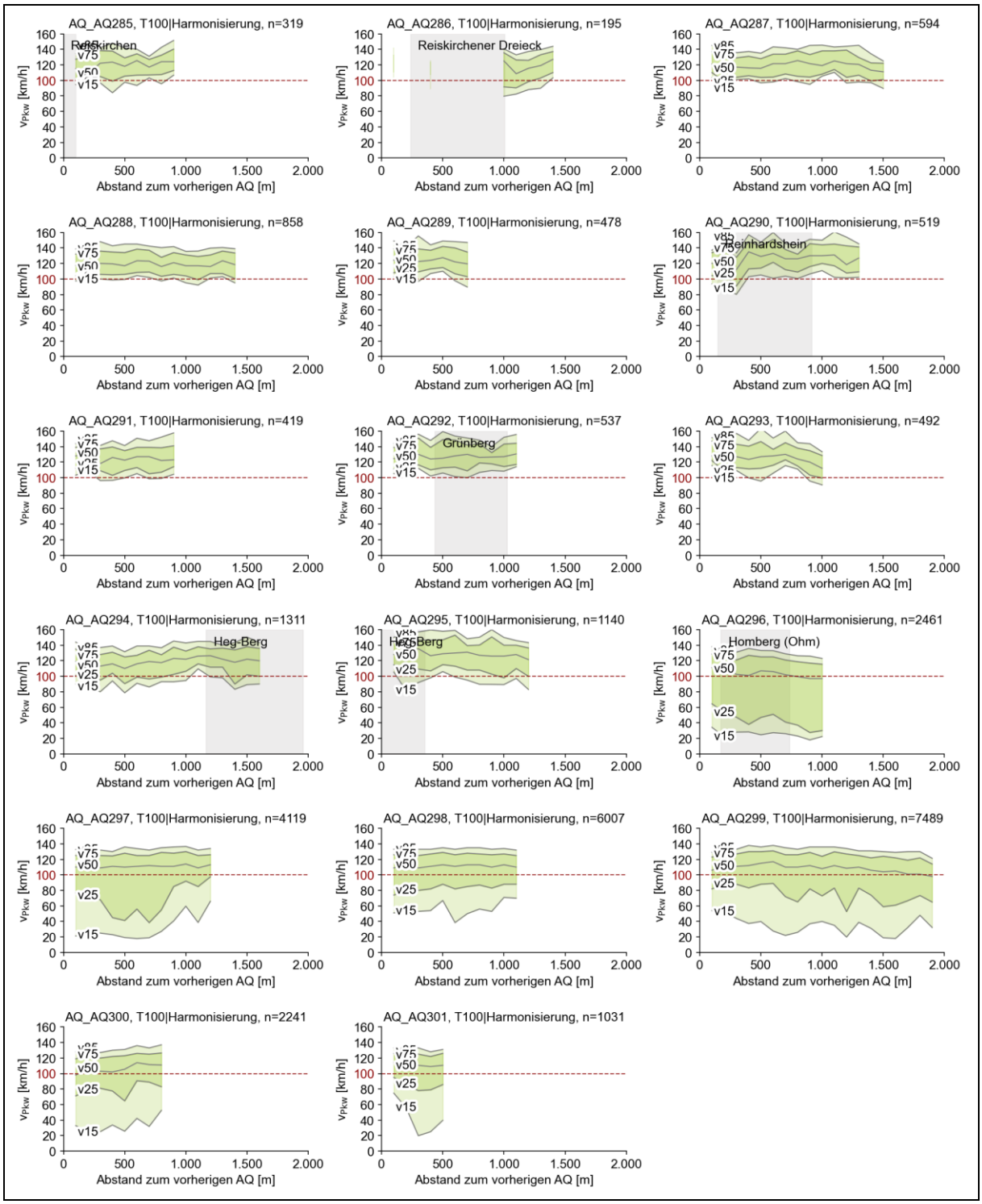


Abbildung A-37: A 5 von der AS Reiskirchen bis zur L3146, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 100 km/h

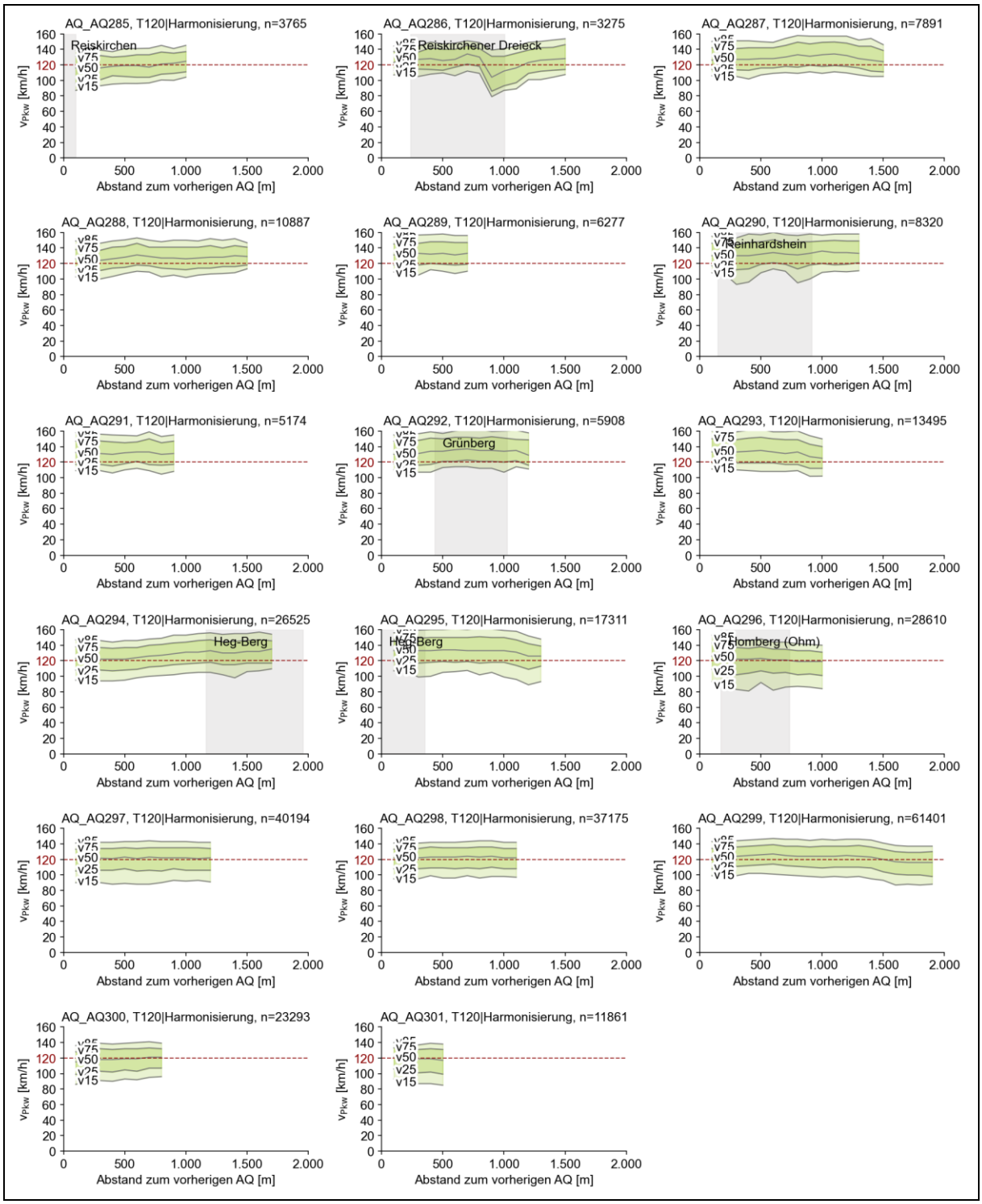


Abbildung A-38: A 5 von der AS Reiskirchen bis zur L3146, Harmonisierungsschaltung, TLimit = 120 km/h

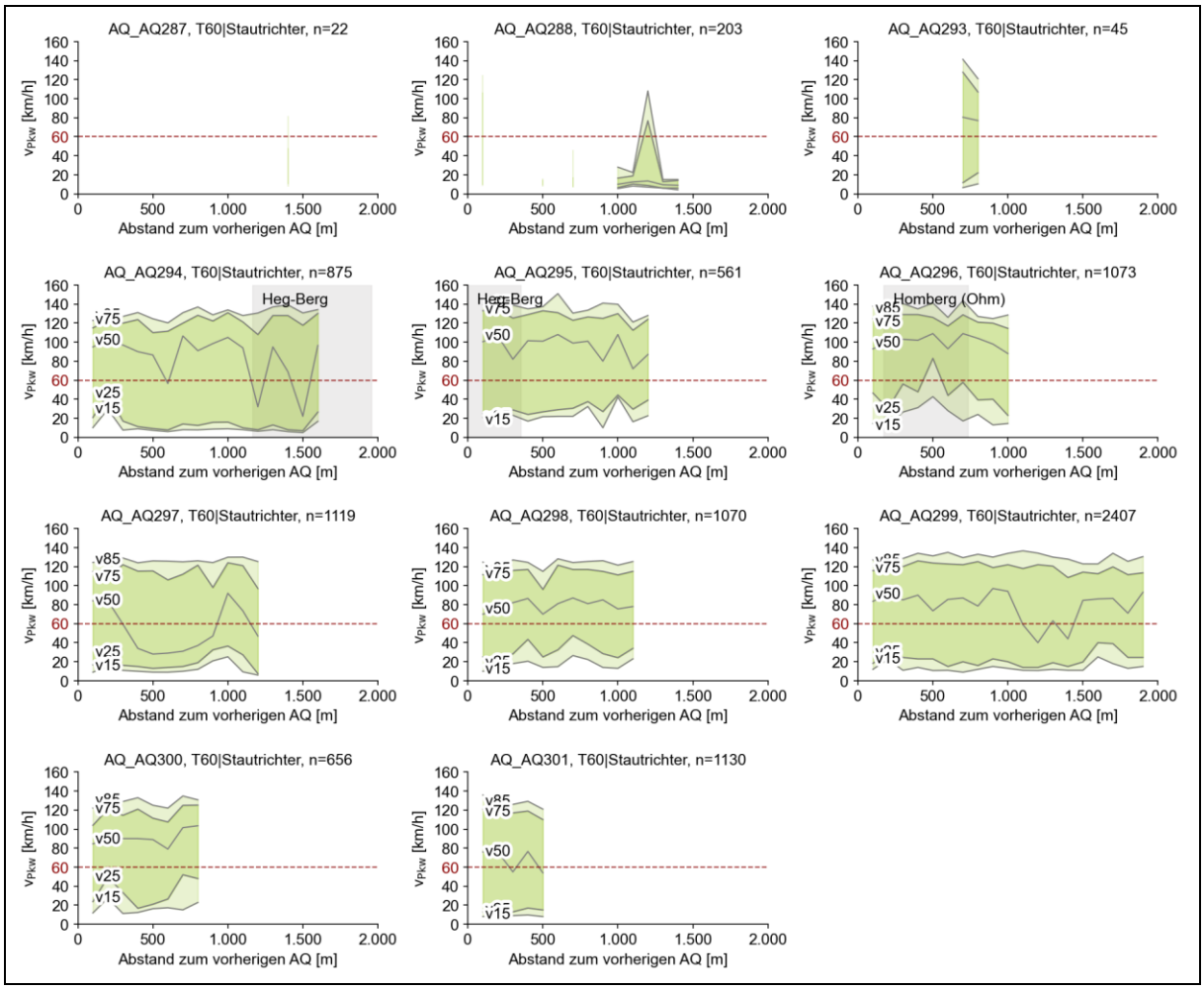


Abbildung A-39: A 5 von der AS Reiskirchen bis zur L3146, Stautrichterschaltung, TLimit = 60 km/h

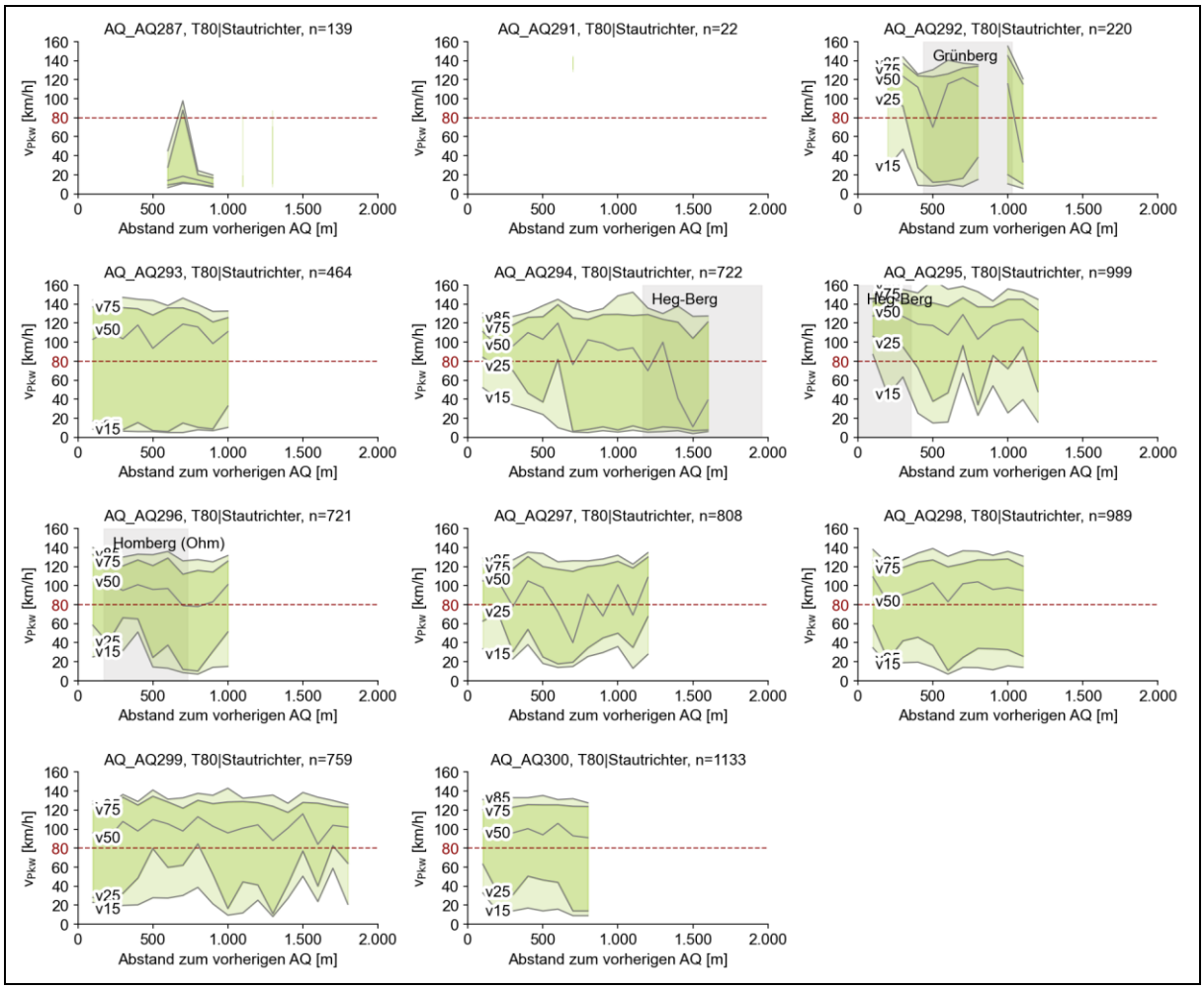


Abbildung A-40: A 5 von der AS Reiskirchen bis zur L3146, Stautrichterschaltung, TLimit = 80 km/h

A.3 Weg-Zeit-Diagramme aus Drohnenmessungen

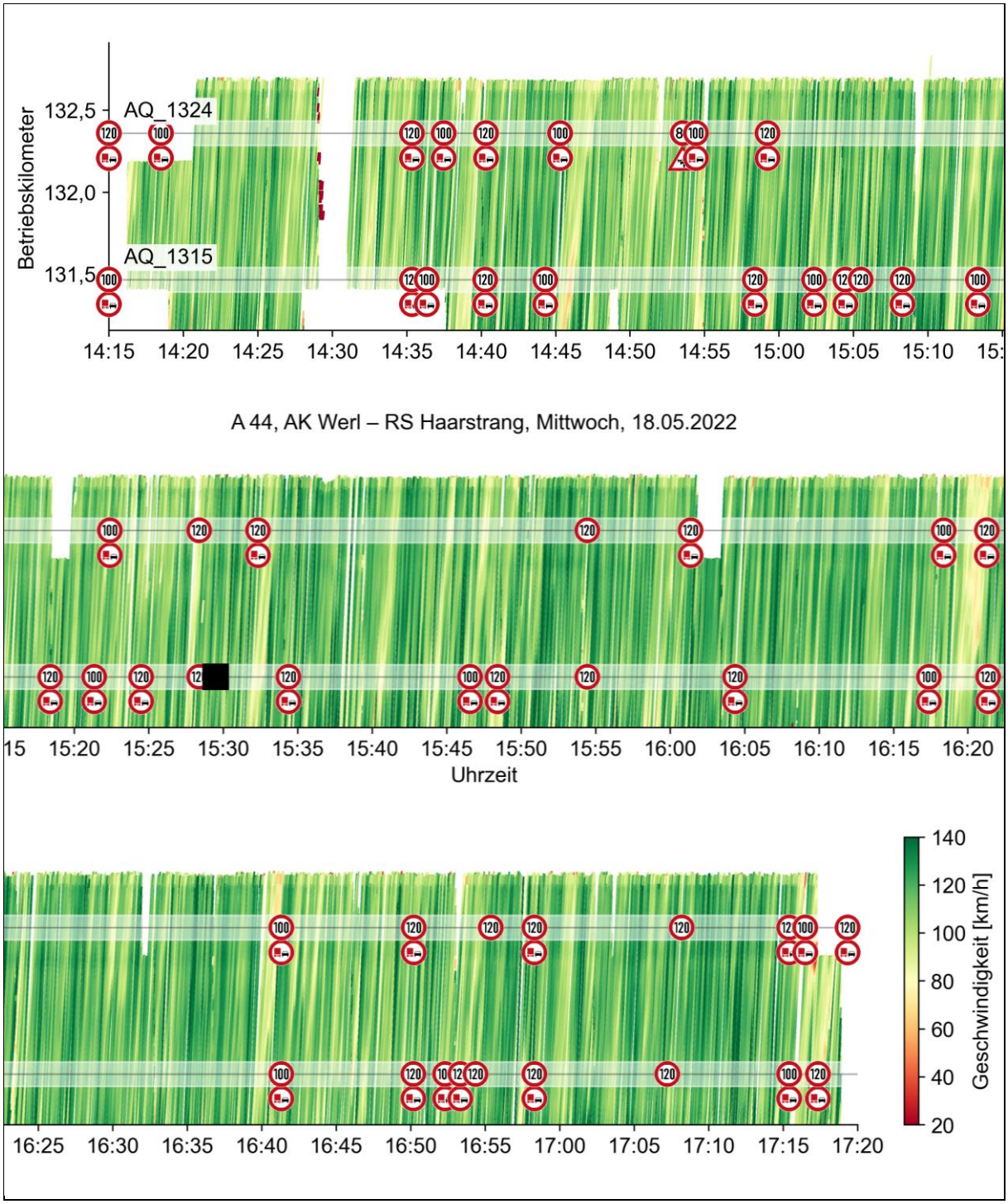


Abbildung A-41: Weg-Zeit-Diagramm mit Fahrzeugtrajektorien (vKfz) und Schaltzuständen für die A 44, zwischen dem AK Werl und der RS Haarstrang am 18.05.2022

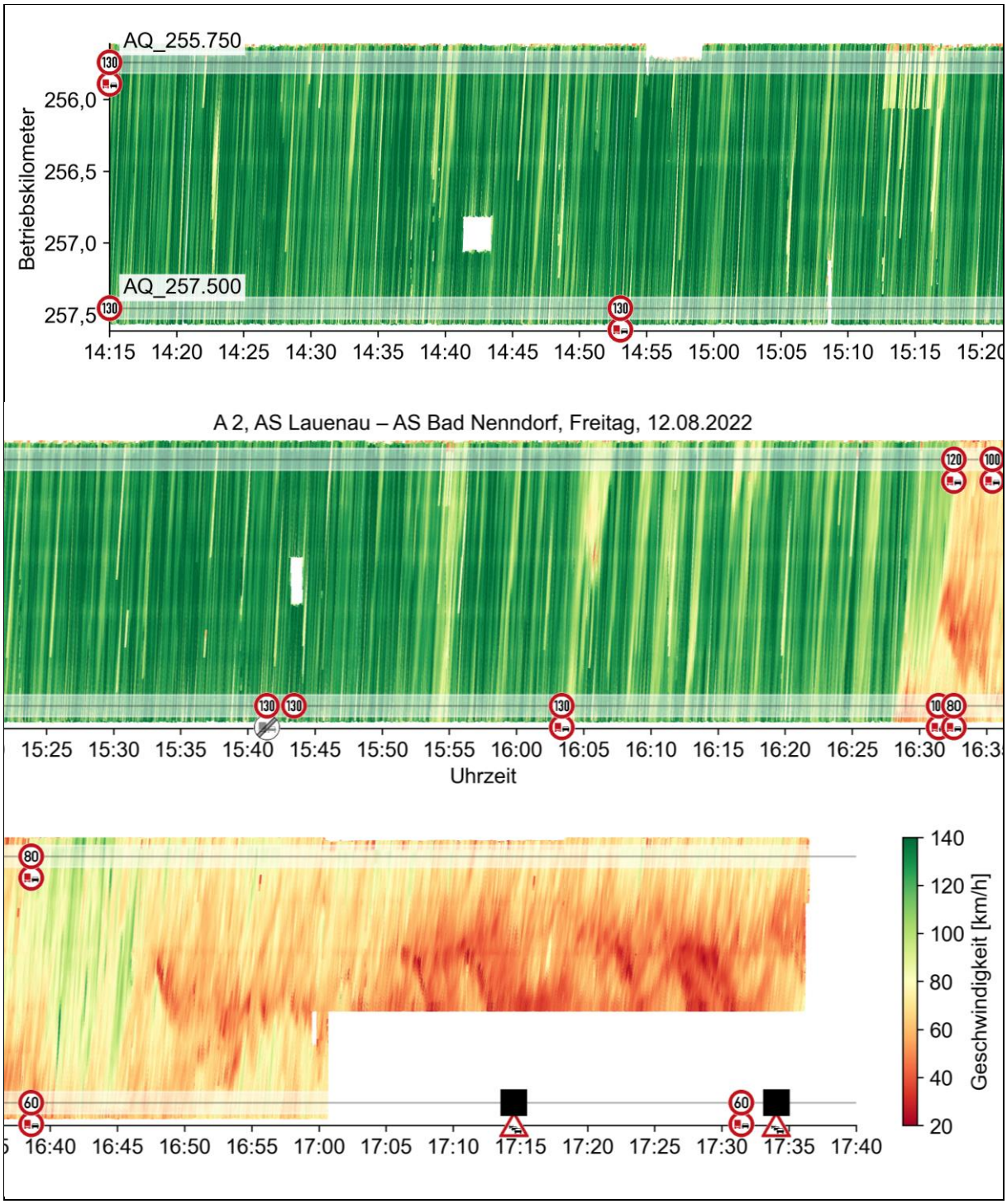


Abbildung A-42: Weg-Zeit-Diagramm mit Fahrzeugtrajektorien (vKfz) und Schaltzuständen für die A 2, zwischen der AS Lauenau und der AS Bad Nenndorf am 12.08.2022

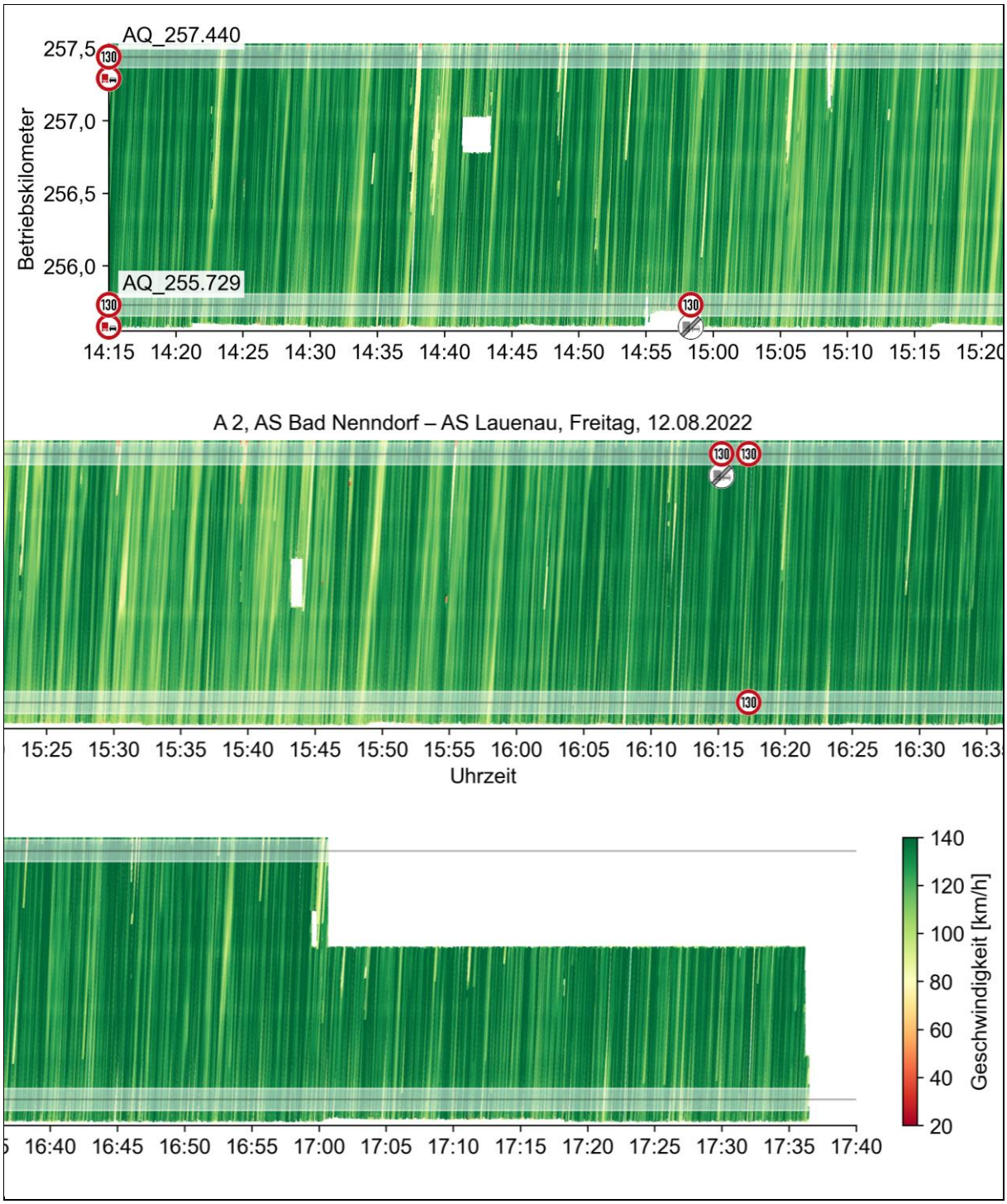


Abbildung A-43: Weg-Zeit-Diagramm mit Fahrzeugtrajektorien (vKfz) und Schaltzuständen für die A 2, zwischen der AS Bad Nenndorf und der AS Lauenau am 12.08.2022

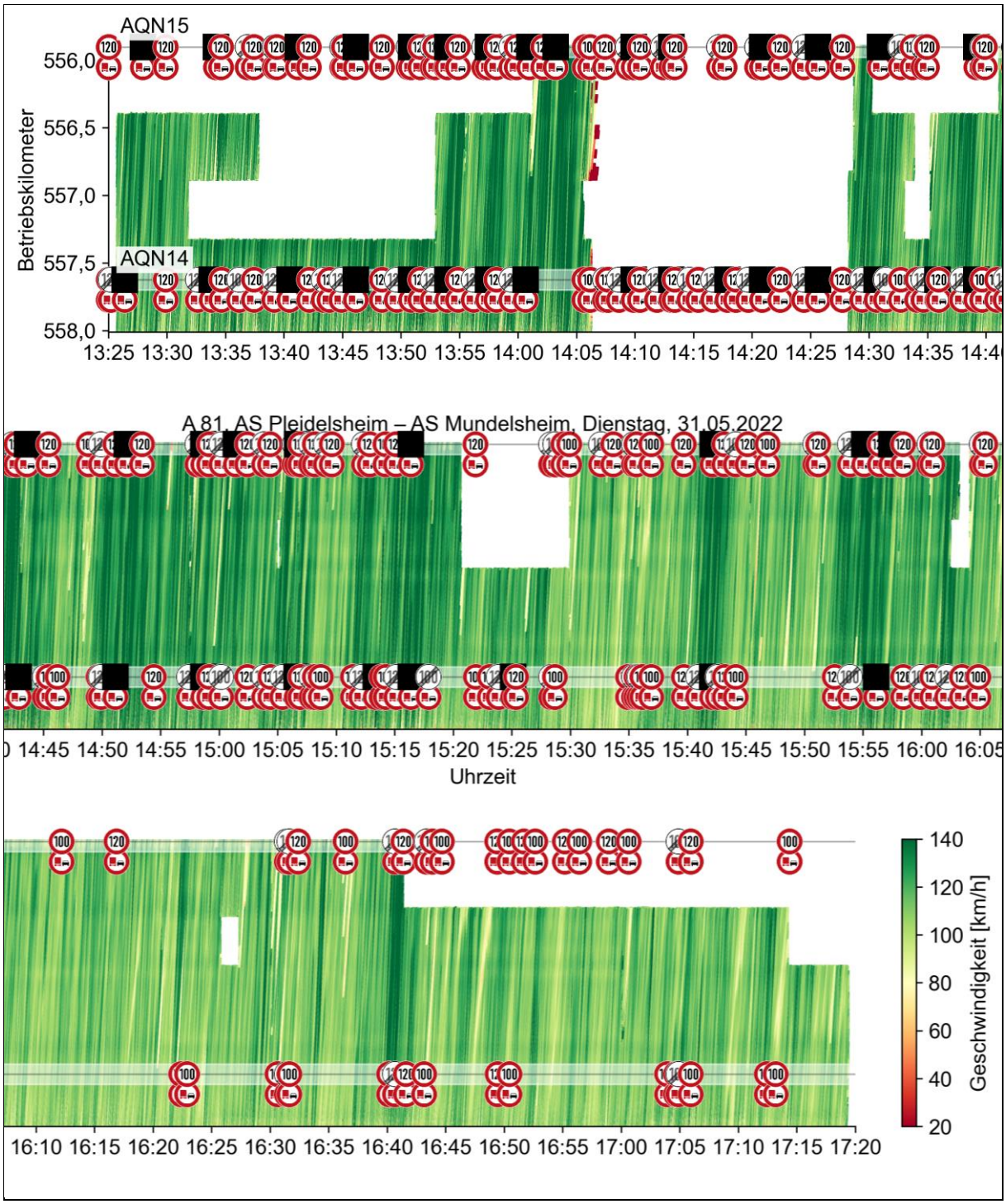


Abbildung A-44: Weg-Zeit-Diagramm mit Fahrzeugtrajektorien (vKfz) und Schaltzuständen für die A 81, zwischen der AS Pleidelsheim und der AS Mundelsheim am 31.05.2022

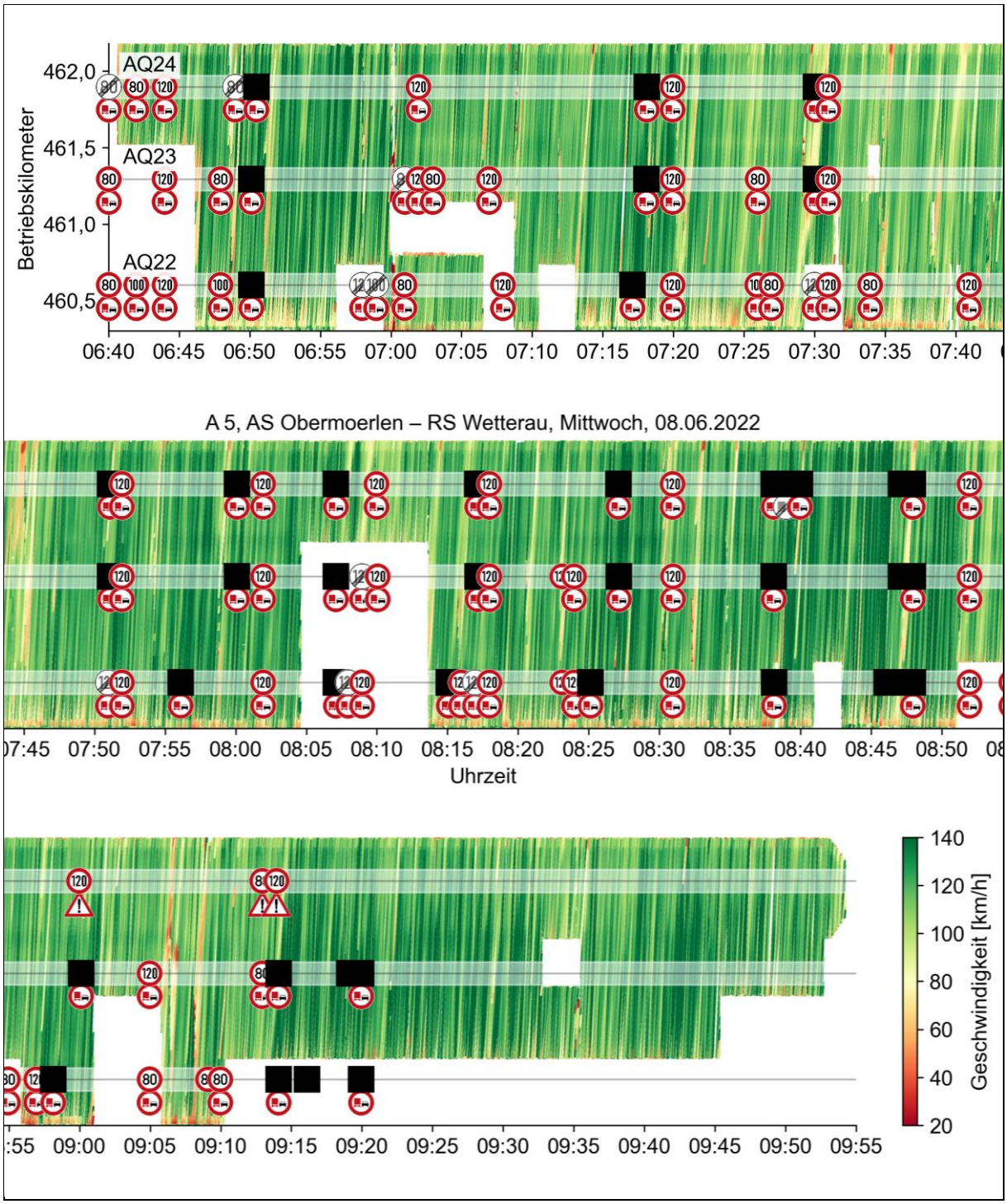


Abbildung A-45: Weg-Zeit-Diagramm mit Fahrzeugtrajektorien (vKfz) und Schaltzuständen für die A 5, zwischen der AS Obermoerlen und der RS Wetterau am 08.06.2022

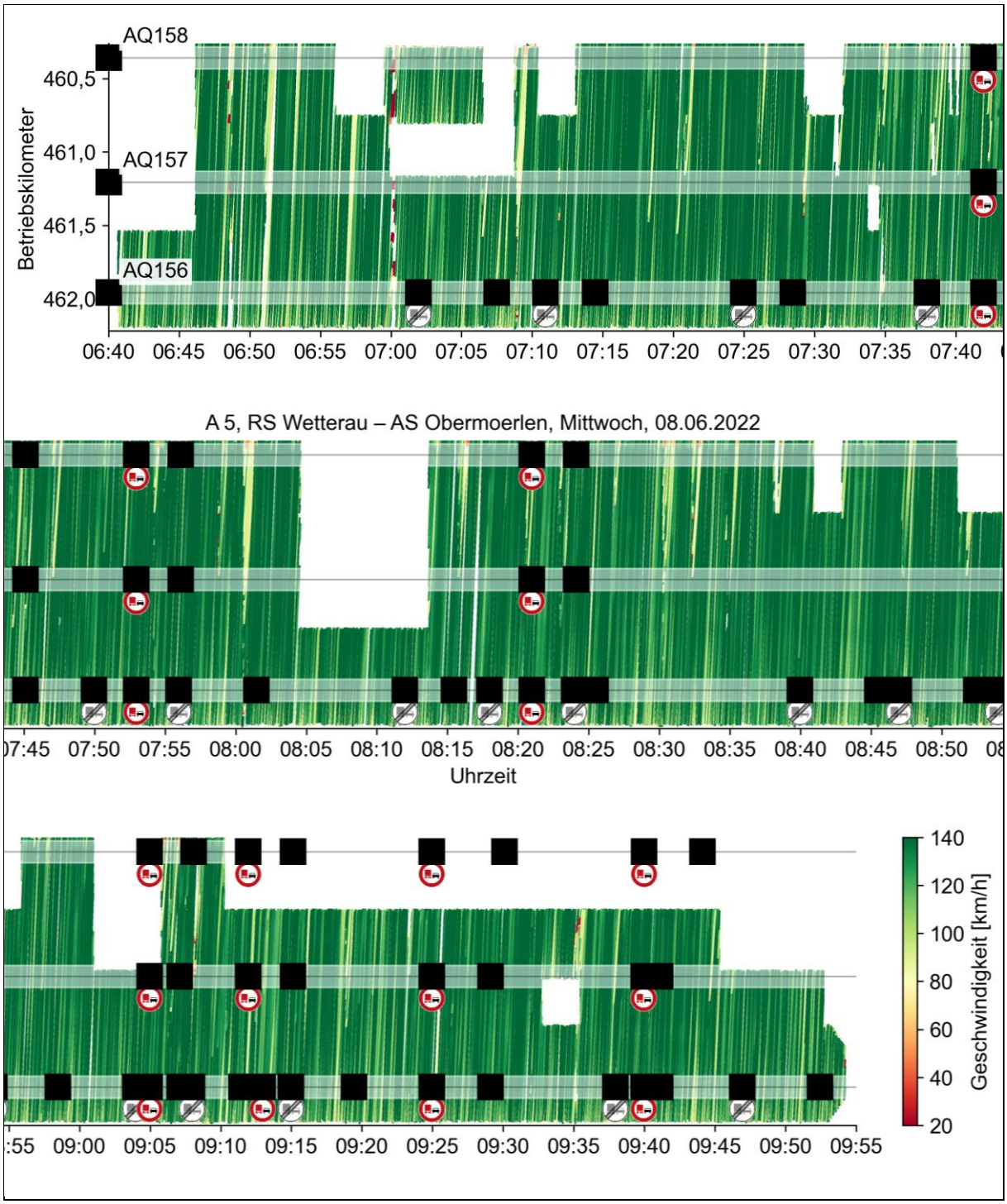


Abbildung A-46: Weg-Zeit-Diagramm mit Fahrzeugtrajektorien (vKfz) und Schaltzuständen für die A 5, zwischen der RS Wetterau und der AS Obermoerlen am 08.06.2022

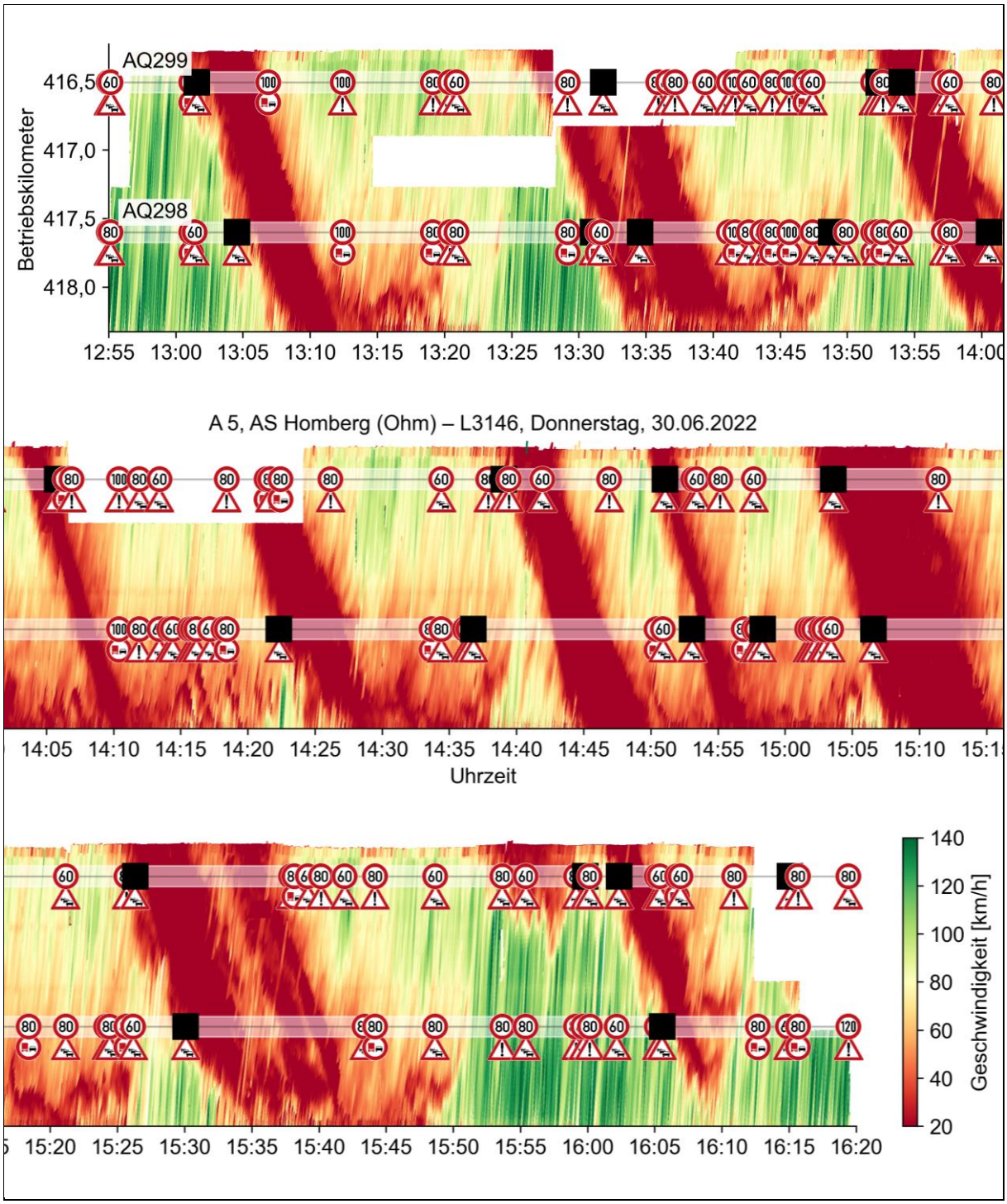


Abbildung A-47: Weg-Zeit-Diagramm mit Fahrzeugtrajektorien (vKfz) und Schaltzuständen für die A 5, zwischen der AS Homberg (Ohm) und der L 3146 am 30.06.2022

A.4 Parameter in PTV Vissim

Bezeichnung in PTV Vissim Version 5.40 nach GEISTEFELDT et al. (2017)	Bezeichnung in PTV Vissim 2023 (SP 04)	Wert nach GEISTEFELDT et al. (2017)		Standardwert Vissim 2023	Verwendeter Wert	
Parameter Name	Parameter Name	Pkw	Lkw	Pkw / Lkw	Pkw	Lkw

Voraus min	Vorausschauweite Minimum	0	0	0	0	0
Voraus max	Vorausschauweite Maximum	250	250	250	250	250
Anz VM	Anzahl Interaktionsobjekte	2	2	2	2	2
-	Anzahl Interaktionsfahrzeuge	-	-	99	99	99
Zurück min	Zurückschauweite Minimum	0	0	0	0	0
Zurück max	Zurückschauweite Maximum	150	150	150	150	150
Unaufm. Dauer	-	0	0	-	-	-
Unaufm. Wkt	-	0	0	-	-	-
-	Wiederherstellungsverhalten nach Geschwindigkeitseinbruch – Langsame Wiederherstellung	-	-	nein	nein	nein
-	Wiederherstellungsverhalten nach Geschwindigkeitseinbruch – Geschwindigkeit	-	-	60%	60%	60%
-	Wiederherstellungsverhalten nach Geschwindigkeitseinbruch – Beschleunigung	-	-	40%	40%	40%
-	Wiederherstellungsverhalten nach Geschwindigkeitseinbruch – Sicherheitsabstand	-	-	110%	110%	110%
-	Wiederherstellungsverhalten nach Geschwindigkeitseinbruch – Entfernung	-	-	2000	2000	2000
-	Stillstandsabstand für statische Hindernisse	-	-	nein	nein	nein
-	Ruckbegrenzung	-	-	ja	ja	ja
Modell	Modell	Wiedemann 99	Wiedemann 99	Wiedemann 99	Wiedemann 99	Wiedemann 99
CC0	CC0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
CC1	CC1	1.05	1.05	0.9	1.05	1.05
CC2	CC2	4	4	4	4	4
CC3	CC3	-8	-8	-8	-8	-8
CC4	CC4	-0.3	-0.3	-0.35	-0.3	-0.3
CC5	CC5	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
CC6	CC6	11.44	11.44	11.44	11.44	11.44
CC7	CC7	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
CC8	CC8	3.5	2.5	3.5	3.5	2.5
CC9	CC9	1.5	1	1.5	1.5	1
Verhalten	Grundverhalten	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot
BMIN eigene	Notwendiger Fahrstreifenwechsel (Route): maximale Verzögerung (eigene)	-4	-4	-4	-4	-4
Entf. Eigene	Notwendiger Fahrstreifenwechsel (Route): -1 m/s² pro Entfernung (eigene)	300	200	200	300	200
MAX eigene	Notwendiger Fahrstreifenwechsel (Route): akzeptierte Verzögerung (eigene)	-1	-1	-1	-1	-1
BMIN FoFZ	Notwendiger Fahrstreifenwechsel (Route): maximale Verzögerung (Folgefahrzeug)	-3	-3	-3	-3	-3
Entf. FoFZ	Notwendiger Fahrstreifenwechsel (Route): -1 m/s² pro Entfernung (Folgefahrzeug)	200	200	200	200	200
MAX FoFZ	Notwendiger Fahrstreifenwechsel (Route): akzeptierte Verzögerung (Folgefahrzeug)	-0.75	-0.5	-0.5	-0.75	-0.5
T Diffusion	Wartezeit bis zur Diffusion	60	60	60	60	60
SPW Lücke	Mindestweglücke (vorne/hinten)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Freifahrzeit	Auf langsameren Fahrstreifen, wenn Kollisionszeit mind.	15	1	11	15	1
ABX Faktor	Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

MaxB koop.	Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen	-3	-3	-3	-3	-3
koop. Sp.W.	kooperativer Fahrstreifenwechsel	ja	nein	nein	ja	nein
Max. Geschwin-dig-keitsdiffe-renz	Max. Geschwindigkeitsdifferenz	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8
Max. Kollisions-zeit	Max. Kollisionszeit	10	10	10	10	10
-	Hinterkantenkorrektur der Querposition	-	-	nein	nein	nein
-	Maximale Geschwindigkeit	-	-	3	3	3
-	Aktiv während der von … bis … nach Be-ginn des Fahrstreifenwechsels	-	-	1 bis 10	1 bis 10	1 bis 10
LFB überh.	Langsamfahrbereiche überholen	nein	nein	nein	nein	nein
int. Einfädeln	intelligentes Einfädeln	ja	nein	ja	ja	nein
-	Vorausschau Fahrzeugroutenentscheidung	-	-	ja	ja	ja

Verwendeter Wert nach GEISTEFELDT et al. (2017), abweichend vom Vissim-Standardwert

In PTV Vissim v.5.40 noch nicht vorhandener Paramater

In PTV Vissim v.2023 (SP05) nicht mehr vorhandener Parameter

Tabelle A-1: Übersicht der in PTV Vissim verwendeten Parameterwerte

A.5 Übersicht ausgewählter SBA-Strecken in Österreich und Schweiz

Nr.	Betreiber	SBA-Name	BAB	km von	km bis	Länge	Anzeigequerschnitte*				Messquerschnitte*				MQ-AQ-Zuordnung***			zeitliche Aggregation
							Anz. AQ	min. Abstand AQ	max. Abstand AQ	mittlerer Abstand AQ	Anzahl MQ	min. Abstand MQ	max. Abstand MQ	mittlerer Abstand MQ	HARMON	Stau	Lkw-ÜV	
14	ASFINAG (AT)	SBA A02-1	A02	0,243	15,193	14,950	15	0,790 km	1,531 km	0,997 km	15	0,793 km	1,532 km	0,997 km	direkt am MQ	direkt am MQ	direkt am MQ	1min
15	ASFINAG (AT)	SBA A02-2	A02	0,124	23,000	22,876	21	0,645 km	1,702 km	1,089 km	21	0,644 km	1,702 km	1,089 km	direkt am MQ	direkt am MQ	direkt am MQ	1min
16	ASFINAG (AT)	SBA A4-1	A4	0,230	13,750	13,520	15	0,500 km	2,153 km	0,901 km	17	0,645 km	2,169 km	0,795 km	direkt am MQ	direkt am MQ	direkt am MQ	1min
17	ASFINAG (AT)	SBA A4-2	A4	0,085	13,750	13,665	15	0,445 km	1,845 km	0,911 km	15	0,386 km	1,845 km	0,911 km	direkt am MQ	direkt am MQ	direkt am MQ	1min
18	ASFINAG (AT)	SBA A23-1	A23	0,377	14,235	13,858	12	0,628 km	2,544 km	1,155 km	20	0,112 km	1,209 km	0,693 km	direkt am MQ	direkt am MQ	direkt am MQ	1min
19	ASFINAG (AT)	SBA A23-2	A23	0,374	14,564	14,190	13	0,608 km	2,219 km	1,092 km	20	0,019 km	1,342 km	0,710 km	direkt am MQ	direkt am MQ	direkt am MQ	1min
20	ASFINAG (AT)	SBA S01-1	S01	0,150	16,200	16,050	18	0,165 km	3,060 km	0,892 km	21	0,053 km	1,395 km	0,764 km	direkt am MQ	direkt am MQ	direkt am MQ	1min
21	ASFINAG (AT)	SBA S01-2	S01	0,290	15,200	14,910	12	0,182 km	2,736 km	1,243 km	16	0,050 km	1,803 km	0,932 km	direkt am MQ	direkt am MQ	direkt am MQ	1min
22	ASTRA (CH)	GHGW N03-FCH	N03	107,958	136,200	28,242	27	0,400 km	1,270 km	1,046 km	23	0,460 km	2,310 km	1,228 km	direkt am MQ	direkt am MQ	direkt am MQ	Einzelfahrz.
23	ASTRA (CH)	GHGW N03-FZH	N03	107,958	136,200	28,242	25	0,620 km	1,475 km	1,130 km	22	0,620 km	2,480 km	1,284 km	direkt am MQ	direkt am MQ	direkt am MQ	Einzelfahrz.

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Verkehrstechnik“

2023

V 371: Begleitende Systemevaluation der Maßnahme: Sicheres Ausleiten bei BAG-Standkontrollen
Fehn, Margreiter, Spangler, Bogenberger, Emmermann, Bengler, Vierkötter, Nedkov, Feldges, Holst
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 372: Autonome Systeme für Straßenbetriebsdienste (AETAS BAB)
Lüpges, Kleer, Holldorb, Zielke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 373: Modellanalyse Schadstoffimmissionen – Auswirkungen des Verkehrs auf die Luftqualität in drei Ballungsräumen
Jakobs, Schneider, Toenges-Schuller, Düring, Hoffmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 374: Kriterien für die Beurteilung des Gefährdungspotenzials für Motorradfahrer durch scharfkantige Konstruktionsteile in Fahrzeug-Rückhaltesystemen
Kathmann, von Heel, Schimmelpfennig, Reglitz, Kammel, Goergen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 375: Virtuelle Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen mit der Finite-Elemente-Simulation
Fröhlich, Schwedhelm, Kübler, Balzer-Hebborn, Yu
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 376: Innovative Datenerfassung und -nutzung im Straßenbetriebsdienst
Hess, Best, Lohmeier, Temme
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

2024

V 377: Verfahren für die Bewertung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen als Ganzjahresanalyse für unterschiedliche Randbedingungen
Geistefeldt, Hohmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 378: Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit an Arbeitsstellen auf Autobahnen unter unterschiedlichen Randbedingungen
Geistefeldt, von der Heiden, Oeser, Kemper, Diner, Baier, Klemps-Kohnen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 379: Nachhaltige Förderung des Radverkehrs im Winter durch optimierten Winterdienst (WinRad)
Holldorb, Riel, Wiesler, Cypra, März
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 380: Maßnahmen zum Umgang mit japanischem Staudenknöterich
Molder, Gaar, Münch, Alberternst
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 381: Akustische Wirksamkeit abknickender und gekrümmter Lärmschirme
Lindner, Ruhnau, Schulze
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 382: Potenziale für Photovoltaik an Bundesfernstraßen
Ludwig, Tegeler, Schmedes, Tomhave, Hensel, Forster, Kleinhans, Heinrich, John, Schill € 19,50

V 383: Analyse und Entwicklung leistungsfähiger Einfahrttypen ohne Fahrstreifenaddition für Autobahnen
Geistefeldt, Brandenburg, Sauer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 384: Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen – Methoden zur Untersuchung und Metaanalyse
Maier, Leonhardt, Ehm
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 385: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf einbahnigen Landstraßen
Geistefeldt, Hohmann, Finkbeiner, Sauer, Vortisch, Buck, Weyland, Weiser, Giuliani
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

2025

V 386: Pilothafte Anwendung des Bridge-WIM Verfahrens zur Ergänzung des Achslastmessstellennetzes
Firus, Petschacher
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 387: Akustische Wirksamkeit von Vegetation
Lindner, Schulze
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 388: Hochaufgelöste multisensorielle Verkehrsdaten in der Streckenbeeinflussung
Schwietering, Löbbering, Weinreis, Maier, Feldges
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 389: Lärmwetter in der Praxis – Erprobung und Weiterentwicklung der Methodik zur Anwendung meteorologischer Korrekturen auf die Schallausbreitung
Skowronek, Liepert, Müller, Schady, Elsen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 390: Wirkung von Fahrstreifenbegrenzungen an Einfahrten von Autobahnen auf das Fahrverhalten und auf die Verkehrssicherheit
Geistefeldt, Sauer, Brandenburg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 391: Erprobung psychoakustischer Parameter für innovative Lärmminderungsstrategien
Oehme, Böhm, Horn, Pourpart, Schweidler, Weinzierl, Fiebig, Schuck
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 392: Evaluierung der Wirksamkeit bestehender Überflughilfen für Fledermäuse an Straßen
Albrecht, Reers, Scharf, Grimm, Radford, Namyslo, Günther, Martin, Behr
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 393: Optimierung der Abstände von Anzeigequerschnitten und Messquerschnitten in Streckenbeeinflussungsanlagen
Schwietering, Löbbering, Abarghooie, Geistefeldt, Marnach
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.
www.schuenemann-verlag.de
Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-836-2
https://doi.org/10.60850/bericht-v393

www.bast.de